

Міністерство освіти і науки України;  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти» (Україна);  
Національна академія наук вищої освіти України;  
Донбаська державна машинобудівна академія (Україна);  
Вінницький національний технічний університет (Україна);  
Apeiron University in Banja Luka, (Bosnia and Herzegovina);  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod4 JJ Strossmayer University of  
Osijek (Croatia);  
University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering;  
Zhejiang Normal University, College of Engineering,  
Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance  
Technology & Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, (China);  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна);  
Вінницький національний аграрний університет (Україна);  
Академія дослідників штучного інтелекту (Україна);  
Студентське наукове товариство з технологій машинобудування (Україна);  
Мала академія наук з науково-промислового профілю (Україна).



## МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО- ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

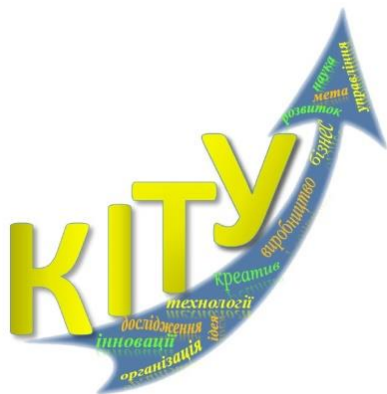
Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
16-18 квітня 2025 р.

За загальною редакцією  
д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського  
and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Краматорськ - Вінниця - Тернопіль, Україна,

2025

Ministry of Education and Science of Ukraine;  
Institute of Education Content Modernization (Ukraine);  
National Academy of Higher Education of Ukraine;  
Donbass State Engineering Academy (Ukraine);  
Vinnytsia National Technical University (Ukraine);  
Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);  
Apeiron University in Banja Luka, (Bosnia and Herzegovina);  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, JJ Strossmayer University of Osijek  
(Croatia);  
University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering (Montenegro);  
Zhejiang Normal University, College of Engineering,  
Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology &  
Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, (China);  
Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine);  
Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine);  
Academy of Artificial Intelligence Researchers (Ukraine);  
Student Scientific Society for Manufacturing Technologies (Ukraine);  
Junior Academy of Sciences of Scientific and Industrial Profile (Ukraine).



## **YOUNG SCIENCE - ROBOTICS AND NANO- TECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS  
International Youth Scientific and Technical Conference  
April 16-18, 2025

According to the general edition  
Doctor of Technical Sciences, Prof. Sergiy Kovalevskyy and  
Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Kramatorsk - Vinnytsia - Ternopil, 2025

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)

М 75

**Рецензенти:**

Колосов Д.Л. - докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Новіков Ф.В. - докт. техн. наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Затверджено на засіданні вченої ради ДДМА (протокол № 8 від 27.03.2025 р.)

М 75 Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 16-18 квітня 2025 р.. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2025. – 349 с.

Young science - robotics and nano-technologies of modern mechanical engineering: a collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, April 16-18, 2025 / for general. ed. S.V. Kovalevsky, Dr. Tech. Science, Prof., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić - Kramatorsk: DSEA, 2025. - 349 p.

ISBN 978-617-7889-98-3

У збірнику опубліковано матеріали праць аспірантів, магістрантів, студентів і учнів – членів Малої академії наук з науково-промислового профілю. Пропонуються перспективні ідеї, аналіз конкретних проблемних питань автоматизації машинобудування, створення робочих функціональних поверхонь деталей машин; подано розробки, готові до впровадження. Призначений для використання в практичній діяльності здобувачів освіти ВНЗ і фахівців машинобудівних підприємств.

The collection contains materials of works of graduate students, undergraduates, students and pupils – members of the Small Academy of Sciences in science and industry. Perspective ideas, the analysis of concrete problematic questions of automation of mechanical engineering, creation of working functional surfaces of details of cars are offered; ready-to-implement developments are submitted. It is intended for use in practical activity of students, masters of high school and experts of the machine-building enterprises.

ISBN 978-617-7889-98-3

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)

© ДДМА,  
2025

### Програмний комітет конференції:

- Dašić Predrag - Hon.D.Sc., Prof., Academy of Professional Studies Šumadija - – Department in Trstenik (Serbia);**
- Jenek Mariusz - Dr. inz (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);**
- Marušić Vlatko - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);**
- Sandra Poirier - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);**
- Guida Domenico - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);**
- Gyula Mester, - Dr.Sc., Professor, Academic, (University of Szeged, Hungary);**
- Karabegović Isak - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina);**
- Mirjanić Dragoljub - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina);**
- Nedeff Valentin - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania);**
- Pele Alexandru-Viorel, dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania);**
- Zhelezarov S. Iliya, rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria);**
- Гринь О.Г. – к.т.н., доц., ДДМА, м. Краматорськ-Тернопіль (Україна);**
- Залога В.О. - д.т.н., проф. (СумДУ, м.Суми, Україна);**
- Кіяновський М.В. - д.т.н., проф. (КНТУ, Кривий Ріг, Україна);**
- Клименко С.А. – д.т.н., проф. (ІНМ АНУ, Київ, Україна);**
- Ковалевська О.С. - к.т.н., доц., (ДДМА, м.Краматорськ, Україна);**
- Ковалевський С.В. - д.т.н., проф., (ДДМА, м.Краматорськ, Україна);**
- Ковальов В.Д. - д.т.н., проф., (ДДМА, м.Краматорськ, Україна);**
- Козлов Л.Г. - д.т.н., проф., (ВНТУ, м.Вінниця, Україна);**
- Колосов Д.Л. – д.т.н., проф. («Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна);**
- Коржов Є.О. - к.є.н., начальник бюро перспективного розвитку ПрАТ «НКМЗ» (м.Краматорськ, Україна);**
- Кузнецов Ю.М. - д.т.н., проф., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);**
- Мазур М.П. - д.т.н., проф., (ХНУ, м.Хмельницький, Україна);**
- Макаренко Н.О. - д.т.н., проф., (ДДМА, м.Краматорськ, Україна);**
- Марков О.Є. - д.т.н., проф., (ДДМА, м.Краматорськ, Україна);**
- Марчук В.І. - д.т.н., проф., (ЛНТУ, м.Луцьк, Україна);**
- Новіков Ф.В. - д.т.н., проф., (ХНЕУ, м.Харків, Україна);**
- Оргіян О.А. - д.т.н., проф., (ОНПУ, м.Одеса, Україна);**
- Петраков Ю.В. - д.т.н., проф., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);**
- Петров О.В.- к.т.н., доц., (ВНТУ, м.Вінниця, Україна);**
- Сапон С.П., - к.т.н., доц., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);**
- Сухоруков С.І. – к.т.н., доц. (ВНТУ, м. Вінниця, Україна).**

### ***Program Committee:***

- Predrag Dašić** - Hon.D.Sc., Prof., Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);
- Jenek Mariusz** - Dr. inż (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);
- Marušić Vlatko** - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);
- Sandra Poirier** - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);
- Guida Domenico** - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);
- Gyula Mester,** - Dr.Sc., Professor, Academic, (University of Szeged, Hungary);
- Karabegović Isak** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina)
- Mirjanić Dragoljub** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina)
- Nedeff Valentin** - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania)
- Pele Alexandru-Viorel,** dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania)
- Zhelezarov S. Iliya,** rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria)
- Hryn O.H.** - Ph.D., Associate Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Zaloha V.O.** - D.Sc., Professor (SumDU, Sumy, Ukraine);
- Kiyansky M.V.** - D.Sc., Professor (KNTU, Kryvyi Rih, Ukraine);
- Klymenko S.A.** - D.Sc., Professor (ISM NASU, Kyiv, Ukraine);
- Kovalevska O.S.** - Ph.D., Associate Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kovalevskyy S.V.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kovalov V.D.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kozlov L.G.** - D.Sc., Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Kolosov D.L.** - D.Sc., Professor («Dnipro Polytechnic», Dnipro, Ukraine);
- Korzhov Ye.O.** - Ph.D. in Economics, Head of the Bureau of Strategic Development of PJSC "NKMZ" (Kramatorsk, Ukraine);
- Kuznetsov Yu.M.** - D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Mazur M.P.** - D.Sc., Professor (KhNU, Khmelnytskyi, Ukraine);
- Makarenko N.O.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Markov O.Ye.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Marchuk V.I.** - D.Sc., Professor (LNTU, Lutsk, Ukraine);
- Novikov F.V.** - D.Sc., Professor (KhNEU, Kharkiv, Ukraine);
- Orhyan O.A.** - D.Sc., Professor (ONPU, Odesa, Ukraine);
- Petrakov Yu.V.** - D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Petrov O.V.** - Ph.D., Associate Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Sapon S.P.** - Ph.D., Associate Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Sukhorukov S.I.** - Ph.D., Associate Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine).

Opening speech from the organizing committee.	12
Вступне слово від організаційного комітету.	
<b>Isak Karabegović<sup>1</sup>, Ermin Husak<sup>2</sup>, Predrag Dašić<sup>3</sup></b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; <sup>2</sup>University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bihać, Bosnia and Herzegovina; <sup>3</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia</i> ) <b>THE USE OF BIOMATERIALS AND BIODEVICES IN ROBOTS WITH THE GOAL OF INCREASING THEIR FUNCTIONALITY</b>	14
<b>Kandume J.<sup>1</sup>, Shkvar Ye.<sup>1,2</sup></b> ( <i>1 – College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China, 2 – Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine</i> ) <b>PIV-MEASUREMENTS IN THE NEAR-WAKE OF THE OSCILLATING WING SECTION</b>	28
<b>Milica Tufegdžić<sup>1</sup>, Marija Mojsilović<sup>2</sup>, Predrag Dašić<sup>3</sup>, Saša Avramović<sup>4</sup></b> ( <i><sup>1,2,4</sup>Academy of Professional Studies Šumadija, Kragujevac, Serbia, <sup>3</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia</i> ) <b>APPLICATION OF UML TECHNIQUES IN MODELING AN INFORMATION SYSTEM FOR PAYROLL MANAGEMENT</b>	34
<b>Poberezhets Vladyslav<sup>1</sup>, Hleba Oleksandra<sup>1</sup>, Liu Keming<sup>1,2</sup>, Piontkevych Oleh<sup>1</sup></b> ( <i><sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University, Ukraine; <sup>2</sup>Beibu Gulf University, People's Republic of China</i> ) <b>APPLICATION IN C# PROGRAMMING LANGUAGE FOR AUTOMATED SELECTION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A SNAP GAUGE</b>	43
<b>Predrag Pravdić, Violeta Dorđević</b> ( <i>Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia</i> ) <b>BIOMATERIALS IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY</b>	47
<b>Predrag Pravdić, Violeta Dorđević</b> ( <i>Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia</i> ) <b>ECO-MATERIALS AND ECO-TECHNOLOGIES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING</b>	57
<b>Predrag Pravdić, Violeta Dorđević</b> ( <i>Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia</i> ) <b>TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PROTECTIVE AND WORK EQUIPMENT IN MODERN INDUSTRY</b>	68
<b>Abhari P.B., Oliinyk D.S.</b> ( <i>Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopil, Ukraine</i> ) <b>A THEORETICAL INVESTIGATION OF DIFFERENT FILLET CONFIGURATIONS ON THE UPPER DIE IN RADIAL EXTRUSION USING THE FINITE ELEMENT METHOD</b>	77
<b>Бабенко М.О., Люботин В.С.</b> ( <i>Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет, м. Дрогобич, Україна</i> ) <b>ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ОБРОБЛАННЯ ОТВОРІВ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ FUSION360</b>	88
<b>Безгін О.А.</b> ( <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль, Україна</i> ) <b>АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ</b>	84

**ТА ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ  
МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

- Безпалов Є.В., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ОПОРЯДЖУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ТІЛ ОБЕРТАННЯ** 91
- Борисенко Ю.Ю.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗВАРЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ СУМІШІ** 94
- Брижак О.А.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна), **Ковалевський С.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ** 99
- Бутовський Д.В., Нечаєв В.П., Рязанцев А.О.** (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна) **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВО - МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ** 104
- Врублевський І. Б.** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна) **ГІБРИДНЕ ВИРОБНИЦТВО: ПОЄДНАННЯ АДИТИВНИХ ТА СУБТРАКТИВНИХ (ТРАДИЦІЙНИХ) МЕТОДІВ** 111
- Глеба О.М., Побережець В.Я.,** наук. кер. к.т.н. **Сухоруков С.І.** (Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна) **ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ У МАШИНОБУДУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНОГО НАВЧАННЯ** 116
- Горбачов О.С.,** наук. кер. **Руденко В.М.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) **МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ВВЕДЕННЯ АНАЛОГОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ** 119
- Гринь О.Г., Жаріков С.В., Шахбазян О.Ф., Кеніч Д.І., Титаренко Д.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна) **ВАРІАНТИ ВИГОТОВЛЕННЯ САМОЗАХИСНОГО ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА МІДІ ЗІ СТАЛЛЮ** 126
- Камінський Д., Кіяновський М.В., Цивінда Н.І., Кіяновська Н.М.** (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна) **ПОЄДНАННЯ МОТИВАЦІЙНИХ ЗАСАД ЗДОБУВАЧА ОСВІТИ З ПОТЕНЦІАЛОМ ОСВІТНЬОЇ СИСТЕМИ** 135
- Карявкіна Н.С.** (ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНФЕСТПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна), **Цимбал Б.М.** (Національний університет цивільного захисту України м. Черкаси, Україна) **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРОМИСЛОВИМИ РОБОТАМИ ТА МАНІПУЛЯТОРАМИ** 142
- Катріч С.Г., Дмитрієв Д.О.** (Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна) **РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗД ДРУКУ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ** 149
- Кінденко М. І., Бобрик О.С., Шистка І.В., Бадюкова М.Г.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна) 154

**ЗБІЛЬШЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ**

- Кобець І.Р., Кузнєцов Ю.М.** (*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*) **СТВОРЕННЯ НАСТІЛЬНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА** 160
- Ковалевський С.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*), **Побережець В.Я.** (*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*) 166  
**СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗБУДЖЕННІ «БІЛИМ ШУМОМ»: ОЦІНКА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**
- Ковалевський С.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*), **Кузьменко П.А.** (*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*) 169  
**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**
- Ковалевський С.В., Сидюк Д.М.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **АНАЛІЗ ЗМІН ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ МАГНІТО-РЕЗОНАНСНИХ ВПЛИВАХ НА ЇХ РОБОЧІ ПОВЕРХНІ** 174
- Ковалевський С.В., Сидюк Д.М., Ковалевська О.С.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ** 180
- Корендій В.М., Качур О.Ю., Пилип М.В., Карпин Р.Б.** (*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*) **КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА КОНСТРУЮВАННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ БРАНДСПОЙТАМИ** 183
- Корендій В.М., Парашин О.Я., Янів О.М., Киричук В.В., Вільчинський Т.Р.** (*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*) **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОСКИХ ВАЖІЛЬНИХ І ЗУБЧАСТИХ МЕХАНІЗМІВ У ПРИВОДАХ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН** 191
- Косарєв В.С., Бочковий Д.О., Солянов Д.О.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна*) **ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУМІЩЕНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ** 199
- Кравченко М.В., науковий керівник Кохан І.Р.** (*Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, м. Харків, Україна*) **ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ ВИРОБНИЦТВА АВТОМОБІЛІВ** 204
- Кривошея В.Р., Кузнєцов Ю.М.** (*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*) **РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ** 209



**ПЛАТФОРМИ З КОМБІНОВАНИМИ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНИМИ МЕТОДАМИ РУХУ**

- Лещенко К.П., Кравцова Д.Ю.** (*Україна, м. Кривий Ріг, Криворізький національний університет*) **ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ШЛЯХОМ АЗОТУВАННЯ З ПОПЕРЕДНІМ ЛАЗЕРНИМ ОПРОМІНЕННЯМ** 213
- Литвиненко В. В., Соколов М. Д., Пилипчук О. В., Мінько О. О.,** наукові керівники: д.т.н., проф. **Драгобецький В. В.,** д.т.н., проф. **Загірняк Д. М.** (*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна*) **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАХИСНИХ СТРУКТУР З НАНОМАТЕРІАЛІВ** 215
- Мокієвець Д.О.** (*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*), **Ковалевський С.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **РОЗРОБКА ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА БАЗІ ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН** 222
- Надіч П.В., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ** 226
- Николаєнко О.Ю., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ НАРІЗАННЯ КОНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС** 230
- Новіков Ф. В.** (*Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна*) **РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВИСОКОТОЧНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ** 233
- Новосельцев М.М., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ВИКОРИСТАННЯ ОПОРЯДЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС** 239
- Онищак А., Стецько А.Є.** (*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*) **ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ІНСТРУМЕНТІВ** 242
- Пелипинко О.О., Ковалевський С.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЧИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ** 250
- Пироженко А.О., Бондар О.В., Рязанцев А.О.** (*Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*) **КОНСТРУКТОРСЬКЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ В ПРИКЛАДНІЙ МЕХАНІЦІ** 255
- Письменкова Т.О., Ротт Н.О.** (*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна*) **ІНТЕРАКТИВНИЙ ВІРТУАЛЬНИЙ ДОСВІД В СФЕРІ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ЯК ОДИН ІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ** 259

- Побочій О.А., Кравцова Д.Ю.** (*Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*) **ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КАРТ ЕСКІЗІВ ЗГІДНО З ДСТУ 3.1105-2014** 266
- Полушко М.М, Шевченко В.В.** (*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".ю м. Київ, Україна*) **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ** 269
- Рак А.О.** (*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна*) **НАНОСТРУКТУРОВАНІ ПОКРИТТЯ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ТУРБОАГРЕГАТІВ** 272
- Сухой Р.А., Шуліка М.С.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) **ІНТЕЛЕКТ-КАРТИ ЯК ОСНОВА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОБРОЧЕСНОСТІ ПРИ АНАЛІЗІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ ПРИ ВИКОНАННІ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ З ДИСЦИПЛІН ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ** 275
- Товкач А.О., Козлов С.Л.** (*Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна*) **СТІЙКІСТЬ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА НА ОСНОВІ МУЛЬТИРЕЖИМНОГО РЕГУЛЯТОРА** 280
- Третяк В. В., Квятковский М. Ю., Данаєв О. В.** (*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна*) **ВИКОРИСТАННЯ СТРУКТУРНО-АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ МАРШРУТНО-ОПЕРАЦІЙНОГО ОПИСУ ДЕТАЛІ ТИПА «ВАЛ»** 287
- Фик С.В.,** (*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*) **ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОБЛАДНАННЯ** 293
- Черкашин М.О., Бондаренко А.О.** (*НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна*) **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ** 296
- Шуліка М.С.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*), **Кузьменко П.А.** (*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*) **ТЕОРІЯ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МЕХАНООБРОБКИ – РЕСУРСИ І МОЖЛИВОСТІ** 303

#### **МАН з НПП:**

- Бадюкова М.** (*ЗЗСО № 6, м. Слов'янськ, Україна*), науковий керівник: к.т.н., доц. **Кінденко М.І.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*), науковий співкерівник: **Бобрик О.С.** (*ЗЗСО № 6, м. Слов'янськ, Україна*) **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ОБРОБКИ ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ІЗ ШВИДКОРІЗУЮЧОЇ СТАЛІ В ІМПУЛЬСНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ** 307
- Бороденко П.М., Миронова А.О., Сойнікова С.Д., Черемісова Т.В.** (*ЗОШ №26, м. Краматорськ, Україна*) науковий керівник: **Бабаш А.В.** (*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна*) 314

**ВИКОРИСТАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ TEACHABLE MACHINE ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ПОДАЛЬШИМ ВИКОРИСТАННЯМ У МОБІЛЬНИХ ДОДАТКАХ**

**Думенко О.В.** науковий керівник: **Суліма В.В.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна) **СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ ПЛАВНОГО ПРОБУДЖЕННЯ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO** 321

**Мазур Є.В.** науковий керівник **Крюка С. В.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна) **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРІНГУ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO** 329

**Мирошниченко О.В.** науковий керівник **Топор К.О.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна) **СИСТЕМА МОНІТОРІНГУ ТА ВІДОБРАЖЕННЯ ПРОГНОЗУ ПОГОДИ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO** 336

**Удовиченко Д.А.,** науковий керівник **Федотова О.П.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна) **СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОЛИВУ РОСЛИН НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO** 342

**Шудро Е.А., Мельник Т.В.** науковий керівник **Скрипник С.В.** (Загально-освітня школа №3, м. Краматорськ, Україна) **РОЗРОБКА ВЕБ-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ФІЗИЧНОГО СТАНУ КОРИСТУВАЧІВ ЧЕРЕЗ ВІДЕОРЕКОМЕНДАЦІЇ РЕАБІЛІТАЦІЙНИХ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ** 348

## ВСТУПНЕ СЛОВО ВІД ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ КОНФЕРЕНЦІЇ

Шановні учасники та гості Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Молода наука — роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування»!

Від імені організаційного комітету щиро вітаємо вас на нашому науковому форумі, який відбувається 16–18 квітня 2025 року за підтримки провідних українських та зарубіжних освітніх і наукових установ. Конференція традиційно об'єднує молодих дослідників, науковців, інженерів і здобувачів освіти, створюючи простір для обміну передовими ідеями, досвідом і результатами досліджень у галузях роботизації та нанотехнологій — ключових напрямках розвитку сучасного машинобудування.

Ми глибоко переконані, що ваша активна участь сприятиме не лише професійному зростанню кожного учасника, а й розвитку міжнародної наукової співпраці, укріпленню зв'язків між науковими школами та реалізації нових міждисциплінарних проєктів. Тематика конференції охоплює актуальні питання, пов'язані з інтеграцією інтелектуальних технологій у виробничі процеси, розробкою новітніх матеріалів і технологій, а також впровадженням нанотехнологічних рішень у машинобудування.

Організаторами конференції виступають: Міністерство освіти і науки України, ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти», Національна академія наук вищої освіти України, Донбаська державна машинобудівна академія, Вінницький національний технічний університет, Apeiron University in Banja Luka (Боснія і Герцеговина), Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Хорватія), University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Normal University (Китай) та інші шановані установи.

Особливістю цього річної конференції є розширення міжнародної участі, активне залучення молоді та інтеграція освітніх ініціатив, таких як Академія дослідників штучного інтелекту, Студентське наукове товариство технологій машинобудування та Мала академія наук з науково-промислового профілю.

Збірник наукових праць конференції, що буде виданий за її підсумками, стане вагомим внеском у світову наукову спільноту і забезпечить широке розповсюдження ваших досліджень серед фахівців у різних країнах.

Від імені організаційного комітету висловлюємо подяку всім партнерам, учасникам та організаціям, які сприяли підготовці та проведенню конференції. Без вашої підтримки і зусиль цей захід не мав би такого високого наукового рівня.

Бажаємо всім учасникам плідної роботи, цікавих дискусій, натхнення для нових наукових звершень і успіхів у реалізації ваших ідей та проєктів! Нехай ця конференція стане важливою подією у вашій науковій кар'єрі й відкриє нові горизонти для подальших досягнень!

З повагою,

**Сергій Ковалевський**, Голова організаційного комітету,

**Леонід Козлов**, Співголова організаційного комітету.

## **OPENING SPEECH FROM THE ORGANIZING COMMITTEE**

Dear participants and guests of the International Youth Scientific and Technical Conference «Young Science – Robotics and Nanotechnologies of Modern Mechanical Engineering"!

On behalf of the Organizing Committee, we sincerely welcome you to our scientific forum, held from April 16 to 18, 2025, with the support of leading Ukrainian and international educational and scientific institutions. This conference traditionally brings together young researchers, scientists, engineers, and students, creating a platform for exchanging advanced ideas, experiences, and research results in the fields of robotics and nanotechnologies — the key directions in the development of modern mechanical engineering.

We are deeply convinced that your active participation will contribute not only to the professional growth of each participant but also to the development of international scientific cooperation, the strengthening of ties between research schools, and the implementation of new interdisciplinary projects. The conference topics cover pressing issues related to the integration of intelligent technologies into production processes, the development of advanced materials and technologies, and the implementation of nanotechnological solutions in mechanical engineering.

The organizers of the conference include: the Ministry of Education and Science of Ukraine, the Institute of Education Content Modernization, the National Academy of Higher Education of Ukraine, Donbas State Engineering Academy, Vinnytsia National Technical University, Apeiron University in Banja Luka (Bosnia and Herzegovina), the Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia), the University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Normal University (China), and other esteemed institutions.

A distinctive feature of this year's conference is the expanded international participation, the active involvement of young researchers, and the integration of educational initiatives such as the Academy of Artificial Intelligence Researchers, the Student Scientific Society of Manufacturing Technologies, and the Small Academy of Sciences for Scientific and Industrial Profile.

The conference proceedings, which will be published after the event, will make a significant contribution to the global scientific community and will ensure wide dissemination of your research among specialists from different countries.

On behalf of the Organizing Committee, we express our sincere gratitude to all partners, participants, and institutions who contributed to the preparation and successful conduct of the conference. Without your support and efforts, this event would not have achieved such a high scientific level.

We wish all participants fruitful work, engaging discussions, inspiration for new scientific achievements, and success in the implementation of your ideas and projects! May this conference become an important milestone in your scientific career and open new horizons for future accomplishments!

Sincerely,

**Sergiy Kovalevskyy**, Head of the Organizing Committee,  
**Leonid Kozlov**, Co-Chairman of the Organizing Committee.

**Isak Karabegović<sup>1</sup>, Ermin Husak<sup>2</sup>, Predrag Dašić<sup>3</sup>** (<sup>1</sup>*Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina;* <sup>2</sup>*University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bihać, Bosnia and Herzegovina;* <sup>3</sup>*Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia*)

## **THE USE OF BIOMATERIALS AND BIODEVICES IN ROBOTS WITH THE GOAL OF INCREASING THEIR FUNCTIONALITY**

**Abstract:** *We have witnessed in recent years that many institutes and development centers in the world that deal with the development and research of robotic technologies are working on the development and implementation of advanced biomaterials and biodevices that enable greater interaction with biological systems and provide better functionality for medical, rehabilitation and other applications. Biomaterials are increasingly used in robotics to improve the flexibility, functionality and sustainability of robotic systems. Their ability to imitate biological structures and properties enables the development of advanced robots that can better interact with the environment, adapt to different conditions and even regenerate. Their application includes medical robotics, soft robotics, biodegradable robots, humanoid robots and robots for environmental protection and industrial applications. Biomaterials play a key role in the development of advanced robotic systems, enabling greater adaptability, biological integration and sustainability. The future of biomaterials in robotics depends on further research and innovation that will enable the development of stronger, more durable and more economical materials. Despite the current challenges, biomaterials have the potential to significantly improve robotic systems and their application in medicine, industry and environmental protection. Their application in robotics not only improves the functionality of robots, but also opens up new opportunities in medicine, industry and environmental protection. With the further development of materials and technologies, an even greater role of biomaterials in the future of robotics is expected.*

**Keywords:** *innovation, robot, biomaterial, biodevices, flexibility.*

**Анотація:** *В останні роки ми стали свідками того, що багато інститутів і центрів розробки у світі, які займаються розробкою та дослідженням роботизованих технологій, працюють над розробкою та впровадженням передових біоматеріалів і біопристроїв, які забезпечують більшу взаємодію з біологічними системами та забезпечують кращу функціональність для медичних, реабілітаційних та інших застосувань. Біоматеріали все частіше використовуються в робототехніці для підвищення гнучкості, функціональності та стійкості робототехнічних систем. Їхня здатність імітувати біологічні структури та властивості дозволяє розробляти передових роботів, які можуть краще взаємодіяти з навколишнім середовищем, адаптуватися до різних умов і навіть регенерувати. Їхнє застосування включає медичну робототехніку, м'яку робототехніку, біорозкладаних роботів, гуманоїдних роботів і роботів для захисту навколишнього середовища та промислового застосування. Біоматеріали відіграють ключову роль у розробці передових роботизованих систем, забезпечуючи більшу адаптивність, біологічну інтеграцію та сталість. Майбутнє біоматеріалів у робототехніці залежить від подальших досліджень та інновацій, які дозволять розробити міцніші, довговічніші та економічніші матеріали. Незважаючи на поточні виклики, біоматеріали мають потенціал для значного вдосконалення роботизованих систем та їх застосування в медицині, промисловості та охороні навколишнього середовища. Їх застосування в робототехніці не тільки покращує*

*функціональність роботів, але й відкриває нові можливості в медицині, промисловості та охороні навколишнього середовища. З подальшим розвитком матеріалів і технологій очікується ще більша роль біоматеріалів у майбутньому робототехніки.*

**Ключові слова:** інновації, робот, біоматеріал, біопристрої, гнучкість.

## 1. INTRODUCTION

The development of robotics has seen significant progress in recent decades, and the integration of biomaterials and biodevices represents a new step forward in enhancing the functionality of robots. Traditional robots, typically made of metal, plastic and other synthetic materials, have certain limitations in terms of flexibility, adaptability and interaction with people and the environment [1-3]. By incorporating biomaterials and biodevices into the design of robotic systems, it is possible to improve their efficiency, reduce energy consumption and enhance their ability to perform complex tasks. Biomaterials are substances that can come into contact with biological systems without causing adverse reactions. They have been used in medicine for decades for implants, prostheses and tissue engineering, and are now increasingly being applied in robotics. Biodevices, on the other hand, include components such as bio-inspired sensors, artificial muscles, and neural interfaces, which provide robots with greater sensitivity, adaptability, and autonomy. The integration of these elements enables the development of humanoid robots, biologically inspired mechanisms and advanced industrial automatons capable of performing tasks more accurately and safely in dynamic environments. One of the key advantages of using biomaterials in robotics is their increased flexibility and biocompatibility [4-6]. For example, polymers such as hydrogels and elastomers can mimic the mechanical properties of human skin and muscles, enabling the development of robotic arms and prostheses that are more sensitive and better adapted to human touch. Additionally, the use of bioactive materials can enhance the interaction between robots and living tissues, opens up new possibilities in rehabilitation robotics and medical prosthetics. In addition, biodevices play a key role in enhancing the sensory capabilities of robots. Bio-inspired sensors, based on biological principles such as the sight, touch and hearing, allow robots to perceive their environment with greater precision. For instance, electronic skin with integrated pressure sensors can allow robots to sense touch and adjust grip strength accordingly, while neural interfaces enable direct communication between robotic systems and the human brain.

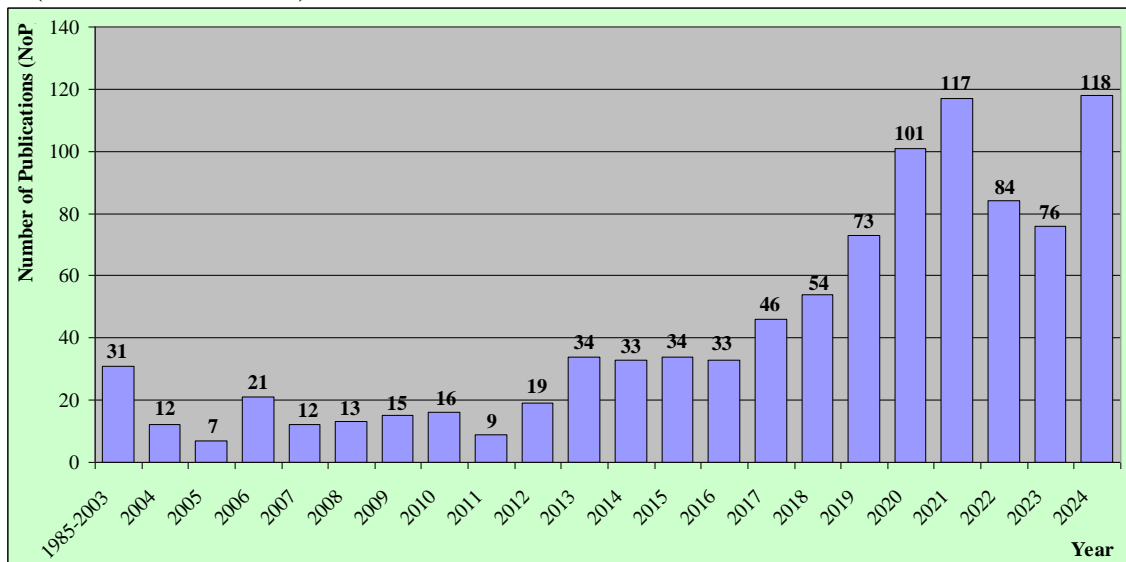
The integration of biomaterials and biodevices into robotic systems is widely used across various industries [7-9]. In medicine, robotic prostheses made from biocompatible materials and neural interfaces can significantly improve the quality of life for amputees. In industry, flexible robots with bio-inspired actuators can perform tasks that require precision and adaptability more efficiently. Additionally, in research and rescue operations, robots designed with biological inspiration can navigate hard-to-reach terrains and operate in extreme conditions with greater ease. Despite these numerous advantages, challenges remain in applying biomaterials and biodevices in robotics. Their durability, cost-

effectiveness and sustainability are still the subject of ongoing research and further improvements are necessary to ensure long-term operation of robotic systems without compromising functionality. Moreover, ethical and safety concerns regarding the use of bio-inspired technologies must be carefully addressed, especially when robots interact with humans [10-12]. This paper will analyze the role of biomaterials and biodevices in enhancing the functionality of robots, with the focus on their technical, applied and ethical aspects. The goal is to explore how innovations in this field can contribute to the development of intelligent and adaptive robotic systems that will improve various areas of human activity.

## 2. CHALLENGES IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF BIOMATERIALS AND BIO DEVICES IN ROBOTICS

Biomaterials and biodevices used in robotics are often employed to enable robots to perform tasks that require interaction with the human body, detection of biological signals, or even the simulation of biological functions. Biomaterials are natural or synthetic materials designed to mimic or complement the biological properties of living organisms [13-15].

The application of biomaterials and biodevices in robotics is a very interesting area from the perspective of publications. On Figure 1 shows the number of publications (NoP) for the phrase "biomaterials OR biodevices AND robot OR robotics" in the Scopus citation database for the period from 1985 to 2024. The total number of publications (NoP) for the aforementioned phrase is 958 (as of 31-12-2024).

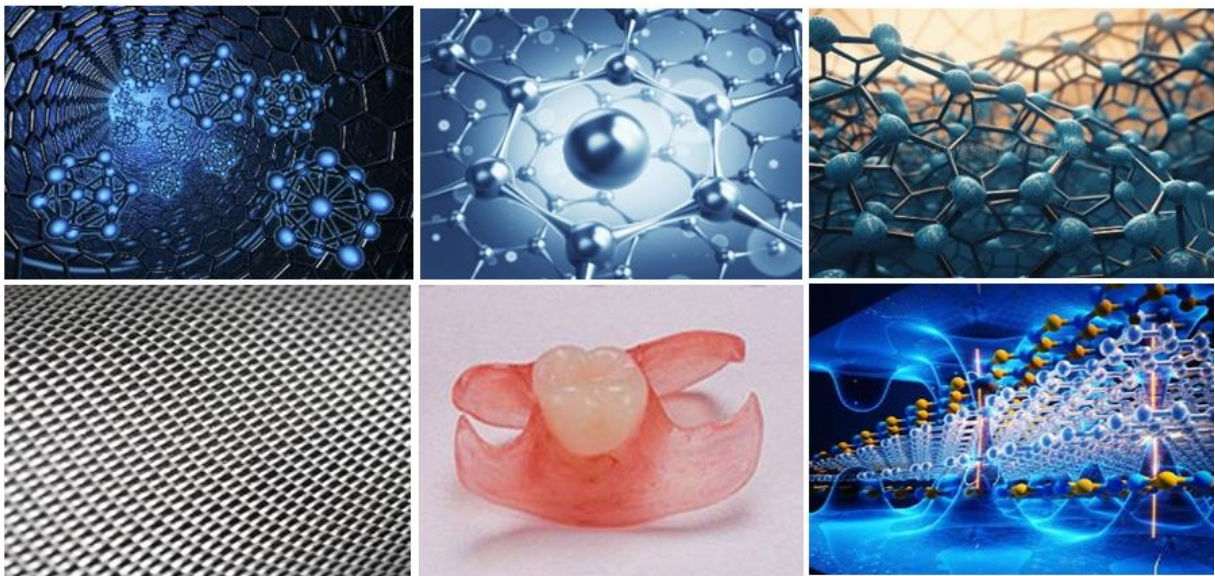


**Figure 1.** Number of Publications (NoP) for the phrase "biomaterials OR biodevices AND robot OR robotics" in the Scopus for the period from 1985 to 2024

Biomaterials are used in various fields, including medicine, biotechnology and robotics, where they facilitate the development of flexible, biocompatible and intelligent systems. Here are just a few examples of the biomaterials used in robotics (Figure 2):



- **Smart materials** are those materials that can change their properties in response to external stimuli, such as temperature, light or electricity. In robotics, they are used to create actuator systems, such as mechanical arms that mimic human movements or sensors that recognize biological signals. This includes piezo-sensitive materials, which are used in sensors to detect pressure or vibrations, and are applied in robotics for motion tracking or force detection. Additionally, electroactive polymers, which can change shape when an electric voltage is applied, are used in mechanical systems of robots (e.g., for the "muscles" of robots).
- **Gels and liquids with variable properties** such as hydrogels, which can be used in biomedical devices and robotics, enable robots to change shape or size in response to environmental changes. These materials may be useful for robots working in biomedical or microsurgical applications.
- **Biopolymers**, which include biodegradable materials, are used to make robot parts that are environmentally friendly. For example, bioplastics or natural polymers, such as chitin, can be used to make lightweight robot parts.
- **Biocompatible materials** are used in biomedical robots that come into direct contact with the human body (e.g., robots for surgical interventions). These materials include titanium, silicone, and special polymer materials that do not cause rejection by the organism.



**Figure 2.** Examples of biomaterials used in robotics [16-20]

In robotics, biomaterials are used to enhance robots' ability to interact with the environment, provide greater flexibility and the possibility of regeneration, there by expanding their potential applicatiосn in medicine, industry and ecological systems. The use of biomaterials in robotics is based on their unique properties that make them adaptable for various applications. Some of the most important properties are [21-23]:

- **Biocompatibility** - biomaterials do not cause harmful reactions when in contact with biological tissues, making them ideal for medical robotics and prosthetic

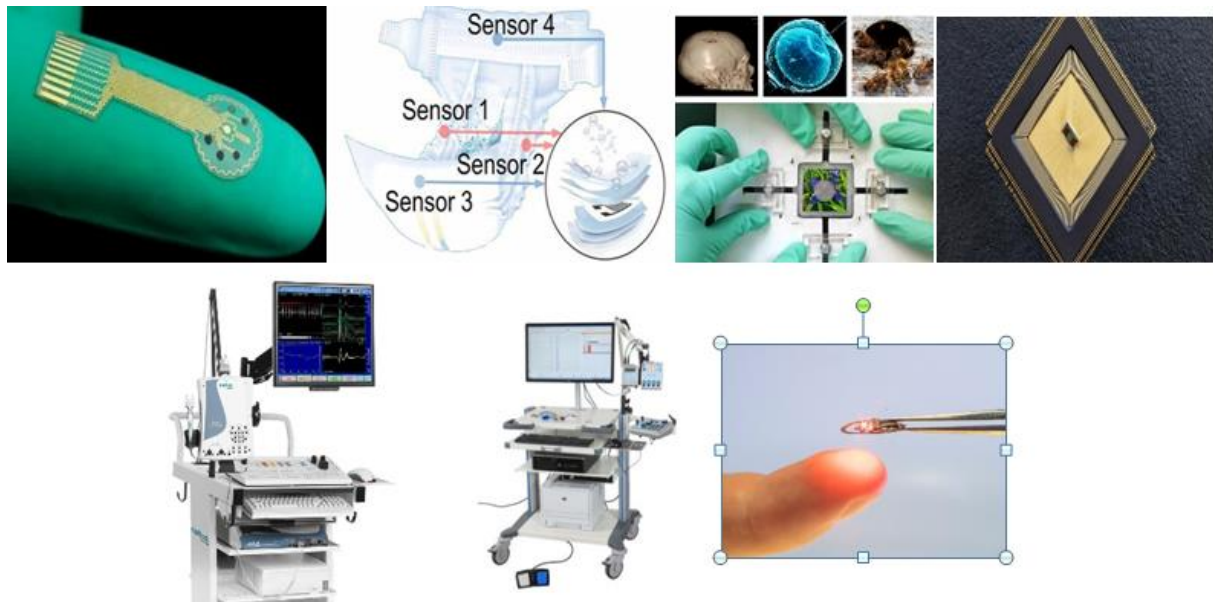
devices. Examples of applications include robotic prostheses, implants and mechanical exoskeletons.

- **Flexibility and elasticity** - in contrast to conventional rigid materials, biomaterials enable robots to exhibit softer and more natural movements. Examples of applications include soft robotics, robotic sensors and actuators.
- **Self-regeneration** - some biomaterials have the ability to self-repair after damage, which extends the robot's lifespan and reduces the need for repairs. Examples of applications include robots designed for extreme conditions, medical devices intended for long-term use.
- **Biodegradability** - ecologically acceptable biomaterials can decompose in nature without causing harmful consequences for the environment. Examples of applications include disposable robots for ecological missions, implantable medical robots.
- **Sensitivity to stimuli** - some biomaterials can change their properties in response to external factors such as temperature, light or electrical signals. Examples of applications include robotic skin, adaptive robotic sensors.
- **Light mass and energy efficiency** - biomaterials are often lighter than metals and plastics, enabling robots to have lower energy consumption and greater mobility. Examples of applications include unmanned flying robots, medical microrobots.

Below, we will list some of the key biodevices used in robotic technology [24-26]:

- **Biosensors** - these devices can detect biological signals, such as changes in glucose levels, pH values, or blood pressure. In robotics, biosensors are used to monitor patients' condition or to perform complex tasks, such as diagnostics.
- **Neurorobotics** - in robotic systems that use neural signals for control, such as devices that allow people with spinal cord injuries to control prosthetic devices, biodevices such as electroencephalographic (EEG) devices or devices that measure electrical impulses from muscles can help control robot movements.
- **Electromyography (EMG) devices** - these devices detect electrical impulses that occur when muscles contract. In robotics, EMG devices allow robotic systems to respond to user intentions or to support prosthetic devices.
- **Optogenetic devices** - in biomedical robotics, optogenetics uses light pulses to control cells in the body. This may enable the development of robots that use light signals to stimulate nerve tissue or muscles.

On Figure 3 shows several examples of biosensors, neurorobotic devices, electromyographic devices and optogenetic devices [27-30].



**Figure 3.** Examples of biosensors, neurorobotic devices, electromyographic devices and optogenetic devices [27-30]

Challenges in the development and application of biomaterials in robotics involve technical, economic and research-related challenges. Let's list some of the challenges:

- **Development of new biomaterials** - many researchers are working on improving the mechanical properties of biomaterials, because there is a need for stronger and more resistant materials that will last longer. Additionally, hybrid materials (i.e., a combination of biomaterials with conventional materials) can improve the performance of the robot themselves.
- **Technological limitations** - the first technological limitation is the complexity of production. Technologies like 3D printing and nanotechnology need to achieve high precision in the production of robotic parts from biomaterials. The second technological limitation is the lack of precise testing methods because, as more accurate testing of biomaterials is necessary to ensure their long-term effectiveness.
- **Safety and ethical issues** – for example, regulatory challenges arise because medical robots made of biomaterials must pass strict safety tests before they can be approved for clinical use. Additionally, the use of biological materials in robotics raises questions about sustainability and the possible use of human or animal tissues.
- **Economics and market application** - the industry is still adapting to new biomaterials, which slows down their mass production and widespread use. Significant investments in research and development are also needed to make biomaterials more accessible and cost-effective.

Robotics utilize advanced biomaterials and biodevices that enable greater interaction with biological systems, providing enhanced functionality for medical, rehabilitation and other applications. The development of these technologies is progressing rapidly, particularly in the fields of biomedical devices, neural

interfaces, and mechanical systems that mimic human functions. The use of biomaterials in robotics offers numerous advantages, including improved interaction of robots with people and the environment, as well as reduced waste and increased functionality. However, there are also certain disadvantages, such as high cost, limited durability and technical challenges. The future of biomaterials in robotics relies on further research and innovation, which will enable the development of stronger, more durable and more cost-effective materials. Despite current challenges, biomaterials have the potential to significantly enhance robotic systems and their application in medicine, industry and environmental protection.

### **3. FLEXIBILITY OF BIOMATERIALS AND BIODEVICES IN ROBOTICS**

The development of robotics is increasingly dependent on the use of biomaterials and biodevices to enhance the functionality, interaction and adaptability of robots in various environments. Biomaterials, such as electroactive polymers and piezo-sensitive materials, enable robots to respond to environmental changes or stimuli, such as electrical pulses or temperature variations. These materials can change their properties, allowing robots to become more flexible and adaptive. The use of biologically inspired materials and devices facilitates the creation of robots with improved flexibility, sensitivity and efficiency in performing complex tasks. This technology is widely used in medicine, industry, agriculture and humanoid robotics. Biomaterials are used in robotics to enhance the flexibility, durability and adaptability of robots in diverse scenarios. For example, robots with "muscles" made of electroactive polymers can imitate human movements with a high degree of precision [31-33].

The primary characteristics of biomaterials in robotic technology include *biomechanical flexibility*, which allows the material to bend and deform while maintaining functionality; *biocompatibility*, which enables the material to adapt to human or animal tissue, especially in medical robots; *self-regeneration*, which allows the material to repair itself after damage; and *sensitivity to external factors*, such as temperature, pressure, and humidity, enabling the material to adapt to different environmental conditions.

Taking into account the main characteristics of biomaterials, some typical examples of their application include [34,35]:

- **Soft robots** - where elastic polymers and hydrogels are used, allowing robots to move similarly to biological organisms. This is useful in medical and industrial applications;
- **Prosthetics and exoskeletons** - biomaterials are used to create advanced prosthetic limbs that mimics the functionality of human limbs and
- **Biodegradable robots** – robots made of biocompatible materials can be used in medicine without the need for surgical removal after completing their task.

Biodevices, similar to biomaterials, are essential in robotics for incorporating biological or bio-inspired functions to improve a robot's

performance. These devices enable robots to better interact with their environment, increase their autonomy, and improve human interaction. Key features of biodevices in robotics include neural connectivity for enhanced learning, biosensors for detecting environmental changes, bioactuators for smooth movements, and biological energy sources like bio-batteries to power the robot. Taking into account the main characteristics of biodevices, they find applications in robotics. Here are typical examples of their use [7,36]:

- **Medical robots** – the use of biosensors and neural interfaces allows for precise surgical interventions and neurorehabilitation;
- **Industrial robotics** - biodevices enhance the adaptability of robots in production processes through advanced sensor systems;
- **Humanoid robots** - neural networks and biologically inspired sensors enable more realistic movements and improved interaction better with humans and
- **Ecological robots** – bio-driven and biodegradable sensors allow robots to operate in natural environments without negatively impacting the ecosystem.

The flexibility and adaptability of biomaterials and biodevices enable robots to exhibit advanced functionality and better interaction with their environment. These materials and devices not only enhance robot performance of but also facilitate their integration into various spheres of society, from medicine and industry to ecology and humanoid robotics. Continued development of these technologies holds the potential for even more sophisticated, efficient and environmentally friendly robotic systems.

#### **4. IMPLEMENTATION OF BIOMATERIALS AND BIODEVICES IN ROBOTICS**

As mentioned earlier, biomaterials and biodevices are increasingly used in robotics in order to improve the flexibility, functionality and sustainability of robotic systems. Their ability to mimic biological structures and properties enables the development of advanced robots that can interact more effectively with the environment, adapt to various conditions and even regenerate. Their applications include medical robotics, soft robotics, biodegradable robots, humanoid robots and robots for environmental protection and industrial applications (Figure 4).

##### **❖ *Implementation in medical robotics and prosthetics***

Biomaterials play a key role in medical robotics by enabling safe contact between the robot and the human body. In this field, they are used for the production of robotic prostheses, implants, surgical robots and rehabilitation devices [7,12,23].

- *Robotic prostheses and exoskeletons:*
  - Biocompatible materials such as titanium, silicone and biopolymers are used to create robotic prostheses that mimic the function of human limbs.
  - Advanced materials with sensory sensors enable tactile sensation, improving control over the prostheses.

- Exoskeletons made of lightweight and flexible biomaterials are used in the rehabilitation of patients with neurological and orthopedic impairments.
- *Surgical robots:*
  - Surgical robots (e.g., the da Vinci robotic system) use biocompatible materials to create precision surgical instruments.
  - Microsurgical robots made from biomaterials enable minimally invasive procedures inside the body.
- *Biodegradable implantable robots:*
  - In development are biodegradable robots made of materials that naturally decompose within the body after a certain period, eliminating the need for additional surgical procedures.

#### ❖ *Implementation in Soft Robotics*

Soft robotics uses flexible, elastic and biocompatible materials, allowing robots to have more natural movements and safer interaction with people and the environment.

- *Robotic actuators and sensors:*
  - Hydrogels and elastomers enable the creation of flexible robots that can change shape and adapt to different surfaces.
  - Biomaterials with shape memory allow robots to respond to external stimuli, such as heat or moisture.
- *Robot skin:*
  - Biologically inspired materials are used to create robotic skin that can detect touch, temperature and pressure.
  - Robotic skin made from graphene and polymer biomaterials enables tactile perception similar to humans.
- *Soft medical robots:*
  - Made of biocompatible elastomers can be used to perform endoscopic and laparoscopically assisted surgeries.



**Figure 4.** Examples of implementation of biomaterials and biodevices in robotics [38-44]

### ❖ **Implementation in biodegradable robots and ecological applications**

Environmentally friendly robots made of biodegradable biomaterials and biodevices are becoming increasingly popular in environmental protection and ecosystem research.

- *Biodegradable robots for cleaning the environment:*
  - Robots made of biodegradable polymers are used to collect waste from the ocean or soil.
  - After the task is completed, these robots decompose, thus eliminating electronic waste.
- *Robotic devices for ecosystem monitoring:*
  - Biomaterial sensors enable robots to collect data on water, air and soil quality without endangering the environment.

### ❖ **Implementation in humanoid robots**

The development of humanoid robots increasingly relies on biomaterials and biodevices to make their structure and functionality more human-like.

- *Advanced biological mimicry:*
  - Silicone and hydrogel skin provide a realistic appearance and tactile sensitivity.
  - Biomimetic muscles and joints made of polymers that respond to electrical impulses allow robots to move more realistically.
- *Neural interfaces and artificial nervous systems:*
  - Biomaterials used to develop artificial neurons and synapses enable humanoid robots to interact more effectively with humans.

### ❖ **Implementation in industrial robotics**

Likewise, in recent years, industrial robots have increasingly been using biomaterials and biodevices to improve safety and efficiency in production processes.

- *Safer robots in production lines:*
  - Soft robots made of elastic biomaterials reduce the risk of injury to industrial workers.
- *Biomaterials in automation:*
  - Self-adjusting graspers made from biomaterials are used for handling sensitive objects, such as in the food industry.

Biomaterials and biodevices are increasingly being used in robotics, enabling the development of flexible, environmentally friendly and intelligent robotic systems. From medical devices and humanoid robots to environmental solutions and industrial automation, their presence is changing the way robots function and interact with people and the environment. The further development of biomaterials will open new possibilities for even more sophisticated robotic systems in the future.

## **5. CONCLUSION**

The use of biomaterials and biodevices in the development of robots represents a revolutionary step forward in modern robotics, opening up new possibilities for improving functionality, adaptability and interaction with the environment. These advanced materials and systems not only provide robots with greater efficiency and durability, but enable them to adapt to various conditions, much like living organisms. Biomaterials, used to construct robotic structures, make it possible to create soft robots with flexibility and mobility inspired by

natural organisms. These materials reduce the risk of damage, increase the robot's durability, and allow for safer interaction with humans. Furthermore, biomaterials can be used to create adaptive components that respond to environmental changes, thereby enhancing autonomy and efficiency of robots. Biodevices, on the other hand, play a key role in integrating biological and technological components within robotic systems.

The application of biosensors, artificial muscles and neural interfaces significantly improves the performance of robots, enabling them to respond to external stimuli and make complex decisions based on environmental data. Such systems allow humanoid and medical robots to perform precise tasks such as diagnostics, rehabilitation and assistance for people with disabilities. In addition, biomaterials and biodevices contribute to the development of sustainable solutions in robotics, reducing the ecological footprint of the production and use of robots. Biodegradable materials and biohybrid systems help minimize negative environmental impact and pave the way for more eco-friendly technologies. This combination of natural and artificial systems contributes to the construction of more efficient, intelligent and durable robotic platforms. The application of biomaterials and biodevices in robotics is already present in various fields, including medicine, industry, agriculture and space exploration. In medical robotics, artificial muscles and biocompatible materials support the development of prostheses and exoskeletons that enhance the quality of life for individuals with disabilities. In industrial robotics, the use of flexible biomaterials can reduce maintenance costs and increase worker safety. Additionally, in space exploration, biologically inspired robotic systems can enhance survivability in extreme conditions.

Despite all the advantages, there are challenges in the implementation of biomaterials and biodevices in robotics. Research and development costs remain high, and the long-term durability and reliability of these materials and systems are still under investigation. Additionally, ethical and safety concerns related to the integration of living cells or tissues into robotic systems require careful regulation and oversight. In conclusion, we can conclude that biomaterials and biodevices have the potential to transform robotics, by enabling the development of more intelligent, flexible and environmentally friendly robotic systems. Continued research and technological advancement are essential for the further development of this interdisciplinary field, which brings together biology, engineering and artificial intelligence. With proper management of the associated challenges, these innovative materials and systems could significantly improve various aspects of our life and work, contributing to the development of advanced robotic solutions of the future.

## REFERENCES

- [1] Karabegović, I.: Chapter 2: Implementation and distribution of service robots. In: *Service Robots: Advances in Research and Applications*. New York (New York – USA): Nova Science Publishers Inc., 2021, pp. 13–29. ISBN 978-1-53619-573-6.
- [2] Raković, D. & Uskoković, D. (editors): *Biomaterials* (in Serbian). Belgrade (Serbia): Institute of Technical Sciences of the Serbian Academy of Sciences and Arts (ITN-SANU), 2010. – 868 pp. ISBN 978-86-80321-23-3.
- [3] Tiwari, A. & Nordin, N.A. (editors): *Advanced biomaterials and biodevices*. Beverly (Massachusetts – USA): Scrivener Publishing LLC, 2014. – 576 pp. ISBN 978-1-118-77363-5. <https://doi.org/10.1002/9781118774052>.



- [4] Todros, S.; Todesco, M. & Bagno, A.: Biomaterials and their biomedical applications: From replacement to regeneration. *Processes*, Vol. 9, Issue 11 (November 2021), Article no. 1949: pp. 1–20. eISSN 2227-9717. <https://doi.org/10.3390/pr9111949>.
- [5] Tathe, A.; Ghodke, M. & Nikalje, A.P.: A brief review: Biomaterials and their application. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, Vol. 2, Suppl. Issue 4 (2010), pp. 19–23. ISSN 0975-1491.
- [6] Bianchi, M. & Carnevale, G.: Editorial: Micro- and nanostructured biomaterials for biomedical applications and regenerative medicine. *Nanomaterials*, Vol. 14, Issue 22 (November 2024), Article no. 1845: pp. 1–5. eISSN 2079-4991. <https://doi.org/10.3390/nano14221845>.
- [7] Karabegović, I.; Banjanović-Mehmedović, L.; Husak, E. & Omerčić, M.: Chapter 10 – Trend of implementing service robots in medical institutions during the COVID-19 pandemic: A review. In: *Medical and Healthcare Robotics: New Paradigms and Recent Advances*. San Diego (California – USA): Academic Press & Elsevier Inc., 2023, pp. 237–262. ISBN 978-0-44318-460-4. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18460-4.00001-9>.
- [8] Rubežić, M.Z.; Krstić, A.B.; Stanković, H.Z.; Ljupković, R.B.; Randelović, M.S. & Zarubica, A.R.: Different types of biomaterials: Structure and application: A short review. *Advanced Technologies*, Vol. 9, Issue 1 (June 2020), pp. 69–79. ISSN 2406-2979. <http://dx.doi.org/10.5937/savteh2001069R>.
- [9] Tokareva, O.; Jacobsen, M.; Buehler, M.; Wong, J. & Kaplan, D.: Structure-function-property-design interplay in biopolymers: Spider silk. *Acta Biomaterialia*, Vol. 10, Issue 4 (April 2014), pp. 1612–1626. ISSN 1742-7061. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.08.020>.
- [10] Niinomi, M.: Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions, A*, Vol. 33, Issue 3 (March 2002), pp.477–486. ISSN 1073-5623. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0109-2>.
- [11] Niinomi, M.; Liu, Y.; Nakai, M.; Liu, H.-H. & Li, H.: Biomedical titanium alloys with Young's moduli close to that of cortical bone. *Regenerative Biomaterials*, Vol. 3, Issue 3 (September 2016), pp. 173–185. ISSN 2056-3418. <https://doi.org/10.1093/rb/rbw016>.
- [12] Karabegović I.: Chapter 9: Distribution and implementation of service robotic systems in medicine. In: *Service Robots: Advances in Research and Applications*. New York (New York – USA): Nova Science Publishers Inc., 2021, pp. 165–204. ISBN 978-1-53619-573-6.
- [13] Banjanovic-Mehmedovic, L.; Karabegović, I.; Jahic, J. & Omercic, M.: Optimal path planning of a disinfection mobile robot against COVID-19 in a ROS-based research platform. *Journal Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 16, Issue 4 (December 2021), pp. 405–417. ISSN 1854-6250. <https://doi.org/10.14743/apem2021.4.409>.
- [14] Rezaie, H.R.; Bakhtiari, L. & Öchsner, A.: Application of biomaterials. In: *Springer Briefs in Materials: Biomaterials and Their Applications*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG, 2015, pp. 19–24. ISSN 2192-1091 and ISBN 978-3-319-17845-5. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17846-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17846-2_2).
- [15] Nasab, M.B. & Hassan, M.R.: Metallic biomaterials of knee and hip – A review. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, Vol. 24, Issue 2 (2010), pp. 69–82. ISSN 0971-1198.
- [16] When Nanotech Meets Water! By Rianna Kalra, 16 May 2021. Available on the Web page: <https://riannakalra.medium.com/when-nanotech-meets-water-c56b725164db>. [Accessed: 12 February 2025].
- [17] Molecular structure design. [https://www.freepik.com/premium-ai-image/molecular-structure-design\\_60638660.htm](https://www.freepik.com/premium-ai-image/molecular-structure-design_60638660.htm). [Accessed: 24 February 2025].

- [18] Material Applications in Dentistry. MSE-536, 13 January 2014. Available on the Web page: <https://www.slideserve.com/gillian/material-applications-in-dentistry>. [Accessed: 24 February 2025].
- [19] Descoberta sobre o grafeno pode fornecer memória super-rápida para computadores. By Por Daniele Cavalcante, 10 February 2021. Available on the Web page: <https://canaltech.com.br/ciencia/descoberta-sobre-o-grafeno-pode-fornecer-memoria-super-rapida-para-computadores-178748/>. [Accessed: 26 February 2025].
- [20] Fayomi, O.S.I.; Adedeji, A.A.; Agboola, O.; Ajala, M.O.; Bolu, C.A.; Banjo, S.O. & Udoeye, N.E.: Role of biomaterials in automation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 665 (March 2021), Article no. 012022: pp. 1–5. ISSN 1755-1307. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/665/1/012022>.
- [21] Altman, G.H.; Diaz, F.; Jakuba, C.; Calabro, T.; Horan, R.L.; Chen, J.-S.; Lu, H.; Richmond, J. & Kaplam, D.L.: Silk-based biomaterials. *Biomaterials*, Vol. 24, Issue 3 (February 2003), pp. 401–416. ISSN 0142-9612. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00353-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00353-8).
- [22] Kapoor, S. & Kundu, S.C.: Silk protein-based hydrogels: Promising advanced materials for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, Vol. 31 (February 2016), pp. 17–32. ISSN 1742-7061. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.11.034>.
- [23] Karabegović, I. & Doleček, V.: Chapter 16: Mobile robotics. In: *Detecting and Mitigating Robotic Cyber Security Risks*. Hershey (Pennsylvania – USA): IGI Global, 2017, pp. 232–261. ISBN 978-1-5225-2154-9. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2154-9.ch016>.
- [24] Karabegović, I. & Doleček, V.: The role of service robots and robotic systems in the treatment of patients in medical institutions. *Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)*, Vol. 3 (2017) (*Proceedings of the International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies (IAT-2016)*); Neum, Bosnia and Herzegovina; 26-29 May 2016), pp. 9-25. ISSN 2367-3370 and ISBN 978-3-319-47294-2. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47295-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47295-9_2).
- [25] Vasilevich, A. & De Boer, J.: Robot-scientists will lead tomorrow’s biomaterials discovery. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, Vol. 6 (June 2018), pp. 74–80. eISSN 2468-4511. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2018.03.005>.
- [26] Han, S.-Y. & Wu, J.; Artificial intelligence (AI) meets biomaterials and biomedicine. *Smart Materials in Medicine*, Vol. 5, Issue 2 (June 2024), pp. 251–255. ISSN 2590-1834. <https://doi.org/10.1016/j.smaim.2024.03.001>.
- [27] Un ”bandaj inteligent” cu biosenzori ar putea ajuta la vindecarea rănilor cronice | Cine îl poate folosi. By Claudia Popovici, 25 March 2023. Available on the Web page: <https://www.antena3.ro/externe/un-bandaj-inteligent-cu-biosenzori-ar-putea-ajuta-la-vindecarea-ranilor-cronice-cine-il-poate-folosi-669615.html>. [Accessed: 10 March 2025].
- [28] Sviranje klavira jača moć obrade podataka i smanjuje depresiju, stres i anksioznost. By Mladen Smrekar, 11 February 2023. Available on the Web page: <https://www.bug.hr/istrazivanje/sviranje-klavira-jaca-moc-obrade-podataka-i-smanjuje-depresiju-stres-i-31666>. [Accessed: 12 March 2025].
- [29] Trutrace EMG. NILEMED UAE. Available on the Web page: <https://nilemed-uae.com/product/trutrace-emg-2/>. [Accessed: 12 March 2025].
- [30] Transcranial optogenetic device (IMAGE). University of Arizona College of Engineering. Available on the Web page: <https://www.eurekaalert.org/multimedia/957777>. [Accessed: 18 March 2025].
- [31] Ambrogi, V.; Fardella, G.; Grandolini, G.; Nocchetti, M. & Perioli, L.: Effect of hydroxycalcite-like compounds on the aqueous solubility of some poorly water-soluble drugs. *Journal of the Pharmaceutical Science*, Vol. 92, Issue 7 (July 2009), pp. 285–291. ISSN 0022-3549. <https://doi.org/10.1002/jps.10411>.

- [32] Kamachimudali, U.; Sridhar, T.M. & Raj, B.: Corrosion of bio implants. *Sadhana*, Vol. 28, Issue 3-4 (June 2003), pp. 601–637. ISSN 0256-2499. <https://doi.org/10.1007/BF02706450>.
- [33] Albrektsson, T.; Brånemark, P.-I.; Hansson, H.-A. & Lindström, J.: Osseointegrated titanium implants: Requirements for ensuring a long-lasting, direct bone-to-implant anchorage in man. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, Vol. 52, Issue 2 (March 1981), pp. 155–170. ISBN 0001-6470. <http://dx.doi.org/110.3109/17453678108991776>.
- [34] Karabegović, I.; Banjanović-Mehmedović, L. & Husak, E.: Using service robots as the base technology of Industry 4.0 for global management of the Covid-19 pandemic. *IFMBE Proceedings (IFMBE)*, Vol. 94 (2024) (*Proceedings of the MEDICON'23 & CMBEBIH'23*, Vol. 1: *Imaging, Engineering and Artificial Intelligence in Healthcare*; Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; 14-16 September 2023), pp. 479–492. ISSN 1680-0737 and ISBN 978-3-031-49067-5. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-49068-2\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49068-2_50).
- [35] Karabegović, I. & Karabegović, E.: Chapter 7: Smart sensors: Support for the implementation of Industry 4.0 in production processes. In: *Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing*. Hershey (Pennsylvania – USA): IGI Global, 2020, pp. 147–163. ISBN 978-1-7998-2725-2. doi: [10.4018/978-1-7998-2725-2.ch007](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2725-2.ch007).
- [36] Zafar, M.S. & Al-Samadani, K.H.: Potential use of natural silk for bio-dental applications, *Journal of Taibah University Medical Science*, Vol. 9, Issue 3 (September 2014), pp. 171–177. ISSN 1658-3612. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2014.01.003>.
- [37] Ebrahimi, M.: Biomaterials application in therapeutic and regenerative medicine from the perspective of patients' faith. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research (BJSTR)*, Vol. 8, Issue 5 (September 2018), pp. 6722–6724. ISSN 2574-1241. <http://dx.doi.org/10.26717/BJSTR.2018.08.001707>.
- [38] Robotic Hand Exoskeleton 3D Printed. By Youbionic. Available on the Web page: <https://www.youbionic.com/store/p/hand-exohand-files>. [Accessed: 20 March 2025].
- [39] New Prosthetic Exoskeletons Allow Paralysed People To Walk Again. By Uber Geek, 13 May 2014. Available on the Web page: <https://wonderfulengineering.com/new-prosthetic-exoskeletons-allow-paralysed-people-to-walk-again/>. [Accessed: 24 March 2025].
- [40] 4 Tech Advancements That Promise Great News For Healthcare In 2017. By Corona Todays, 2017. Available on the Web page: <https://jethrojeff.com/>. [Accessed: 24 March 2025].
- [41] Haptikos, de Nokia: Teclados virtuales, sensaciones reales. From 07 November 2007. Available on the Web page: <https://www.neoteo.com/haptikos-de-nokia-teclados-virtuales-sensaciones>. [Accessed: 27 March 2025].
- [42] Albustanji, R.N.; Elmanaseer, S. & Alkhatib, A.A.A.: Robotics: Five senses plus one – An overview. *Robotics*, Vol. 12, Issue 3 (June 2023), Article no. 68: pp. 1–23. eISSN 2218-6581. <https://doi.org/10.3390/robotics12030068>.
- [43] Coyle, S.; Majidi, C.; LeDuc, P. & Hsia, K.J.: Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation and design. *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 22 (July 2018), pp. 51–59. eISSN 2352-4316. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2018.05.003>.
- [44] Helinska, S.: Biomaterial-based soft robotics: Sustainable alternatives to vinyl and silicone for prototyping haptic interfaces. In: *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI'25)*; Bordeaux/Talence, France; 4-7 March 2025. New York (New York – USA): Association for Computing Machinery (ACM), 2025, Article no. 119, pp. 1–4. ISBN 979-8-4007-1197-8. <https://doi.org/10.1145/3689050.3707699>.

**Kandume J.<sup>1</sup>, Shkvar Ye.<sup>1,2</sup>** (<sup>1</sup>College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, China, <sup>2</sup>Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine)

## **PIV-MEASUREMENTS IN THE NEAR-WAKE OF THE OSCILLATING WING SECTION**

**Анотація:** Досліджується динаміка обтікання коливальної секції крила NACA 0012 із горбиками на передній кромці під час обертального руху вгору та вниз на кут  $14.5^\circ$ . Такий рух є актуальним у різних застосуваннях в авіації, морській інженерії та відновлюваній енергетиці. Використовуючи вимірювання швидкості зображень частинок (PIV), було проаналізовано поля швидкості та вихрові структури турбулентного потоку в області ближнього сліду. Результати PIV досліджень дають змогу оптимізувати конструкцію, яка покращує підйомну силу та зменшує опір, зрештою підвищуючи ефективність у різноманітних інженерних додатках.

**Ключові слова:** динаміка обтікання, коливальна секція крила, профіль NACA 0012, горбики на передній кромці, обертальний рух, PIV-метод, турбулентний потік, вихрові структури, оптимізація конструкції, підйомна сила, аеродинамічний опір, авіація, морська інженерія, відновлювана енергетика

**Abstract:** This article explores the fluid dynamics of oscillating NACA 0012 wing sections with tubercles on its leading edge during rotational movement up and down at an angle of  $14.5^\circ$ . This kind of movement is relevant in various applications in the in aviation, marine engineering, and renewable energy. Utilizing Particle Image Velocimetry (PIV), the velocity fields and turbulent flow patterns in the near-wake region have been recognized and analyzed. Insights from PIV studies inform design optimizations that enhance lift and reduce drag, ultimately advancing efficiency in various engineering applications.

**Keywords:** flow dynamics, oscillating wing section, NACA 0012 airfoil, leading-edge bumps, rotational motion, PIV method, turbulent flow, vortex structures, design optimization, lift force, aerodynamic drag, aviation, marine engineering, renewable energy

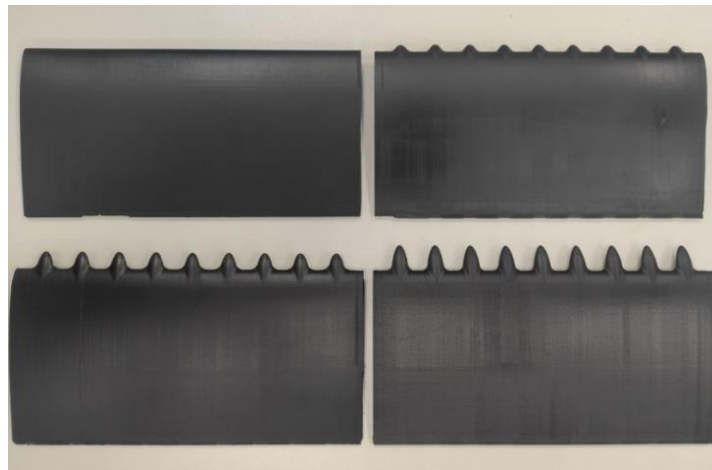
### **1. INTRODUCTION**

The study of fluid dynamics around oscillating wing sections is a critical area of research in aerodynamics, with significant implications for various fields, including aviation, marine engineering, and renewable energy technologies [1, 2]. Oscillating wings, whether in the form of flapping bird wings or the blades of wind turbines, exhibit unique flow characteristics that can be harnessed to enhance lift, reduce drag, and improve overall performance. Understanding the intricate flow patterns that arise during oscillation is essential for optimizing these designs and achieving better efficiency. Other study reveals no distinct boundary layer separation in mean velocity fields [3], while some experimental investigation of the turbulent structure of an oscillating airfoil's wake revealed variations in turbulent velocity profiles, despite constant angles of attack. The wake's turbulent structures vary in different parts, and a significant increase in turbulence intensities after a high angle of attack is believed to be due to separation or dynamic stall [4].

Particle Image Velocimetry (PIV) has emerged as a revolutionary non-intrusive optical technique that allows researchers to capture and analyze velocity fields in fluid flows. By illuminating a flow field with a laser and capturing images of the resulting particle motion, PIV provides a detailed visualization of the velocity vectors and flow structures, particularly in the complex near-wake region of oscillating wings. This region is characterized by turbulent flow patterns and vortex shedding, which are critical to understanding the aerodynamic performance of the wing. The dynamics of near-wake turbulent flow are complex and influenced by various factors, including the frequency and amplitude of oscillation, the angle of attack, and the Reynolds number.

## 1. EXPERIMENTAL SET-UP

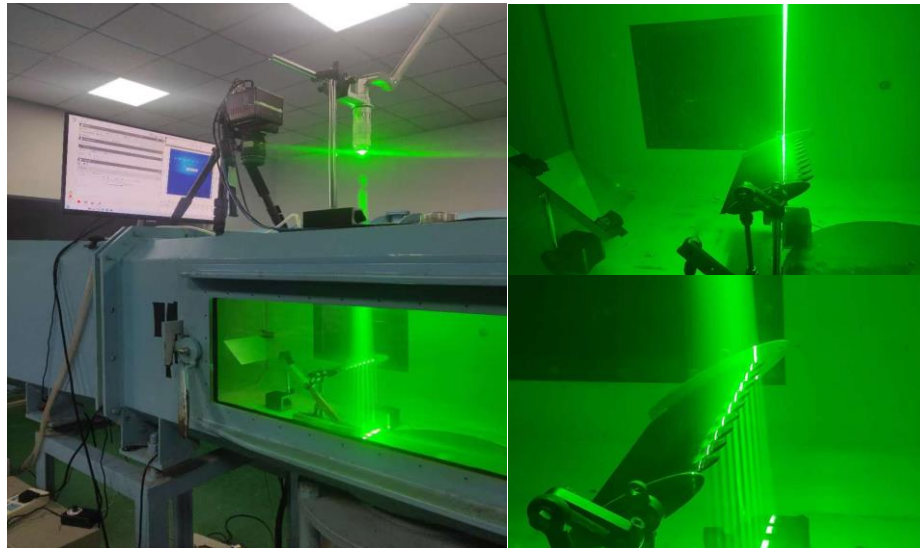
The experiments were performed in a subsonic closed-loop wind tunnel DHS-600x600/1050x1050-V, including two octagonal test sections, which were produced and installed at the College of Engineering of Zhejiang Normal University by Chongqing Lantian Co. Ltd. in 2017. A small test section with a cross-sectional area of 0.6 to 0.6 m<sup>2</sup> was chosen over a large one, as it allowed for closer proximity to the laser scalpel plane and improved resolution. The PIV which is capable of capturing high-speed images of the flow, which also includes the laser setup, camera, image processing software and calibration was performed to ensure accurate measurements.



*Figure 1: Experimental models with different sizes of tubercles: model 0, model 5mm, model 15mm and model 25mm.*

The camera was positioned above, with a mirror situated inside the small testing section to facilitate transversal plane measurements. The mirror is oriented at a 135° angle, allowing the projection of a 90° angle between the camera's position and the measurement area, thereby enabling a clear reflection to the camera (FIG. 2). The chord of the wing model was determined to be 100 mm, and the span was set at 200 mm, taking into account the dimensions of the wind tunnel. The NACA 0012 airfoil was selected for its widespread use among researchers

and its favorable aerodynamic characteristics. The base width was established at 10 mm, with the configuration being either ellipsoidal or somewhat conical. The wing models were fabricated using 3D printing with PLA filament, including a wall thickness of 1 mm and two longitudinal spars for enhanced structural integrity. Four variations were produced: model 0, model 5, model 15, and model 25mm (FIG. 1). The symmetry of NACA 0012 was essential for universality. The model was fabricated as a single entity without segmentation into halves, then undergoing mechanical removal of excess plastic and localized machining of connection sites. The airfoil design at the tubercle's attachment zone was essential for achieving a smooth interaction between the leading edge and the tubercle. The specifications of the 3D printer software were used to designate the model's surface quality, established at 0.05 mm. This led to around 13 hours of printing for each model, although did not ensure complete consistency. A highly qualitative moiré surface with longitudinal micro-grooves akin to riblets was successfully produced.



*Figure 2: Camera, Laser (right) and the testing rig with mirror (top and bottom on the left) inside the wind tunnel small testing section*

## **2. FLOW STRUCTURES IN THE NEAR-WAKE REGION**

As the wing oscillates, it generates a series of vortices that shed from the trailing edge (FIG. 3). These vortices can play a significant role in the lift generation and influence the overall aerodynamic performance. The interaction between the high-speed flow over the wing and the lower-speed flow in the wake creates shear layers. These layers are prone to instability, leading to turbulence and mixing. The near-wake region is inherently turbulent, characterized by chaotic fluctuations in velocity and pressure. Turbulence enhances mixing and energy dissipation, which can have both positive and negative effects on lift and drag.

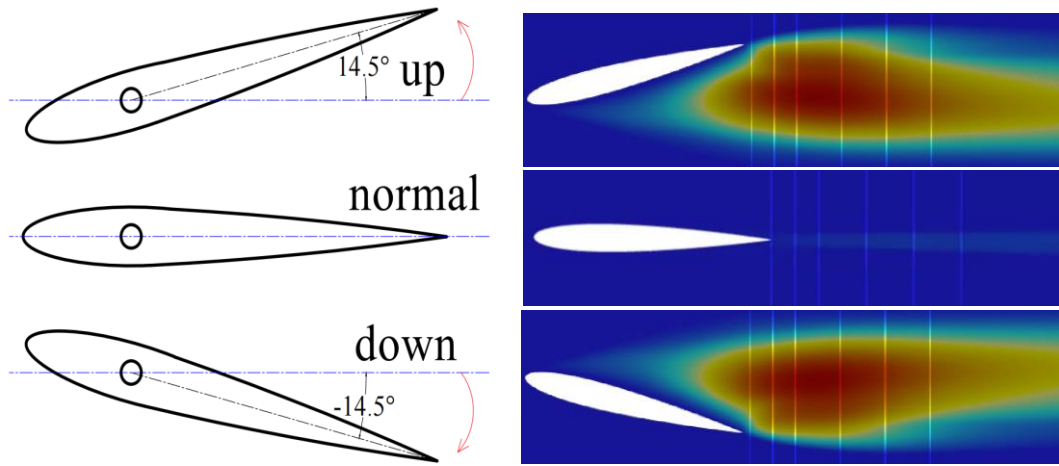


Figure 3: Schematic of NACA 0012 with the largest angles and illustration of its numerical simulation for:  $V= 20\text{m/s}$ ,  $f=2.25\text{Hz}$

At a velocity of 5 m/s, the flow remains laminar, which leads to a more complex structure of flow separation (FIG. 5). The fluid layers move smoothly, but the oscillation of the airfoil introduces periodic changes in angle of attack, affecting the boundary layer dynamics. As the airfoil oscillates, the flow experience delayed separation due to the smooth nature of laminar flow, yet the interaction with the oscillating surface create intricate patterns of separation and reattachment. Understanding these phenomena is crucial for optimizing aerodynamic performance, particularly in applications where maintaining laminar flow is desired.

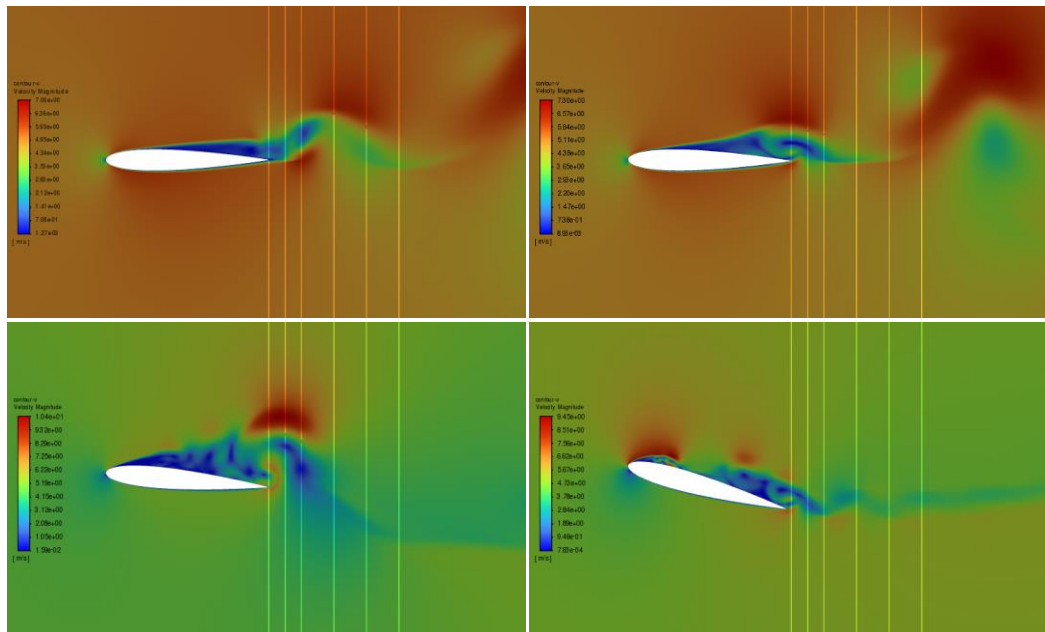
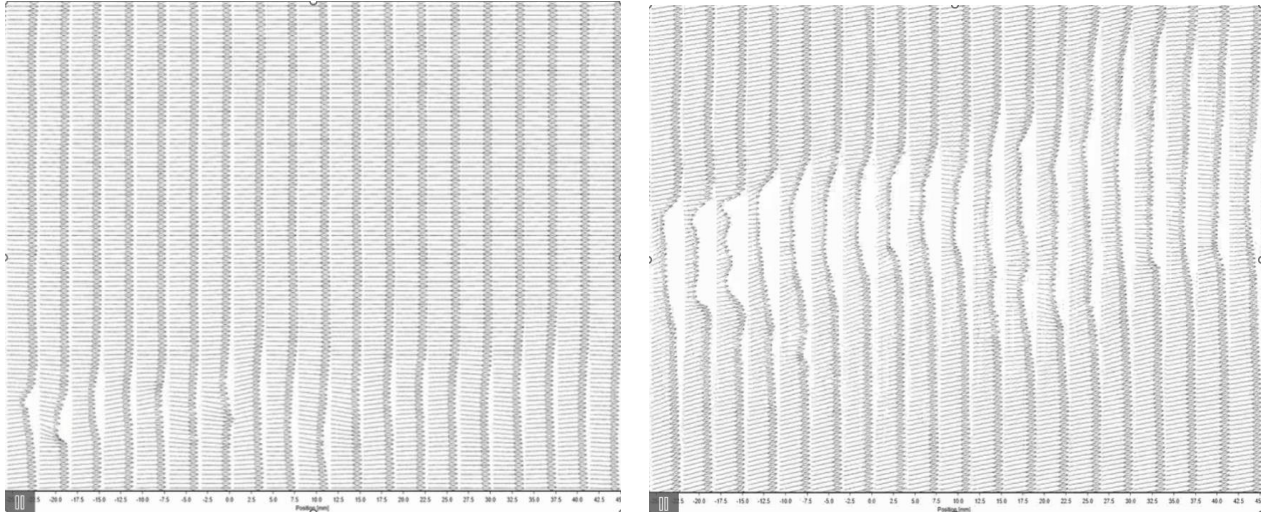


Figure 5: Numerical simulation of unsteady flow development over airfoil NACA 0012 for:  $V=5\text{m/s}$ ,  $f=5.25\text{Hz}$

### 3. OBSERVATIONS FROM PIV MEASUREMENTS

PIV measurements of the near-wake turbulent flow for an oscillating wing section reveal several critical insights; The measurements show distinct patterns of vortex shedding correlating with the oscillation frequency and amplitude (FIG. 4). Higher frequencies tend to produce more regular vortex shedding, while lower frequencies result in more chaotic patterns at high angle. The turbulence intensity in the near-wake region varies significantly with the oscillation parameters.



*Figure 5: Velocimetry results behind the non-stationary dynamics of a wing with tubercles (left – angle of attack=0, right – angle of attack=14.5°)*

#### **4. DISCUSSION AND CONCLUSION**

In this investigation, the averaged velocity and vorticity were meticulously analyzed at three distinct positions up, normal, and down at a flow velocity of 20 m/s (FIG. 6). The results highlight the formation of paired vortices induced by the presence of tubercles on the leading edge of the NACA 0012 airfoil, demonstrating a significant alteration in flow characteristics compared to a smooth airfoil. The data indicate a marked uniformity in the undisturbed flow, underscoring the effectiveness of the tubercles in enhancing aerodynamic performance. This study not only validates the influence of leading-edge modifications on flow dynamics but also contributes to the understanding of vortex behavior in aerodynamic applications.

PIV measurements of near-wake turbulent flow for oscillating wing sections provide valuable insights into the complex dynamics of fluid flows around moving surfaces. The ability to visualize and quantify these flow structures enhances our understanding of aerodynamic performance and opens new avenues for engineering applications.



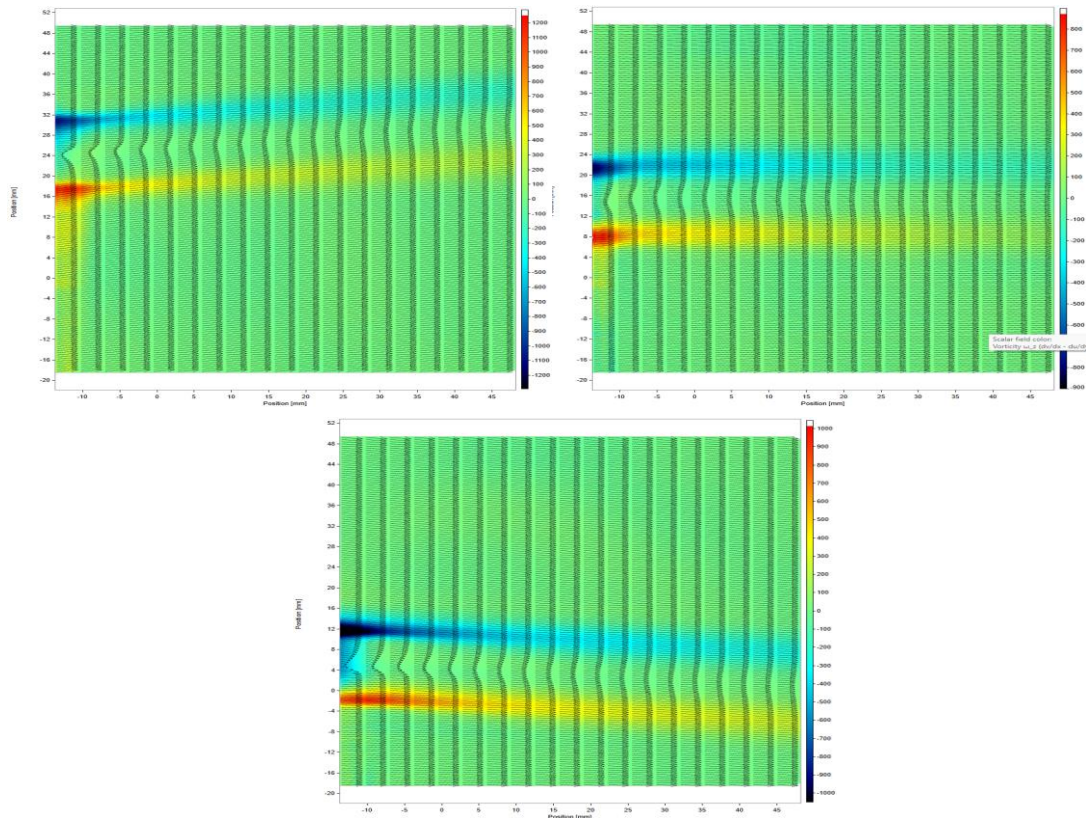


Figure 6: Averaged velocity and vorticity at all 3 position (up, normal and down) for  $V=20\text{m/s}$

As research advances, the integration of PIV with computational fluid dynamics (CFD) and machine learning techniques holds the potential to further revolutionize our approach to aerodynamic design and optimization. By continuing to explore the intricacies of oscillating wing dynamics, we can pave the way for innovations that improve efficiency, safety, and sustainability in various fields of technology.

## REFERENCES

1. Balam-Tamayo, D.; Málaga, C.; Figueroa-Espinoza, B. Numerical Study of an Oscillating-Wing Wingmill for Ocean Current Energy Harvesting: Fluid-Solid-Body Interaction with Feedback Control. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 23. <https://doi.org/10.3390/jmse9010023>
2. Behnaz Beheshti Boroumand, Mahmoud Mani, Wake measurements of oscillating supercritical airfoil in compressible flow, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 10.1139/tcsme-2017-0022, **43**, 1, (112-121), (2019).
3. Václav Uruba, Near wake dynamics around a vibrating airfoil by means of PIV and Oscillation Pattern Decomposition at Reynolds number of 65000, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 55, 2015, Pages 372-383, ISSN 0889-9746, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.03.011>.
4. Sadeghi, Hamed & Mani, Mahmoud. (2009). The unsteady turbulent wake measurements behind an oscillating airfoil. 10.1615/ICHMT.2009.TurbulHeatMassTransf.2500.

Milica Tufegdžić<sup>1</sup>, Marija Mojsilović<sup>2</sup>, Predrag Dašić<sup>3</sup>, Saša Avramović<sup>4</sup> (1,2,4 Academy of Professional Studies Šumadija, Kragujevac, Serbia, <sup>3</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia)

## APPLICATION OF UML TECHNIQUES IN MODELING AN INFORMATION SYSTEM FOR PAYROLL MANAGEMENT

**Abstract:** *The payroll information system is essential for automating salary, bonus, tax, and contribution calculations, enhancing accuracy, efficiency, and transparency while reducing administrative costs and errors. It supports key activities, planning, and logistics for users such as the Human Resources (HR) manager, accountant, administrator, and employees, ensuring ease of use and low maintenance costs. The system is modeled using UML diagrams, including use case, activity, sequence, and class diagrams, to reflect an object-oriented approach. Additionally, the system architecture, consisting of five layers, is proposed.*

**Keywords:** *Payroll management, modeling, information system (IS), Unified Modeling Language (UML).*

**Анотація:** *Інформаційна система обробки заробітної плати є важливою для автоматизації розрахунку заробітної плати, бонусів, податків та внесків, підвищуючи точність, ефективність і прозорість, одночасно знижуючи адміністративні витрати та помилки. Вона підтримує основні діяльності, планування та логістику для таких користувачів, як менеджер з людських ресурсів (HR), бухгалтер, адміністратор та працівники, забезпечуючи простоту використання та низькі витрати на обслуговування. Система моделюється за допомогою діаграм UML, включаючи діаграми варіантів використання, діяльності, послідовності та класів, що відображають об'єктно-орієнтований підхід. Крім того, запропоновано архітектуру системи, що складається з п'яти шарів.*

**Ключові слова:** *Управління заробітною платою, моделювання, інформаційна система (IS), Уніфікована мова моделювання (UML).*

### 1. INTRODUCTION

Unified Modeling Language (UML) is a standardized modeling language for object-oriented systems, developed from methods like Booch, object-oriented software engineering, and object-modeling techniques. It uses graphical notation to visualize, design, and document software, offering a consistent approach and supporting multiple perspectives throughout development [1-4]. The objective of UML is to offer a shared vocabulary of object-oriented terms and diagramming techniques that can comprehensively model any systems' development project, from analysis to design [5]. UML diagrams represent two views of a system: the static view, which focuses on structure using objects, attributes, and relationships, and the dynamic view, which emphasizes behavior through object collaborations and state changes [6].

The payroll information system was designed using the waterfall method, UML, Macromedia Dreamweaver CS 6 for interface design, and XAMPP (Cross-Platform, Apache, MySQL, PHP, Perl) for database design [7]. Developing the

information system using the UML method to effectively model the business processes involved in calculating the payroll for a higher education institution and its implementation was described in [8]. The Vendor and Employee Management System was developed using models defined in UML across various levels of abstraction [9]. Larman's software development method, covering all life cycle phases from requirements gathering to testing, uses the UML use case model for requirements, analyzes business logic, and results in a three-layered architecture, which has been applied to develop a salary calculation application [10].

The calculation of employee salaries, unlike other accounting tasks, is subject to frequent legal changes and amendments, making this issue very dynamic and demanding in terms of timeliness for the legal entity. During the system development, functional and non-functional requirements were defined, system actors were identified, their tasks described, and represented using use case diagrams. The flow of activities within the payroll calculation process was also illustrated, while the interactions between objects in the system were shown using sequence diagrams. The system structure was described through system classes.

## **2. FUNCTIONAL AND NON-FUNCTIONAL REQUIREMENTS**

The functional requirements of the payroll information system define the specific functions the system must provide to meet user needs. The key functional requirements for such a system include:

- Employee data management, which involves the entry, modification, and deletion of basic employee data, as well as job-related data.
- Payroll calculation, which covers the definition of base salary for each employee, automatic calculation of allowances such as overtime, bonuses, and incentives, and automatic calculation of deductions like loans, alimony, and fines. It also includes the calculation of taxes and contributions in accordance with current laws, and the generation of payslips with a detailed breakdown of the calculation.
- Payslip generation and distribution, which includes generating electronic payslips, printing them, and sending them to employees via email or other communication channels.
- Reporting, which entails the generation of monthly, quarterly, and annual salary reports, reports on total payroll costs, and reports on individual payroll components such as overtime, bonuses, and deductions.
- Absence management, which tracks annual leave, sick leave, and unpaid leave, and automatically adjusts salary calculations based on attendance and absences.
- User interface, which allows users to access their own data and enables them to view, edit, and update their data through a simple and intuitive interface.

- Security and authentication, which includes a user authentication system (username, password), different levels of data access (employee, HR, management), and logging of user activities.
- Integration with other systems, which involves integration with human resource management systems, integration with banking systems for automatic salary payments, and the ability to export data in various formats such as CSV (Comma-Separated Values), Excel, and PDF (Portable Document Format).
- The system ensures compliance with legal regulations by automatically updating in accordance with changes in laws related to payroll, taxes, and contributions, and by generating reports for tax authorities and other government bodies.

Non-functional requirements of the payroll information system define the quality attributes and characteristics of the system that are not directly related to specific functionalities but are essential for its successful implementation and use. Here are the key non-functional requirements for such a system:

- **Performance:** The system should calculate salaries for all employees within a reasonable time frame, such as a few minutes for a large organization. It should also offer a fast user interface response time, with minimal delays in data entry and display.
- **Reliability:** The system should be continuously available with minimal downtime, such as 99.9% uptime. Data redundancy and replication should be ensured to maintain system operation in case of hardware or software failure.
- **Security:** All employee and payroll data must be encrypted. Strict access controls should be implemented, allowing only authorized users to access sensitive information. Regular security patch updates and adherence to established security protocols are also essential.
- **Maintainability:** The system should be easy to maintain with well-documented code and system architecture. It should also allow for quick detection and fixing of errors.
- **Usability:** The system should have an intuitive user interface that is easy to use without extensive training. It should also be adaptable to different user roles with appropriate views and functions.
- **Compatibility:** The system should be compatible with various operating systems and web browsers. It should also have the ability to integrate with existing software and systems within the organization, such as Enterprise Resource Planning (ERP) systems and banking systems.
- **Adaptability:** The system should allow easy customization to meet specific organizational needs without requiring significant changes to the code.
- **Resource Efficiency:** The system should optimize the use of servers, memory, and network resources to minimize operational costs.

- **Documentation:** Detailed documentation should be provided for users and administrators, including guides on installation, configuration, usage, and troubleshooting.

Considering these non-functional requirements is crucial to ensure that the system not only fulfills its core functionalities but also delivers optimal user experience, security, and long-term sustainability.

### **3. OBJECT-ORIENTED SYSTEM MODELING**

System actors have been identified, and their responsibilities have been described. The HR Manager manages employee data and is responsible for entering and updating information related to employment, bonuses, and benefits. The Accountant calculates salaries, taxes, and contributions, and generates payslips and reports. The Administrator is responsible for system maintenance and user account management. The Employee has access to their own payslips and salary information.

The HR Manager, within the payroll information system, has several key responsibilities that ensure accurate and efficient payroll processing for employees. These responsibilities include entering and updating basic data, tracking work hours, managing absences, administering bonuses, managing benefits, processing changes, preparing reports, analyzing data, and providing user support. The HR Manager plays a crucial role in maintaining the accuracy and efficiency of the payroll system, ensuring that all employee data is correctly entered and updated, and that all payroll processes comply with applicable laws and organizational policies.

The Accountant plays a vital role in ensuring that all aspects of payroll processing are accurate, timely, and legally compliant, while maintaining the integrity and confidentiality of financial data. Their responsibilities include calculating salaries, taxes, and contributions; ensuring legal compliance; preparing and processing payments; posting transactions; generating reports; conducting cost analysis; administering deductions; implementing changes; ensuring timely payments; maintaining data confidentiality; controlling access; and responding to inquiries.

The System Administrator of the payroll information system plays a crucial role in maintaining and managing the system. Their responsibilities include creating, updating, and deactivating user accounts; managing access controls; monitoring user activity; managing passwords; performing software updates; backing up data; managing the database; providing technical support and user training; configuring the system; integrating with other systems; testing and verifying system functions; generating reports; and analyzing performance. The Administrator ensures the payroll system operates smoothly, that users are properly supported, and that all data remains secure and accurate.

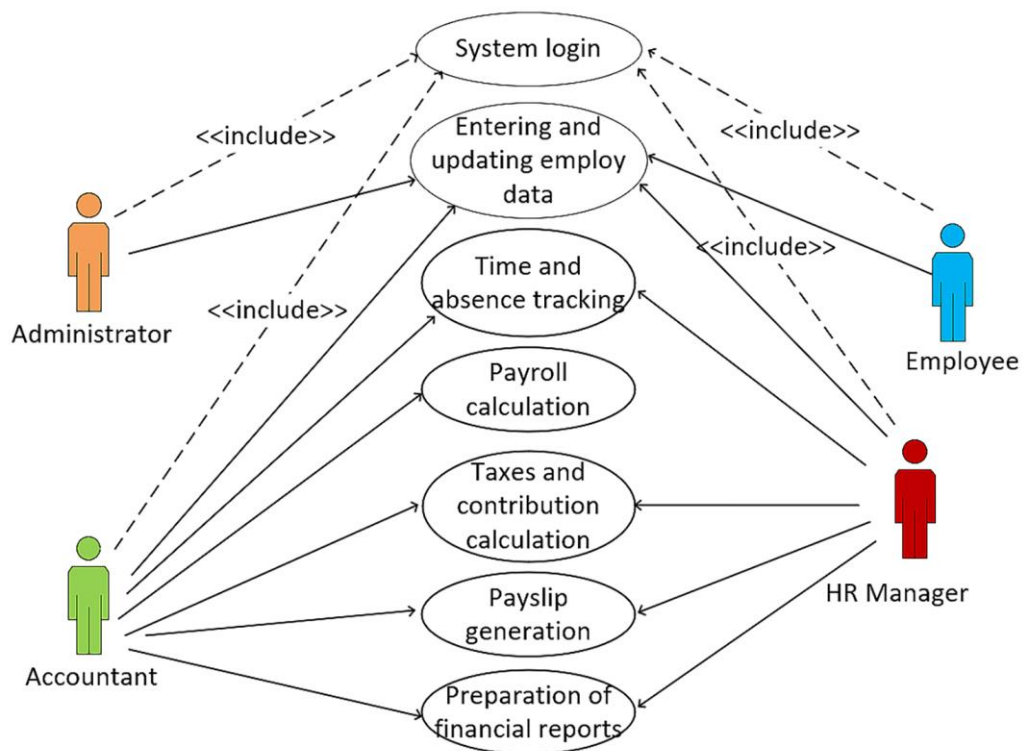
The Employee, within the payroll information system, has several responsibilities that help ensure accurate and efficient payroll processing. These include entering and updating personal data; tracking attendance and entering absences; reviewing payslips and reporting errors; entering bank details; verifying

personal data; using the system properly; maintaining password security; notifying HR of changes; collaborating with HR or other relevant staff; following procedures; staying updated; registering for benefits; and utilizing available benefits appropriately.

### 3.1. UML diagrams

A use case diagram describes a set of actions that a system should or can perform in collaboration with one or more external users of the system (actors) to provide a clear or useful result for the participants or other interested parties. Based on the identified system actors and their described responsibilities, the following use cases have been defined and are presented in Figure 1.

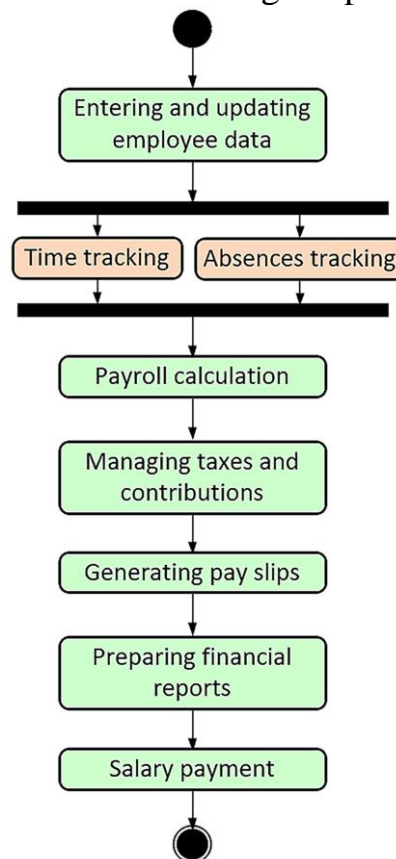
The use case diagram in Figure 1 includes all system actors. The Administrator, as well as the Employee, have the following use cases: system login and entering and updating employee data. The Accountant is associated with the following use cases: system login, entering and updating employee data, time and absences tracking, payroll calculation, taxes and contribution calculation, payslip generation, and preparing financial reports. The use cases for the HR Manager include: system login, entering and updating employee data, time and absences tracking, taxes and contribution calculation, payslip generation, and preparing financial reports.



**Figure 1.** Use cases diagram of the payroll information system

The activity diagram illustrates the flow of activities within the payroll processing system, from data entry to salary disbursement. The following activities are identified: entering and updating employee data, time and absences tracking, payroll calculation, managing taxes and contributions, generating payslips, preparing financial reports, and salary payment. Figure 2 presents the

activity diagram of the payroll information system. It is important to note that the activities time tracking and absences tracking are performed simultaneously.

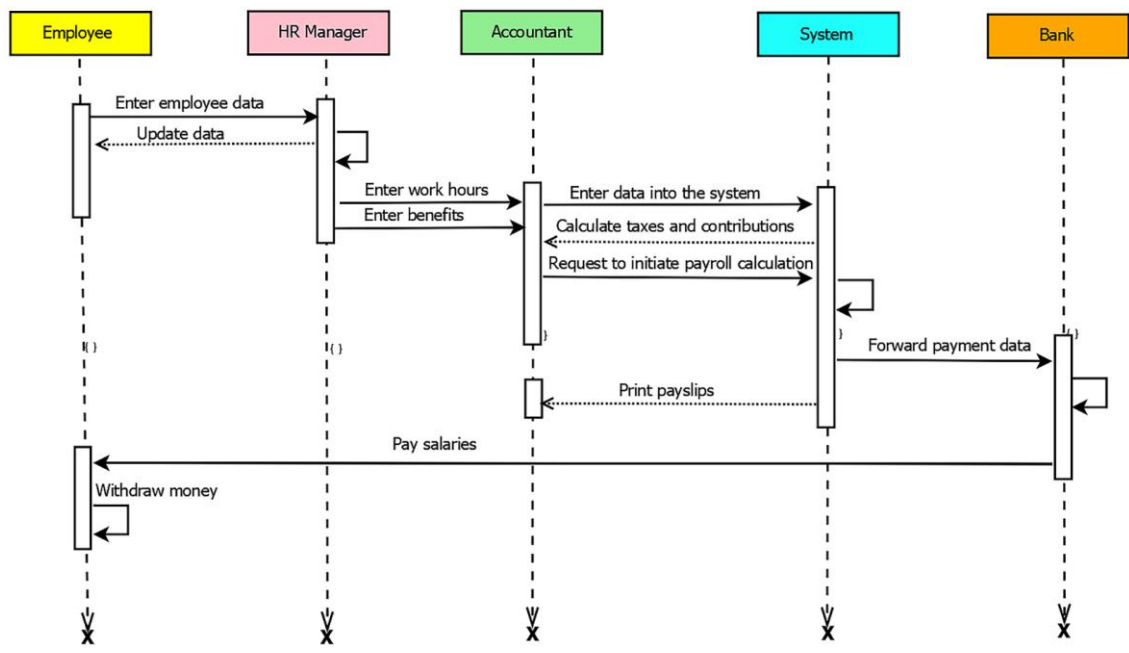


**Figure 2.** Activity diagram of the payroll information system

A sequence diagram is a commonly used type of interaction diagram that focuses on the exchange of messages between lifelines (objects). In the sequence diagram (Figure 3), the participation of objects in the interaction is shown through their lifelines and the messages they exchange.

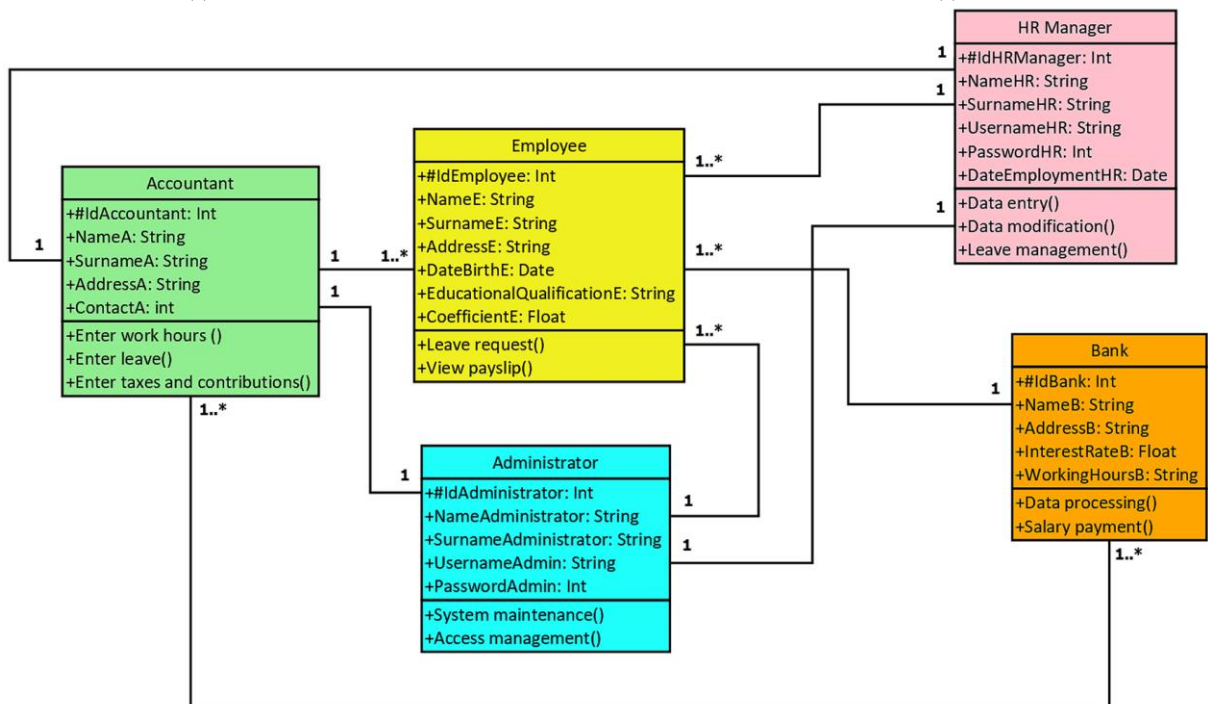
The diagram depicts the following objects with their respective lifelines: Employee, HR Manager, Accountant, System, and Bank. The Employee sends a message to initiate data entry, and the HR Manager responds with a confirmation message indicating the data has been updated. The HR Manager then forwards a message to the Accountant to enter work hours and benefits, after which the Accountant inputs the data into the System.

The System responds with a confirmation message regarding the calculation of taxes and contributions. The Accountant then sends a request to initiate the payroll calculation. The System performs the calculation, forwards the payment details to the Bank, and initiates the printing of payslips. The Bank processes the salary payments to employees, who can then withdraw their funds from an Automated Teller Machine (ATM) or directly at the bank.



**Figure 3.** Sequence diagram of the payroll information system

A class diagram belongs to the group of static structural diagrams. It illustrates the structure of a system, subsystem, or component in the form of interconnected classes, along with their attributes, constraints, and relationships such as associations, generalizations, and dependencies. The class diagram of the system is presented in Figure 4 and highlights the following classes: Accountant, Employee, HR Manager, Administrator, and Bank. Each class includes its respective attributes and methods. As an example, we are considering the Accountant class with the following attributes and their types: IdAccount, NameA, SurnameA, AddressA, and ContactA. The separated methods are: Enter work hours ( ), Enter leave ( ), and Enter taxes and contributions ( ).



**Figure 4.** Class diagram of the payroll information system



#### 4. INFORMATION SYSTEM ARCHITECTURE DIAGRAM

The architecture of a payroll information system typically consists of several key components that together enable the efficient collection, processing, and distribution of payroll data. This architecture can be represented as a layered diagram, which includes the User Interface, Application Layer, Business Logic Layer, Database Layer, and Integration Layer (Figure 5).

At the top is the User Interface (UI), which includes both a web and a mobile application, allowing users to easily interact with the system from different devices. The Application Layer consists of a web server and an API server, handling communication between the user interface and the system's core functionalities. The Business Logic Layer contains specialized modules responsible for salary calculation, employee management, and the management of taxes and contributions.

Beneath this is the Database Layer, which uses a relational database system (such as MySQL or PostgreSQL) to store structured data, as well as files for saving payslips and financial reports. Finally, the Integration Layer enables communication with external systems, including banking institutions, tax authorities, and document management systems, ensuring the system functions smoothly within a broader organizational and regulatory environment.

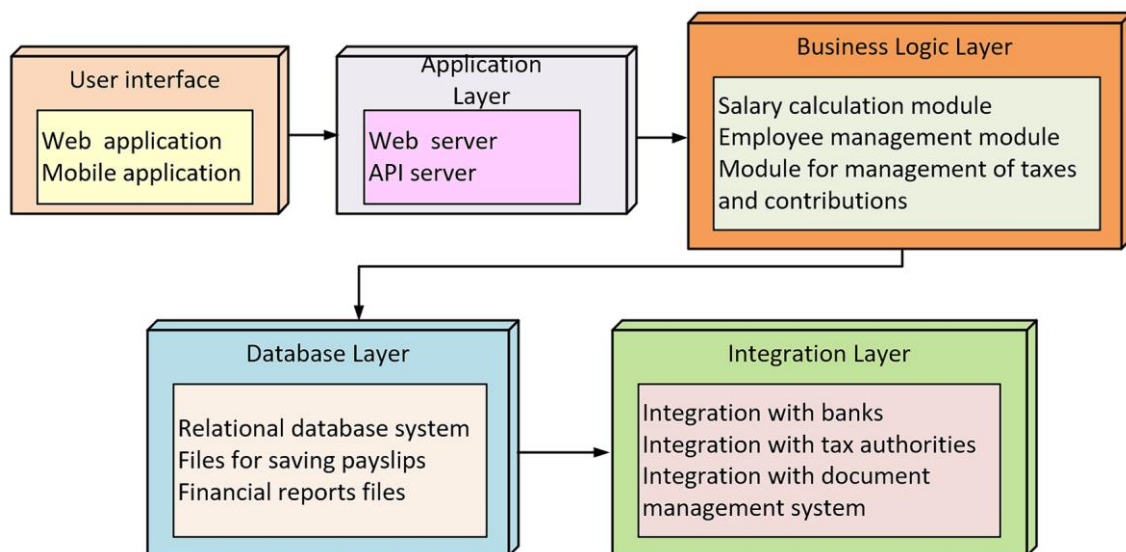


Figure 5. The architecture diagram of the payroll information system

#### 5. CONCLUSION

This paper presents a model of an information system for employee payroll calculation. The system, modeled based on the analysis of both functional and non-functional requirements, has been designed to automate all activities necessary for the successful organization of payroll processing. The presented system can be used independently or successfully integrated into a broader system that covers all activities leading up to employee payroll calculation.

The main actors such as HR manager, accountant, employee, and administrator, are identified, and they also represent external entities, i.e., the system's interface with the environment. An object-oriented approach was used

for system modeling, and the diagrams were created using UML. Use case diagrams, activity diagrams, sequence diagrams, and class diagrams are presented, along with a proposed system architecture consisting of five layers.

## REFERENCES

- [1] Zheng, J.-H.; Feng, Y.-Q. & Zhao, Y.: *A unified modeling language-based design and application for a library management information system. Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 14, Issue 5 (December 2014), pp. 129–144. ISSN 1311-9702. <https://doi.org/10.2478/cait-2014-0050>.
- [2] Tufegdžić, M.; Nedić, V.; Mojsilović, M. & Čolić, V.: *Designing information systems (in Serbian). Kragujevac (Serbia): Academy of Applied Studies Šumadija (ASSŠ)*, 2024. – 245 pp. ISBN 978-86-82098-11-9.
- [3] Šerifi, V.; Dašić, P.; Ječmenica, R. & Labović, D.: *Functional and information modeling of production using IDEF methods. Strojniški vestnik / Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 55, No. 2 (February 2009), pp. 131–140. ISSN 0039-2480.
- [4] Stevens, P. & Pooley, R.: *Using UML: Software engineering with objects and components. 2nd Edition. Harlow (United Kingdom): Pearson Education Ltd.*, 2006. – 272 pp. ISBN 978-0-321-26967-6.
- [5] Dennis, A.; Wixom, B.H. & Roth, R.M.: *System analysis and design. 5th Edition. Hoboken (New Jersey – USA): John Wiley & Sons Inc.*, 2012. – 563 pp. ISBN 978-1-118-05762-9.
- [6] Siddique, Q.: *Unified modeling language to object oriented software development. International Journal of Innovation, Management and Technology (IJIMT)*, Vol. 1, Issue 3 (August 2010), pp. 264–268. ISSN 2010-0248.
- [7] Rumetna, M.S.; Lina, T.N.; Rajagukguk, I.S.; Pormes, F.S. & Santoso, A.B.: *Payroll information system design using waterfall method. International Journal of Advances in Data and Information Systems (IJADIS)*, Vol. 3, Issue 1 (April 2022), pp. 1–10. ISSN 2721-3056. <https://doi.org/10.25008/ijadis.v3i1.1227>.
- [8] Pitulić, S.; Ilić, S. & Lekić, J.: *Building the payroll information system for higher education institution using UML – Master thesis work. In: Proceedings of the 8th International Scientific Conference "Technics and Informatics in Education" (TIE-2020); Čačak, Serbia; 18-20 September 2020. Čačak (Serbia): University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences, (FTN)*, 2020, pp. 204–211. ISBN 978-86-7776-247-6.
- [9] Porter, M.; Bording, P. & Fu, Y.: *UML based design of employee information management system. In: Proceedings of the ASEE Annual Conference; Virtual Meeting; 26-29 July. Washington (D.C. (District of Columbia) – USA): American Society for Engineering Education (ASEE)*, 2021, Paper no. #34429: pp. 1–16.
- [10] Elčić, V.: *The development of application for the calculation of salary using Larman's method for software development (in Bosnian). INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 10, Ref. F-2 (March 2011), pp. 907–911.

**Poberezhets Vladyslav<sup>1</sup>, Hleba Oleksandra<sup>1</sup>, Liu Keming<sup>1,2</sup>, Piontkevych Oleh<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University, Ukraine; <sup>2</sup>Beibu Gulf University, People's Republic of China)

## **APPLICATION IN C# PROGRAMMING LANGUAGE FOR AUTOMATED SELECTION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A SNAP GAUGE**

***Abstract:** An application in the C# programming language for automated selection of geometric parameters of a snap gauge is proposed. The system of tolerances and fits of smooth joints and the regulatory documentation are used to calculate the base geometric parameters of the snap gauge. The computer support for technological preparation of production is improved by automating the process of designing the snap gauge.*

***Keywords:** C# application; gauge caliper; automated calculation; fits and tolerances; smooth joints; geometric parameters; technological production preparation; design automation.*

***Анотація:** Запропоновано застосунок мовою програмування C# для автоматизованого вибору геометричних параметрів калібр-скоби. Використано систему допусків і посадок гладких з'єднань та нормативну документацію для розрахунку ключових геометричних параметрів калібр-скоби. Удосконалено комп'ютерне забезпечення технологічної підготовки виробництва за рахунок автоматизації процесу проектування калібр-скоби.*

***Ключові слова:** C# застосунок; калібр-скоба; автоматизований розрахунок; допуски і посадки; гладкі з'єднання; геометричні параметри; технологічна підготовка виробництва; автоматизація проектування.*

### **Statement of the problem and its connection with scientific and practical works.**

In modern mechanical engineering, the accuracy of measuring the dimensions of parts provides a check on the quality of products [1, 2]. High-quality manufactured parts provide the appropriate characteristics of drives [3, 4]. In serial and mass production, snap gauges are widely used to control the dimensions of parts. Traditional methods of designing snap gauges and selecting their geometric parameters often require significant time and depend on the human factor [5, 6], which can lead to errors in calculations.

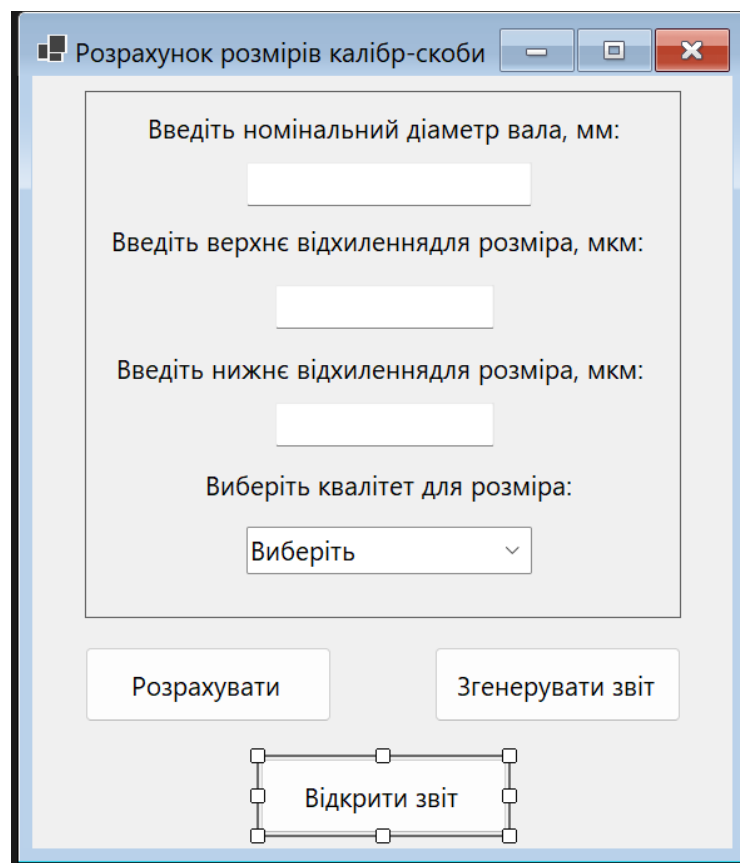
The modern approach to ensuring technological preparation of production is focused on digitalization and automation of processes [7, 8]. In this regard, the development of software for automated selection of geometric parameters of snap gauges is relevant. The use of the C# programming language [9, 10] allows you to create an effective application with the ability to connect to a database, which provides centralized storage of geometric parameters, their rapid analysis and correction during the production process. The implementation of such applications will contribute to increasing the competitiveness of manufactured products by reducing the time and money spent on the computer support for technological preparation of production.

### **Presentation of the main material of the research.**

The developed application for automated selection of geometric parameters of the snap gauge is shown in Fig. 1.

The application is based on the selection of geometric parameters of the snap gauge according to the initial data, regulatory documentation [11] and the corresponding algorithm. Data from the regulatory documentation are taken into the application in the form of Microsoft Excel tables, as shown in Fig. 2. After performing all calculations, the operator can generate a report. The resulting report is stored in the database for further work and possible improvement of the measuring tool.

From entering the initial data to receiving the report, 5-10 seconds pass, which significantly shortens the process of designing the snap gauge. The report displays the following data: maximum deviations for shafts, calculated maximum dimensions and tolerances for the size, maximum deviations and tolerances for manufacturing the snap gauge, parameters of the through and non-through parts of the snap gauge. The obtained data can be used for direct development of a three-dimensional model and snap gauge drawing.



*Fig. 1. Appearance of the application for calculating snap gauge dimensions*

An intuitive graphical interface has been developed that allows users to easily enter the necessary parameters and receive calculation results in a convenient format. This is achieved through text prompts for the user: label1, label2, label3, label4; input fields: textBox1, textBox2, textBox3; drop-down list comboBox1 for selecting quality; function buttons: button1, button2, button3, which are responsible for the commands "Розрахунок", "Згенерувати звіт", "Відкрити звіт", respectively.

In the process of developing an application for automated selection of geometric parameters of the snap gauge, in addition to the interface in the integrated development environment Microsoft Visual Studio in the C# programming language, a linear algorithm (a list of detailed instructions) for solving this problem was also developed. This allowed to reduce the time required for selection of geometric parameters and minimize the likelihood of human errors.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1								Інтервал						
2	Квалітет	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
3		1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	10	11
4		1,5	1,5	1,5	2	3	3	3	4	4	5	6	6	7
5	6	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
6		1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	10	11
7		1,5	1,5	1,5	2	3	3	3	4	4	6	7	8	9
8	7	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
9		2	3	3	4	5	6	7	8	9	12	14	16	18
10		3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	9	9	11
11	8	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
12		5	6	7	8	9	11	13	15	18	21	24	28	32
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	9	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
15		5	6	7	8	9	11	13	15	18	24	27	32	37
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	10	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
18		10	12	14	16	19	22	25	28	32	40	45	50	55
19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	11	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
21		10	12	14	16	19	22	25	28	32	45	50	65	70
22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	12	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27

Fig. 2. Example of a tolerance table for the snap gauge dimensions

The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach and the feasibility of implementing automated software for selecting the geometric parameters of the snap gauge in production [12, 13].

It is proposed to improve the functionality of the application by using the API functions of the CAD system [14, 15], which will allow creating three-dimensional models and drawings of measuring instruments in automatic mode. This will contribute to expanding the possibilities of automating the process of designing and manufacturing the measuring instrument.

## CONCLUSION.

The application developed in the C# programming language for automated selection of geometric parameters of snap gauge allows to significantly increase the efficiency and accuracy of the process of these calculations. Thanks to integration with the database, centralized storage of the obtained parameters, their quick analysis and use in production processes is ensured.

Thus, the use of the developed application is appropriate in production conditions, where measurement accuracy and the efficiency of designing a measuring tool such as the snap gauge are important. Further research can be aimed at improving the application algorithm, expanding its functionality, and integrating it with other production systems.

## REFERENCES

1. Савуляк В. В. *Управління якістю продукції: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2012. 90 с.
2. Палагнюк Д.М. та ін. *Принципи забезпечення інформаційної безпеки // Якість і безпека: матер. наук.-практ. конф., 14-15 березня 2018 р.* Вінниця, 2018. С. 19-22.
3. Козлов Л. *Характеристики мехатронного приводу під час просторового руху маніпулятора / Л. Козлов, С. Репінський, О. Паславська, О. Піонткевич // Наукові праці Вінницького національного технічного університету, 2017. – № 2. – 9 с. Електронний ресурс: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/507>*
4. Polishchuk L., Piontkevych O., Burdeinyi M., and Trehubov V. *Justification for choosing the type of belt conveyor drive. Вісник машинобудування та транспорту.* Вінниця: ВНТУ, 2024. № 1 (19). С. 115–122. DOI: 10.31649/2413-4503-2024-19-1-115-122
5. Шарманська В. М., Яцентюк П. І. *Вплив людського фактору на управління ризиками в економічній діяльності. Економіка та суспільство, 2023. Вип. 47. С. 5. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-39>*
6. Дідур І. В., Березюк О. В. *Вплив інфобезпеки на життєдіяльність людини. Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні.* Херсон: Книжкове видавництво ФОР Вишемирський ВС, 2023. С. 240-242.
7. *Методичні вказівки до виконання курсових проєктів з дисципліни «Проектування автоматизованих механізмів та машин» зі спеціальності «Прикладна механіка» / Уклад. Л.Г. Козлов, О.В. Піонткевич, Д.О. Лозінський.* Вінниця: ВНТУ, 2025. 83 с.
8. Березюк О.В. *Науково-технічні основи проектування приводів робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів: автореф. дис. д-ра техн. наук.* Хмельницький, 2021. 46 с.
9. Побережець В. Я., Яцук Д. А., Рижих О. В., Піонткевич О. В. *Розробка прикладних програм мовою програмування С# для автоматизованого проектування металорізного інструменту. Матеріали LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р.* Електрон. текст. дані. 2024. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allfmt/all-fmt-2024/paper/view/20531>.
10. Побережець В. Я., Кузьменко П. А., Піонткевич О. В. *Застосунок мовою програмування С# для автоматизованого розрахунку геометричних параметрів шпонкової фрези. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 23-27 березня 2025 р.* Електрон. текст. дані. 2025. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2025/paper/view/24089>.
11. *Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. В. Савуляк, Н. С. Семічаснова.* Вінниця : ВНТУ, 2018. 127 с.
12. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Сердюк О. В., Домославський В. М. *Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві. Вісник машинобудування та транспорту, 2022. № 16(2). С. 96-100.*
13. Березюк О. В. та ін. *Перспективи використання техногенної сировини при виробництві композиційних в'язучих. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2022. № 2. С. 36-45.*
14. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. *Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту.* Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
15. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. *Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету.* Вінниця : ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186>

**Predrag Pravdić, Violeta Dorđević** (*Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia*)

## **BIOMATERIALS IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING INDUSTRY**

**Abstract:** *Biomaterials are materials designed to interact with biological systems, either as substitutes for natural tissues, in medical devices, or in industrial applications. In the mechanical engineering industry, biomaterials are used to manufacture implants, biocompatible coatings, sensors, and other components that require interaction with the biological environment. Their primary function is to replace or enhance the performance of traditional materials in conditions where biocompatibility, wear resistance, and long-term stability are required.*

**Keywords:** *biomaterials, mechanical engineering, environment*

**Анотація:** *Біоматеріали — це матеріали, спеціально створені для взаємодії з біологічними системами, зокрема як замітники природних тканин, компоненти медичних виробів або для промислового застосування. У галузі машинобудування біоматеріали використовуються для виготовлення імплантів, біосумісних покриттів, сенсорів та інших компонентів, що функціонують у середовищах з біологічною взаємодією. Їх основна функція полягає у заміні або підвищенні ефективності традиційних матеріалів в умовах, де вимагаються біосумісність, зносостійкість та довготривала стабільність.*

**Ключові слова:** *біоматеріали, машинобудування, середовище*

### **1. INTRODUCTION**

Biomaterials are materials designed to come into contact with biological systems, either as substitutes for natural tissues, in medical devices or in industrial applications. In the engineering industry, biomaterials are used to manufacture implants, biocompatible coatings, sensors and other components that require interaction with the biological environment. Biomaterials are materials designed to interact with biological systems, most often in medical and industrial applications. In the mechanical industry, they are used to make implants, prostheses, sensors and biocompatible coatings. We divide them into metals, polymers, ceramics and composites, where each type has specific properties and purpose. Metals such as titanium are used in orthopedics for strength and corrosion resistance, while polymers allow for flexibility and adaptability. Ceramic biomaterials have high hardness and biocompatibility, and composites combine the advantages of different materials. Their application extends to 3D printing, biomechanical sensors and self-healing materials. Although they have numerous advantages, such as biocompatibility and wear resistance, challenges include high costs and time-consuming testing. Further development of biomaterials contributes to the progress of engineering and medical technologies. Biomaterials are used in various fields of mechanical engineering, especially in medical technology and biomechanics. Their main purpose is to replace or improve the functions of biological tissues through biocompatible and long-

lasting materials. Metals such as stainless steel, cobalt-chromium alloys, and titanium are used for implants and surgical instruments because of their strength and resistance to corrosion. Polymeric biomaterials, such as UHMWPE and PMMA, are applied in orthopedics and dentistry due to their flexibility and adaptability. Ceramics, especially hydroxyapatite and zirconium oxide, are used for dental and bone implants due to their high biocompatibility and wear resistance. Composite biomaterials combine different properties to improve mechanical and chemical properties. Advances in technology enable the development of biodegradable and smart biomaterials that respond to changes in the environment. Their application in 3D printing enables personalized medical devices and implants. Self-healing biomaterials have the potential to extend the lifetime of components in industry. Challenges in the use of biomaterials include high research costs, lengthy testing and regulations for biomedical products. Despite this, the further development of biomaterials contributes to the improvement of the quality of life and opens up new possibilities in industrial and medical applications. Biomaterials are crucial in the modern engineering industry, especially in the field of biomedical engineering. Their ability to replace or improve the function of biological tissues makes them indispensable in the production of implants, prostheses and medical devices. Metals such as titanium and its alloys are used in orthopedics due to their biocompatibility and wear resistance. Polymers are increasingly used due to their adaptability and biodegradability, which makes them suitable for temporary medical applications. Ceramics are used in dentistry and orthopedics because they offer high wear resistance and chemical stability. Composite materials combine the best properties of metals, polymers and ceramics, thus increasing their applicability. The development of smart biomaterials enables sensors and actuator systems that respond to changes in the body. Advanced technologies, such as 3D printing of biomaterials, enable personalized medical implants and more precise adaptation to patients. Industrial applications of biomaterials include protective coatings, biocompatible bearings, and self-healing materials. The main challenges in the development of biomaterials are the high cost of research, lengthy approval processes and potential problems with the long-term stability of materials in the body. In the future, an even greater application of biomaterials is expected, both in the medical industry and in the mechanical production of components with advanced properties.

## **2. APPLICATION OF BIOMATERIALS IN MECHANICAL INDUSTRY**

Biomaterials are widely used in the engineering industry, especially in the fields of biomechanics, medical technology and industrial production. Their main function is to replace or improve the performance of traditional materials in conditions where biocompatibility, wear resistance and long-term stability are required. Metals such as titanium, stainless steel and cobalt-chromium alloys are used to manufacture orthopedic implants, joint prostheses and surgical instruments. Titanium is particularly popular due to its low density, corrosion resistance and excellent biocompatibility. Polymeric biomaterials, such as high-



density polyethylene (UHMWPE), PMMA, and PTFE, are used to make prostheses, joint components, and medical sensors. Ceramic biomaterials, such as hydroxyapatite and zirconium oxide, are used in dental implants and as coatings to improve the integration of metal implants with bones. Composite biomaterials are used to improve mechanical properties and combine the advantages of different materials. In the engineering industry, biomaterials are also used in the development of smart materials that can change their properties depending on external conditions. For example, biomaterials with a memory effect are used to make sensors and actuators in biomechanical systems. Industrial production uses biocompatible coatings to improve the resistance of components that come into contact with the human body. Advances in processing technologies enable precise shaping of biomaterials using CNC machines and additive manufacturing. 3D printing of biomaterials enables the production of customized implants and prostheses that better fit the patient's anatomy. In industry, biomaterials are used to make biodegradable packaging and self-healing materials that reduce maintenance costs. Nanotechnology enables the development of biomaterial surface coatings that improve resistance to bacterial infections and chemical influences. In the field of biomechanical systems, biomaterials are used to produce flexible and lightweight components that allow better patient mobility. Biodegradable materials enable the development of temporary medical implants that decompose in the body after a certain time, reducing the need for additional surgical interventions. Biomechanical prostheses and exoskeletons use advanced polymers and metal alloys to provide long-lasting and comfortable performance. One of the significant challenges in the application of biomaterials is the balancing between mechanical properties and biocompatibility. While metals are extremely strong and durable, their interaction with biological tissues can lead to problems such as oxidation and allergic reactions. On the other hand, polymer materials are more flexible, but sometimes less resistant to wear and mechanical loads. The integration of ceramic materials allows for improved wear resistance, but their brittleness is still a challenge.

The development of new biomaterials involves the improvement of surface properties using nanostructures and bioactive coatings. The use of biomaterials in industry extends to biologically inspired designs, where principles from nature are used to develop materials with optimized properties. In addition to the medical industry, biomaterials are also used in robotics, where flexible and lightweight materials are developed for artificial limbs and actuators. The future of biomaterial applications in the engineering industry involves the development of regenerative materials that can repair damage in real time. Advanced research in the field of biocomposites allows combining organic and inorganic components to create materials with superior properties. The industrial application of biomaterials is expanding to areas such as biomedical sensor technology, wearable electronics and energy-efficient materials. Although biomaterials are still in the phase of intensive research and development, their application in the mechanical industry is becoming increasingly important. Increasing the availability of new

biomaterials contributes to improving the quality of medical devices, reducing the environmental impact and increasing the efficiency of production processes. With further technological advances, biomaterials are expected to become even more prevalent in industry, opening up new opportunities for innovation in various engineering sectors.

Biomaterials can be divided into several main groups according to composition and properties:

Metals and alloys:

Metals are used for their strength, wear resistance and biocompatibility. The most commonly used metals are:

- Titanium and its alloys (Ti-6Al-4V) – used in implants and orthopedic prostheses due to their corrosion resistance and low density.
- Stainless steels (316L) – used in surgical instruments and implants.
- Cobalt-chromium alloys - they are suitable for joint prostheses due to their exceptional wear resistance.

Polymers:

Polymeric biomaterials are used for their flexibility, biocompatibility and ease of processing. Some of the most commonly used polymers are:

- Polyethylene (UHMWPE) – used in orthopedics, especially for joint prostheses.
- Poly(methyl methacrylate) (PMMA) – used for bone and denture fixation.
- Polytetrafluoroethylene (PTFE) – known as Teflon, used for vascular grafts and sliding surfaces.

Ceramic biomaterials:

Ceramics are biocompatible and wear-resistant, and are used in the dental and orthopedic industry:

- Hydroxyapatite (HA) – used as a coating on metal implants due to its similarity to natural bone.
- Aluminum-oxide and zirconium-oxide ceramics - they are used for dental crowns and joint prostheses due to their high hardness and wear resistance.

Composite biomaterials:

Composites combine different materials to improve mechanical properties and biocompatibility.

- Polymer-ceramic composites - used for bone replacement and dental applications.
- Metal-ceramic composites – improve strength and corrosion resistance.

Their application:

Medical industry

- Implants and prostheses – biomaterials are used to replace bones, joints and dentures.
- Surgical instruments – stainless steel and titanium are used to manufacture precision instruments.
- Orthopedic plates and screws - used to stabilize bone fractures.

Biomechanical sensors and actuators

- Smart biomaterials – materials that respond to changes in temperature, pH or electrical stimulation are used for sensors and motion control.
- Biodegradable sensors - made of polymers that break down in the body after a certain use.

Industrial and technological application

- Self-healing materials – biomimetic polymers and gels are used to create materials that can heal damage on their own.
- Biocompatible coatings - used to protect metal parts in aggressive environments.
- 3D printing of biomaterials – enables the production of complex structures for medical and industrial use.

Biomaterials have become a key element in the engineering industry, especially in the development of biomedical devices, implants and components with improved mechanical and chemical properties. Their application is growing thanks to innovations in materials, engineering processing and biotechnology. The industrial sector uses biomaterials in various fields, including medical technology, automotive engineering, aeronautics and robotics. One of the most important applications of biomaterials in the mechanical industry is the production of medical implants and prostheses. Metallic biomaterials, such as titanium and its alloys, are used to make orthopedic implants, joint prostheses and dental restorations. These materials have excellent corrosion resistance and biocompatibility, which enables their long-term use in the human body. Polymeric biomaterials, such as polyether-ether-ketone (PEEK), offer flexibility and reduced weight, making them suitable for a variety of medical applications. Ceramic biomaterials, such as hydroxyapatite and zirconium oxide, are often used in the dental industry and orthopedics due to their biocompatibility and strength. Their application in medical devices and implants enables better integration with tissues and reduces the risk of rejection. Composite biomaterials combine the characteristics of different materials to improve performance and enable optimal interaction with biological systems. In addition to medical applications, biomaterials are also used in the development of biocompatible coatings and protective layers for industrial machines and tools. For example, biomaterial-based nano-coatings improve wear and corrosion resistance, thereby extending the life of industrial components. Self-healing biomaterials enable the regeneration of micro-damages, thus reducing maintenance and repair costs. Biomaterials also find applications in robotics and the automotive industry, where they are used to develop lightweight, flexible and durable materials. For example, in robotics, biocompatible elastomers are used to make flexible actuators and sensors that enable more natural movements of robotic limbs. In the automotive industry, biomaterials are used to manufacture vehicle interior components, reducing overall mass and improving environmental sustainability. The development of biodegradable biomaterials enables the reduction of the ecological footprint of industrial products. Biodegradable polymers are used for the production of packaging, protective coatings and medical implants that

decompose after a certain time in the body or natural environment. This technology reduces the need for additional surgical procedures and contributes to sustainable industrial production. 3D printing of biomaterials has revolutionized the production of personalized medical devices and industrial components. This technology enables quick and precise creation of implants that are adapted to the individual needs of patients. In addition to medical applications, 3D printing is used to make complex industrial components from biomaterials with improved mechanical and chemical properties. The industrial application of biomaterials also includes the development of biomechanical devices, such as exoskeletons and smart prostheses. These devices use advanced materials that mimic the natural functions of muscles and bones, allowing for improved mobility and quality of life for the user. The integration of sensors and actuators into biomaterials enables the development of interactive systems that react to changes in the environment and adapt to the needs of users. The main challenges in the application of biomaterials in the engineering industry include high research costs, complex certification processes and time-consuming biocompatibility testing. In addition, materials must have an optimal balance between strength, flexibility, wear resistance and chemical stability to ensure their long-term use in industrial and medical applications. With the progress of nanotechnology and biomimetic research, future generations of biomaterials are expected to have even better properties and wider applications in industry. For example, biomaterials inspired by natural structures, such as spider silk and mother-of-pearl, can offer revolutionary properties in terms of strength and elasticity. These innovations can improve industrial production, reduce maintenance costs and improve the efficiency of machine systems. The future of biomaterials in the mechanical industry also brings the possibility of integration with electronic components, enabling the development of smart materials that can change their properties depending on the operating conditions. For example, biomaterials with variable strength can be used in adaptive structures, while biodegradable sensors enable environmentally friendly industrial processes. All these innovations show that biomaterials are not limited to medical applications, but have a wide range of possibilities in the mechanical industry, from protective coatings and mechanical components to advanced robotic and biomechanical systems. Further research and development of new technologies will continue to shape the future of biomaterials, opening up new opportunities for sustainable and innovative industrial production.

### **3. THE FUTURE AND CHALLENGES OF BIOMATERIALS**

Biomaterials is a field experiencing rapid progress thanks to multidisciplinary research in material sciences, biomedicine, engineering and nanotechnology. Their future promises wide application in medicine, industry, energy, environmental protection and other sectors. However, despite significant progress, there are numerous challenges that need to be overcome in order for biomaterials to reach their full potential. The future of biomaterials promises wide application in medicine, industry, energy, environmental protection and other

sectors. Smart biomaterials, which can change their properties in response to changes in the environment, are becoming increasingly important. They react to pH value, temperature, electric or magnetic fields, which enables their application in medical implants, regenerative medicine and industry. Biodegradable biomaterials are also being developed, which reduce the ecological footprint of industrial production, and in medicine enable the creation of implants that naturally decompose without the need for additional operations. Biomaterials inspired by nature, such as those based on the structure of spider silk or mother-of-pearl, enable the development of light, strong and flexible industrial components. These materials are used in medicine, robotics, the aviation industry and construction. On the other hand, nanobiomaterials enable the improvement of mechanical, antibacterial and chemical properties, and are used in medicine for the controlled release of drugs, the integration of implants and the treatment of serious diseases. In industry, nanotechnology is applied in developing wear-resistant coatings, reducing friction and increasing the durability of mechanical parts. These technologies enable the production of complex tissue structures and organs, while in industry they facilitate the personalized production of parts with optimized properties. Self-repairing biomaterials are another innovative solution, as they enable the repair of damage without external intervention. These materials have the potential for applications in biomedicine, such as self-regenerating prostheses and implants, but also in industry through the development of coatings and mechanical parts with the ability to self-renew. Biomaterials are increasingly integrated with electronic components, which opens up possibilities for the development of bioelectronics, artificial organs and sensors for health monitoring. Flexible electronic biomaterials are used in smart prostheses, bioengineered devices, and wireless sensors for monitoring vital functions. However, although biomaterials are on the rise, their development carries a number of challenges. Biocompatibility and safety are one of the key issues, as many materials can cause inflammatory reactions or rejection by the body. Also, the wear resistance and mechanical properties of biomaterials are not always satisfactory, especially in the case of polymer and biodegradable variants that often lack sufficient strength and durability. High production costs represent an additional obstacle, as the development of new biomaterials requires significant investments in research, testing and production processes. In addition, regulatory and ethical issues play a key role, as biomaterials must undergo strict procedures before being approved for use, especially in medical applications. Biologically based materials, which include genetic engineering and synthetic biology, also raise ethical questions regarding their safety and environmental impact. Although biomaterials offer environmental benefits, their production can be energy-intensive and environmentally problematic. There is a need to develop sustainable methods of extraction and processing of biomaterials in order to reduce the negative impact on the environment. Long-term stability and degradation of biomaterials is also a challenge, as some biodegradable materials degrade too quickly, while others have too long a degradation period, which may be disadvantageous for certain

applications. In addition, the mass production of biomaterials and their scalability are still not at a satisfactory level. Production of biomaterials in large quantities and at competitive prices remains a challenge, and increasing production capacity and optimizing technology are key to their wider industrial application. Despite the challenges, the future of biomaterials promises revolutionary changes in medicine, industry and science. Further development of biocompatible materials, nanotechnology, 3D printing and regenerative medicine opens the door to new possibilities. With further progress, biomaterials will become the standard in many industries, contributing to sustainable and innovative production. The long-term development of biomaterials will depend on an interdisciplinary approach combining engineering, biology, chemistry and medicine. Research is increasingly directed towards biomimetic materials that imitate natural structures and processes in order to improve their efficiency and functionality. Advances in artificial intelligence and computational simulation are expected to contribute to the optimization of biomaterial design, reducing the need for lengthy experimental trials. The development of self-sustaining biomaterials with the possibility of recycling or regeneration is becoming crucial for environmentally friendly industrial processes. Biomaterials based on renewable resources, such as plant polymers, natural proteins and biodegradable composites, are particularly interesting, as they reduce dependence on fossil fuels and chemically intensive production processes. Industry is increasingly turning to a circular economy, where biomaterials can play a significant role in reducing waste and increasing resource utilization. The application of biomaterials in biomedical devices and implants opens up new possibilities for regenerative medicine, especially in the field of tissue engineering and personalized therapy. Organs on a chip, artificial blood vessels and biosensors using biomaterials will enable more accurate diagnostics and therapy, which will improve the quality of healthcare. In addition, the development of bionanotechnology enables the creation of multifunctional biomaterials that can simultaneously deliver drugs, detect diseases and participate in the healing process. The industrial application of biomaterials in the automotive and aviation industries has the potential to reduce the weight of vehicles and improve their performance, thus contributing to the reduction of fuel consumption and emissions of harmful gases. Using high-performance biomaterials, it is possible to develop structural components with better mechanical properties and greater resistance to material fatigue. The construction industry is also increasingly using biomaterials in the development of environmentally sustainable constructions, with the aim of improving energy efficiency and durability of buildings. In the field of the textile industry, biomaterials play a key role in the development of sustainable fabrics that are biodegradable, antimicrobial and more wear-resistant. Advances in the development of biofibers and nanostructured materials enable the production of smart clothing with sensors for monitoring physiological parameters, which can be used for medical and sports purposes. However, there is a need for further research to make biomaterials even more efficient, affordable and scalable for mass production.

Challenges involving controlled degradation, long-term biocompatibility, and integration with existing technologies must be addressed through advanced synthesis and processing methods. Future development will depend on the support of scientific institutions, industry and government policies that encourage innovation in the field of biomaterials. It is predicted that in the coming decades, biomaterials will become irreplaceable in key industries, and their further development will lead to new technological revolutions. The development of sustainable and functional biomaterials enables the transition to more environmentally friendly technologies that will reduce the negative impact on the environment in the long term and improve the quality of life. With accelerated progress in science and technology, biomaterials will become a ubiquitous part of everyday life, opening new horizons for industry, medicine and society as a whole.

#### **4. CONCLUSION**

The future of biomaterials promises revolutionary changes in medicine, industry and science, but there are significant challenges to overcome. Research in the field of biocompatibility, nanotechnology, 3D printing and regenerative medicine opens the door to new possibilities. With further development, biomaterials will become a standard in many industries, contributing to sustainable and innovative production. Biomaterials are becoming increasingly important in the modern engineering industry as they offer ecological and sustainable alternatives to traditional materials. The advantages of biomaterials include biodegradability, lower toxicity, lower energy production costs and the possibility of recycling. Their application is wide, from the automotive and aerospace industries to the electrical industry, and they are used in composites, plastics and packaging. However, biomaterials face challenges, such as lower mechanical resistance and higher production costs, which is why additional research is needed. However, it is expected that advanced biomaterials with better properties will be developed in the future, indicating their crucial importance for a sustainable industry. Biomaterials are key to reducing dependence on fossil resources and reducing the negative impact on the environment. Although they face performance and cost-effectiveness challenges, ongoing research and development allow for improvements in their use. In the future, the development of new biomaterials with improved mechanical properties and longer durability will contribute to greater efficiency and sustainability in the engineering industry. The use of biomaterials lays the foundations for more sustainable production and reduction of the environmental footprint of the industry. Given the global need to reduce CO<sub>2</sub> emissions and conserve resources, biomaterials will play a key role in shaping the future of the industrial sector. With continuous advances in technology and materials, biomaterials will increasingly replace conventional materials in many industries. This trend enables the development of lighter, more environmentally friendly and energy efficient products. Although there are currently limitations in their application due to cost and specific characteristics, the rapid development of new technologies and production methods can significantly reduce these obstacles. Given the growing pressure on industry to

become more sustainable, biomaterials will play a key role in reshaping production processes, creating synergy between technology and environmental conservation. In this context, investments in the research of biomaterials and the development of new applications are not only a trend, but also a necessity for the future of the industry.

## REFERENCES

- [1] Sharma, P., & Singh, R. K. (2020). *Biomaterials in engineering applications: Advances and challenges*. *Materials Today: Proceedings*, 21(1), 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.103>
- [2] Ravi, S., & Zhai, L. (2019). *Biomaterials in sustainable engineering*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 140, 29-50. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.02.004>
- [3] Kumar, S., & Gupta, P. (2018). *Advances in bio-based materials and their role in the modern manufacturing industry*. *Materials & Design*, 148, 292-302. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.043>
- [4] Liu, X., & Zhang, S. (2017). *Recent developments in the use of biomaterials for automotive applications*. *Journal of Materials Science*, 52(4), 2078-2090. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0732-0>
- [5] Pereira, H. C., & Silva, F. (2021). *Biomaterials in the aerospace industry: Trends, challenges, and opportunities*. *Composites Science and Technology*, 212, 108838. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108838>
- [6] Patel, H., & Bajpai, A. K. (2020). *Green biomaterials in manufacturing and industry: Opportunities and challenges*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(4), 1189-1202. <https://doi.org/10.1002/bbb.2095>
- [7] Bertini, F., & Orsini, F. (2019). *The role of biomaterials in the circular economy: Impacts and potential in sustainable production*. *Sustainability*, 11(6), 1523. <https://doi.org/10.3390/su11061523>
- [8] Wang, S., & Guo, H. (2020). *Recent trends in the application of biomaterials in industrial and manufacturing systems*. *Materials Science and Engineering A*, 783, 139211. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139211>
- [9] Saha, S., & Kumar, S. (2022). *Engineering with renewable biomaterials: New horizons in sustainable design*. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00275. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00275>
- [10] Thompson, R. J., & Khan, S. A. (2018). *Application of bio-based composites in the automotive industry: A review*. *Journal of Composite Materials*, 52(14), 1887-1903. <https://doi.org/10.1177/0021998318793313>



**Predrag Pravdić, Violeta Dorđević** (*Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia*)

## **ECO-MATERIALS AND ECO-TECHNOLOGIES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

**Abstract:** *In modern engineering, increasing attention is being paid to environmentally friendly materials and technologies that reduce the negative impact of industry on the environment. Eco-materials have become a key factor in reducing this negative impact, as they help minimize waste, energy consumption, and pollution. Eco-technologies also play a significant role in mitigating the environmental consequences of industrial processes. By using these technologies, industries can reduce their carbon footprint and improve sustainability. The integration of eco-materials and technologies is essential for achieving long-term environmental preservation and sustainable industrial practices. This contributes to the protection of the planet and ensures responsible development.*

**Keywords:** *eco-materials, eco-technologies, engineering, environment*

**Анотація:** *У сучасній інженерії дедалі більше уваги приділяється екологічно безпечним матеріалам і технологіям, що знижують негативний вплив промисловості на навколишнє середовище. Екоматеріали стали ключовим чинником зменшення цього впливу, оскільки сприяють мінімізації відходів, енергоспоживання та забруднення. Екотехнології також відіграють важливу роль у пом'якшенні екологічних наслідків виробничих процесів. Завдяки використанню таких технологій промислові підприємства можуть зменшити вуглецевий слід та підвищити рівень сталості. Інтеграція екоматеріалів і екотехнологій є необхідною умовою досягнення довготривалого збереження довкілля та впровадження сталих промислових практик. Це сприяє захисту планети та забезпечує відповідальний розвиток.*

**Ключові слова:** *ekomateriali, ekotehnologiji, inženjerija, dovkilja*

### **1. INTRODUCTION**

In modern mechanical engineering, increasing importance is being attached to environmentally friendly materials and technologies that reduce the negative impact of industry on the environment. The development of new materials and the optimization of production processes have become key factors in achieving sustainable development. Industry is facing the challenges of reducing resource consumption, energy efficiency and reducing harmful gas emissions. The use of eco-materials allows for greater durability and reduced consumption of raw materials, while eco-technologies enable more efficient production and recycling. Sustainable solutions in mechanical engineering contribute to reducing waste and improving energy efficiency in various industrial sectors. The integration of modern technologies into production processes allows for more precise processing of materials with lower energy consumption. Recycling and reuse of materials are becoming a standard in industry, reducing the ecological footprint of production. Increased use of renewable energy sources contributes to reducing dependence on fossil fuels. Innovations in the field of nanomaterials and

composites enable the development of lighter and stronger structures. Industrial processes are increasingly directed towards optimizing resource consumption and minimizing harmful waste. The use of biodegradable materials reduces pollution and contributes to the preservation of natural ecosystems. Digitalization and automation of production processes further increase the efficiency and precision of processing. The development of intelligent systems for controlling energy consumption is becoming key in reducing industrial impact on the environment. Modern approaches in mechanical engineering are aimed at creating a circular economy in which resources are used sustainably. Preservation of natural resources and environmental awareness are becoming priorities in all sectors of the mechanical engineering industry. Ecological materials (eco-materials) and ecological technologies (eco-technologies) in mechanical engineering are key factors in the sustainable development of industry, reducing negative environmental impact and improving energy efficiency. Their application covers a wide range of areas, from design and production to recycling and reuse of materials. Ecological aspects in mechanical engineering are becoming increasingly important due to global environmental challenges and the need for sustainable development. The industry is adapting to new standards that encourage the reduction of greenhouse gas emissions and the introduction of environmentally friendly technologies. Modern materials enable greater efficiency and a longer product life, thus reducing the need for frequent replacement and production of new components. Energy efficiency in production processes is achieved by applying advanced management systems and optimizing the use of resources. The integration of eco-technologies into production lines contributes to reducing electricity and water consumption. The use of digital simulations and modeling enables more precise planning and reduction of industrial waste. Green production processes reduce the need for harmful chemicals and hazardous waste materials. The development of electric and hybrid machines contributes to reducing fossil fuel consumption and reducing carbon dioxide emissions. Sustainability is becoming a key factor in the competitiveness of industrial companies in the global market. The use of secondary raw materials from waste materials reduces the need for the exploitation of natural resources. Advanced processing methods, such as additive manufacturing, enable more efficient use of materials without excess waste. Industrial robotization enables more precise production while reducing the ecological footprint. The use of smart materials achieves greater wear resistance and reduces the need for additional protection treatments. Recycling of industrial components is becoming an economically and environmentally viable strategy for reducing waste. The future of mechanical engineering lies in the synergy of technological innovation and environmental responsibility, thus ensuring the long-term sustainability of industrial processes.

## **2. ECO-MATERIALS IN MODERN MECHANICAL INDUSTRY – ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND PROPERTIES**

Environmentally friendly materials in mechanical engineering are becoming a key factor in reducing the negative impact of industry on the environment. The development of new materials enables greater durability, reduced energy consumption and more efficient use of resources. The use of recycled and renewable materials contributes to reducing waste and preserving natural raw materials. Industry is increasingly relying on materials that have a smaller environmental footprint during production and exploitation. Technological progress enables the improvement of the mechanical and thermal properties of materials while reducing emissions of harmful gases. Engineers are developing lightweight but strong materials that increase the energy efficiency of transport and industrial systems. Advanced processing methods enable the production of components with reduced use of raw materials and waste. Reducing the use of conventional plastics and introducing biodegradable alternatives are becoming key steps towards sustainable production. The application of innovative composites increases the wear resistance of materials and extends the life of products. Industrial recycling enables the reuse of metals and polymers, thereby reducing costs and the need to exploit new resources. Materials with improved properties enable the reduction of fuel consumption and increase the performance of machines. Intelligent materials adapt to changes in operating conditions, thereby improving efficiency and reducing maintenance costs. Ecological materials in mechanical engineering represent the basis for the development of new, sustainable technologies that meet environmental standards. Their application contributes to environmental protection without compromising the quality and functionality of industrial products. It is expected that further development of eco-materials will enable even greater application of sustainable solutions in all branches of mechanical engineering. The development of ecological materials in mechanical engineering enables a reduction in energy and resource consumption, thus achieving greater sustainability of production processes. Industry is increasingly turning to alternative materials that have a less negative impact on the environment. Reducing carbon dioxide emissions during the production and processing of materials has become one of the main goals of modern mechanical engineering. The use of advanced materials improves the mechanical properties of products, thereby reducing the need for frequent replacement of parts. Ecological materials enable better recycling and reuse, thus reducing the amount of waste in industry. The use of renewable raw materials helps reduce dependence on fossil fuels and the exploitation of natural resources. Engineering approaches in the development of new materials are aimed at improving resistance, durability and energy efficiency. The development of high-performance composite materials enables weight reduction, which is particularly important in the automotive and aerospace industries. Modern materials are designed to be compatible with environmental standards and energy efficiency requirements. The industrial sector is increasingly investing in research and development of materials that can be recycled without losing their basic properties. The application of nanotechnology allows for the improvement of

material properties at the microscopic level, thus achieving greater resistance and durability. The development of biodegradable polymers opens up new possibilities for the production of components that do not pollute the environment after use. Environmentally friendly metal alloys reduce the need for toxic additives in the production process. The integration of smart materials into industrial processes enables automatic adaptation to operating conditions, thus improving the efficiency and reliability of the system. Further progress in the field of eco-materials will enable the industry to maintain high production standards with minimal environmental impact. Eco-materials are materials used in industry that have minimal negative environmental impact throughout their life cycle.

These can be:

1. Biodegradable materials – materials that can naturally break down in the environment, reducing waste and pollution.
  - Examples: polylactic acid (PLA), biodegradable plastics, natural fibers.
2. Recycled materials – materials that are reused or recycled to reduce raw material and energy consumption.
  - Examples: recycled steel, aluminum, plastics, composites based on waste fibers.
3. Lightweight and highly efficient structural solutions – materials that enable lower mass of structures, thereby reducing fuel consumption and emissions.
  - Examples: aluminum alloys, titanium, magnesium, carbon fibers.
4. Nanomaterials – improve the mechanical, chemical and thermal properties of traditional materials, making them more resistant and energy efficient.
  - Examples: graphene, nanocomposites, ceramic nanomaterials.
5. Smart materials – materials that can change their properties under the influence of external factors, reducing the need for additional processing or replacement.
  - Examples: thermochromic alloys, self-healing polymers, piezoelectric materials.

The development of environmentally friendly materials in mechanical engineering plays a key role in reducing the negative consequences of industrial production. The use of sustainable materials allows for resource optimization and more efficient management of industrial waste. Advanced materials with improved properties allow for the reduction of the mass of structures without losing strength and durability. Environmentally friendly raw materials reduce the use of toxic chemicals and contribute to a safer working environment. The use of recycled metals and polymers helps reduce the exploitation of natural resources and the energy required for processing. The development of nanomaterials opens up new opportunities in industry, as it enables the creation of products with exceptional mechanical and thermal properties. Eco-composites, which combine natural and synthetic fibers, are increasingly used in the automotive and construction industries.

Advantages of eco-materials in mechanical engineering:

1. Reduced ecological footprint – Eco-materials reduce emissions of harmful gases and the consumption of non-renewable resources, thus contributing to environmental protection.
2. Energy efficiency – Their application allows for reduced energy consumption in production and operation, thus improving the overall efficiency of the industry.
3. Durability and resilience – Many eco-materials have improved mechanical properties, which extends the life of the product and reduces the need for frequent replacement.
4. Recycling and reuse – Most eco-materials can be recycled, thus reducing the amount of industrial waste and the need for new raw materials.
5. Less pollution during processing – The production and processing of eco-materials often require fewer toxic chemicals and generate less waste compared to conventional materials.
6. Reduced weight of structures – Advanced composite and nanomaterials enable the production of lighter components that improve performance in the transportation industry.
7. Use of renewable resources – Biodegradable polymers and natural fibers help reduce dependence on fossil fuels and non-renewable raw materials.
8. Increased occupational safety – Due to the reduction in the use of harmful materials, the working environment becomes healthier and safer for workers.

Disadvantages of eco-materials in mechanical engineering:

1. High production cost – Many eco-materials still have a higher cost compared to traditional materials, which can be an economic challenge.
2. Limited mechanical properties – Some eco-materials, such as biodegradable polymers, may have lower strength or wear resistance compared to conventional alternatives.
3. Technological limitations – Production processes for certain eco-materials are not yet sufficiently developed for mass production in all branches of mechanical engineering.
4. Limited shelf life – Some eco-materials, especially biodegradable ones, have a shorter shelf life and may degrade more quickly under adverse conditions.
5. Recycling problems – Although many eco-materials are recyclable, their processing can be expensive and require specialized methods.
6. Less availability of raw materials – Some renewable materials are not widely available, which can make their application in large-scale industrial processes difficult.
7. Need for new technologies – The introduction of eco-materials requires the adaptation of existing production systems, which can be expensive and time-consuming.

8. Incompatibility with extreme conditions – Some eco-materials may have reduced resistance to high temperatures, moisture or chemical influences, which limits their use in demanding industrial conditions.

Although eco-materials represent the future of the mechanical engineering industry, their widespread application depends on the further development of technologies and economic factors. Using materials with a smaller ecological footprint reduces production costs and increases the competitiveness of companies. The introduction of biodegradable materials into production processes reduces the long-term accumulation of waste in the environment. Intelligent materials that can change their properties depending on external factors improve product functionality and reduce the need for additional processing. The development of eco-materials enables the optimization of the energy efficiency of machines and devices in various industries. The industry is increasingly relying on renewable sources of materials to reduce dependence on non-renewable resources. The application of additive manufacturing, or 3D printing, achieves maximum material utilization with minimal industrial waste. Improvements in the formulation of lubricants and coatings enable a longer service life of machine parts while reducing pollution. The future of the mechanical engineering industry depends on innovations in the field of eco-materials, because they enable sustainable development and environmental preservation.

### **3. ECO-TECHNOLOGIES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING – ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND FEATURES**

Modern production processes are aimed at optimizing resource consumption, thereby reducing industrial waste. The use of renewable energy sources in mechanical production contributes to sustainable development and reduced dependence on fossil fuels. Automation and digitalization enable more precise process control, thereby reducing material and energy consumption. The use of recyclable and biodegradable materials in industry contributes to reducing the ecological footprint of products. The development of advanced processing technologies enables more efficient processing of raw materials with minimal energy consumption. The application of 3D printing reduces waste and enables the production of complex components with less material consumption. Intelligent systems for managing production processes enable automatic adaptation to operating conditions, thereby increasing efficiency. Engineers are increasingly developing technologies that use environmentally friendly alternatives for lubricants, coolants and coatings. Optimization of aerodynamic and thermal properties of industrial systems contributes to reduced energy consumption and greater equipment reliability. Advanced filters and purification systems reduce the emission of pollutants into the atmosphere and waterways. The development of lighter and more durable materials enables a reduction in product mass, which contributes to lower fuel consumption in the transport industry. The integration of renewable energy sources into industrial systems is becoming increasingly popular due to its long-term environmental and economic benefits. Further progress in eco-technologies in mechanical engineering will

enable sustainable production that reduces environmental impact while improving the performance and efficiency of industrial systems. Eco-technologies in mechanical engineering enable waste reduction through more efficient production and material processing processes. The development of smart sensor systems helps optimize energy and resource consumption in industry. The introduction of eco-friendly cooling systems reduces emissions and improves working conditions. Advanced processing methods, such as laser and ultrasonic cutting, enable more precise and energy-efficient production. The industry is increasingly using technologies that reduce the use of water and chemicals in processing and cleaning processes. The development of hybrid and electric drive systems in mechanical engineering contributes to reducing fossil fuel consumption. Optimization of the design of machine parts through the application of bionics reduces material consumption and increases efficiency. Advanced coating and material protection methods extend the life of products and reduce the need for frequent replacement. The integration of artificial intelligence into production processes enables more precise planning and reduction of material losses. The development of a circular economy in the mechanical engineering industry enables the reuse of components and raw materials, thereby reducing the environmental footprint. Modern filtration and wastewater treatment systems contribute to the protection of natural resources. Digital simulations and virtual testing enable the reduction of material consumption before serial production. The use of biological materials in industrial processes opens up new opportunities for reducing the use of synthetic and non-renewable resources. Ecological innovations in mechanical engineering not only improve the sustainability of production but also reduce the operating costs of the industry. Further development of eco-technologies leads to fully integrated systems that combine ecological materials, energy efficiency and automated processes for maximum sustainability. Eco-technologies in mechanical engineering include various processes and methods that reduce the ecological footprint of the production and exploitation of mechanical systems.

Energy efficiency in production:

- Use of renewable energy sources in industry (solar and wind power plants).
- Optimization of energy consumption through advanced management systems.
- Use of energy-efficient machines and tools with reduced electricity consumption.

Green production processes:

- Additive technologies (3D printing) – enable waste reduction because material is added layer by layer, without excess.
- Cold processing of materials – reduces the need for heat treatment and reduces carbon dioxide emissions.

- Environmentally friendly processing methods – such as dry processing, cryogenic processing and electrochemical processing, reduce the consumption of lubricants and coolants.

Eco-machinery and transport:

- Development of electric and hybrid vehicles with reduced gas emissions.
- Application of lightweight materials in vehicle and aircraft construction to improve energy efficiency.
- Intelligent transport systems to optimize fuel consumption.

Recycling and circular economy in mechanical engineering:

- Reuse of metal and plastic components in industry.
- Programs for the return and processing of waste industrial materials.
- Use of environmentally friendly lubricants and coolants that can be recycled.

Advantages of eco-technologies in mechanical engineering:

1. Reducing the negative impact on the environment – The application of eco-technologies enables the reduction of harmful gas emissions, pollution and waste, which contributes to the preservation of natural resources.
2. Increasing energy efficiency – The use of energy-efficient technologies, such as renewable energy sources and advanced energy management systems, enables the reduction of energy consumption in industry.
3. Optimizing production processes – Automation and digitalization of production enable more precise control, reducing waste and unnecessary consumption of resources.
4. Reducing costs – In the long term, the introduction of eco-technologies can reduce operating costs, such as energy, material and waste costs.
5. Sustainable production – Eco-technologies enable the use of renewable materials and resources, reducing dependence on non-renewable sources and making production more sustainable.
6. Increased competitiveness – Companies that implement eco-technologies often gain competitive advantages, as consumers increasingly prefer products with a smaller ecological footprint.
7. Innovation and the development of new markets – The development of eco-technologies stimulates innovation in industry and opens up new markets for products that are more environmentally friendly.
8. Worker health and safety – Technologies that reduce the use of toxic materials and harmful chemicals improve working conditions and the health of employees.
9. Increasing product lifespan – Using technologies that improve the resistance of materials can increase the durability of products and reduce the need for frequent replacement.
10. Encouraging recycling and reuse – Eco-technologies enable more efficient recycling of materials, thereby reducing the need for new raw materials and reducing waste.

Disadvantages of eco-technologies in mechanical engineering:



1. High initial costs – The introduction of eco-technologies may require large investments in research, development and adaptation of existing production systems.
2. Technical limitations – Some eco-technologies are not yet sufficiently developed for mass application or have technical limitations in terms of performance.
3. Limited availability of resources – Renewable materials and technologies may be more expensive and less available compared to traditional materials, which may limit their application.
4. Need for new knowledge and training – The introduction of new technologies requires professional training of the workforce and orientation of companies towards new business practices.
5. Recycling problems – Although many technologies are aimed at recycling, some materials and products may be difficult to effectively reuse.
6. Compatibility with existing systems – Integrating new eco-technologies into existing production systems can be challenging and expensive.
7. Insufficient infrastructure development – The infrastructure for the application of environmental technologies, such as recycling and the use of renewable energy sources, is still not sufficiently developed in many regions.
8. Performance degradation – Some environmental technologies may have lower performance compared to conventional ones, which may limit their application in more demanding industries.
9. Regulatory barriers – In many countries, legislative and regulatory barriers may slow the application of environmental technologies in industry.
10. Possible long-term impacts – The introduction of new technologies may lead to unpredictable long-term environmental or social consequences that are difficult to predict at the development stage.

Environmental technologies in mechanical engineering play a key role in modernizing the industry and aligning production with the principles of sustainable development. Reducing carbon dioxide emissions through improved combustion processes and energy optimization is becoming a priority in many sectors. The development of environmentally friendly lubricants and coolants allows for a longer service life of machine parts while reducing pollution. The introduction of automated waste management systems contributes to more efficient recycling and waste reduction in industrial plants. Intelligent manufacturing systems use sensors and artificial intelligence to optimize resource and energy consumption. The use of lightweight and durable materials allows for a reduction in fuel consumption in the transport industry and an increase in energy efficiency. The use of additive technologies, such as 3D printing, enables precise production while minimizing excess material. The development of biodegradable materials in mechanical engineering reduces the negative impact of waste on the environment. Increasing the efficiency of renewable energy sources in industry contributes to reducing dependence on fossil fuels. Advanced carbon capture and

storage systems help reduce greenhouse gas emissions. Optimizing the shape and structure of machine parts through digital simulations contributes to a more efficient use of materials. The development of new surface treatment methods allows for a reduction in friction and an increase in the energy efficiency of the system. The introduction of environmental standards and certificates encourages the industry to apply sustainable technologies and materials. The digitalization of the production process enables precise monitoring of resource consumption and reduction of losses. The future of mechanical engineering lies in the synergy of environmental technologies, innovations in materials and energy efficiency, thus achieving a balance between industrial development and environmental protection.

#### **4. CONCLUSION**

Eco-materials in mechanical engineering represent a key step towards sustainable industrial production, as they enable the reduction of negative environmental impacts through the use of renewable, biodegradable and recycled materials. These materials not only reduce emissions and waste, but also improve the energy performance of products, extend their lifespan and reduce the need for frequent replacement. The use of eco-materials allows the industry to comply with increasingly stringent environmental regulations and increased market demands for sustainable products. Although there are challenges such as higher initial costs, insufficient availability and technical limitations, the long-term benefits, such as reducing resource consumption and environmental protection, make these materials very important for the future development of the industry. In the future, as technology develops, eco-materials will become the standard in production, allowing the industry to achieve a balance between innovation, efficiency and preserving the ecological balance. These materials not only reduce the ecological footprint, but also open the door to new innovations in the industry and improve economic and environmental results in the long term. Eco-materials in mechanical engineering represent the basis for the transformation of the industry towards sustainability and environmental responsibility. Their application allows for the reduction of the negative impact on natural resources, which is crucial in facing global challenges such as climate change and the depletion of raw materials. The use of renewable, recycled and biodegradable materials contributes to preserving the ecological balance, reducing harmful gas emissions, pollution and waste. Also, the introduction of these materials allows for the production of more durable and efficient products, which reduces the need for their frequent replacement. Although the initial costs may be higher, the long-term savings in terms of reduced resource consumption, energy efficiency and reduced pollution make eco-materials a cost-effective solution for the industry. Technical limitations and barriers to availability still pose challenges, but as technology advances, the use of these materials is expected to become increasingly common and affordable. With increasing interest in sustainability and environmental protection, eco-materials will continue to play a key role in the evolution of the mechanical engineering industry, creating products that are more environmentally friendly,

energy efficient and long-lasting. Given the advantages they bring, eco-materials are an inevitable part of the future of production processes, thus contributing to preserving the planet for future generations. Environmental technologies in mechanical engineering represent a key component of sustainable industrial development, as they enable the reduction of negative environmental impacts, improvement of energy efficiency and optimization of resources. The application of eco-technologies contributes to the reduction of harmful gas emissions, reduction of energy and resource consumption, and in the long term reduces operating costs and improves competitiveness. By introducing renewable materials, energy-efficient systems and innovations in production processes, the industry becomes more environmentally friendly and sustainable. However, the introduction of these technologies also carries certain challenges, such as high initial costs, technical limitations and the need for workforce training. Although there are also disadvantages in application, the long-term benefits in terms of environmental protection and economic savings make eco-technologies an indispensable part of the future development of the mechanical engineering industry. With further improvement of technologies, development of infrastructure and increased awareness of environmental issues, it is expected that eco-technologies will become a standard in industrial production, thereby contributing to the global effort to protect the planet.

#### REFERENCES

- [1] Chryssakis, G., & Zoulia, O. (2016). *Eco-friendly materials in engineering applications: Challenges and future trends*. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 14-22. DOI: 10.1016/j.msea.2016.05.059
- [2] Schumacher, E., & Treutler, K. (2020). *Advances in green manufacturing: Sustainable processes and materials*. Springer. ISBN: 978-3030388872
- [3] Taha, Z., & Pradhan, R. (2019). *Sustainable manufacturing and eco-materials in the modern industrial economy*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-97316-1
- [4] Kühtz, M., & Reuter, M. (2021). *Green materials for sustainable engineering applications: Trends and challenges*. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128645. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128645
- [5] Gupta, A., & Sharma, P. (2017). *Eco-materials and green technology in manufacturing and industrial design*. Elsevier. ISBN: 978-0128041754
- [6] Pérez, C., & García, R. (2018). *Sustainability in manufacturing: Case studies of eco-materials and eco-technologies*. *Procedia CIRP*, 69, 508-513. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.056
- [7] Sharma, S., & Jha, S. (2020). *Eco-design and sustainability in manufacturing processes: Integrating eco-materials and green technologies*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-32531-0
- [8] Bhatia, S., & Zafar, H. (2019). *Recent advances in eco-friendly materials and manufacturing processes: Towards sustainability in industrial applications*. *Journal of Materials Science*, 54(23), 14589-14608. DOI: 10.1007/s11041-019-02980-3

**Predrag Pravdić, Violeta Dorđević** (*Academy of professional studies Kruševac, Department of technical and technological studies in Kruševac, Serbia*)

## **TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN PROTECTIVE AND WORK EQUIPMENT IN MODERN INDUSTRY**

**Abstract:** *Protective and work equipment in modern industry plays a crucial role in ensuring the safety, efficiency, and comfort of workers across various sectors. High-tech sensors and Internet of Things (IoT) devices continuously monitor air quality, temperature, and structural integrity, ensuring that workplaces remain safe at all times. The role of protective and work equipment in modern industry extends beyond just physical protection; it also enhances worker confidence, efficiency, and overall job satisfaction.*

**Keywords:** *Protective and work equipment, modern industry, IoT*

**Анотація:** *Засоби індивідуального захисту та виробниче обладнання в сучасній промисловості відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки, ефективності та комфорту працівників у різних галузях. Високотехнологічні сенсори та пристрої Інтернету речей (IoT) безперервно контролюють якість повітря, температуру та структурну цілісність, гарантуючи постійну безпеку робочого середовища. Роль захисного та виробничого обладнання в сучасній індустрії виходить за межі лише фізичного захисту; воно також сприяє зростанню впевненості працівників, підвищенню продуктивності та загального задоволення від праці.*

**Ключові слова:** *захисне та виробниче обладнання, сучасна промисловість, Інтернет речей (IoT)*

### **1. INTRODUCTION**

Protective and work equipment in modern industry plays a crucial role in ensuring the safety, efficiency, and comfort of workers across various sectors. With the advancement of technology, industrial workplaces have adopted sophisticated protective gear that minimizes risks associated with hazardous environments. Workers are exposed to numerous dangers, including mechanical injuries, chemical exposure, extreme temperatures, and airborne contaminants, making personal protective equipment (PPE) essential for their well-being. Modern industry prioritizes the development of ergonomic and high-performance protective gear to enhance productivity without compromising safety. Materials used in protective clothing and equipment have evolved significantly, incorporating lightweight, durable, and fire-resistant fabrics that provide superior protection. Advanced helmets, gloves, goggles, and footwear are designed to withstand harsh conditions while offering maximum comfort. Furthermore, automated and smart safety systems have been integrated into industrial settings to monitor hazards in real time and alert workers to potential dangers. The implementation of strict safety regulations has driven industries to continuously improve their protective equipment standards. Employers are required to provide adequate training on the proper use of protective gear, ensuring that workers understand its importance and functionality. In some industries, wearable

technology has become an integral part of workplace safety, incorporating sensors and communication devices to detect environmental hazards and track workers' health conditions. Beyond personal protective equipment, work equipment in modern industry has undergone significant innovation to enhance operational efficiency and reduce workplace accidents. Machinery and tools are now designed with advanced safety features, such as automatic shut-off mechanisms and protective enclosures, to prevent injuries. Robotics and artificial intelligence have also contributed to safer working conditions by automating high-risk tasks, reducing human exposure to hazardous processes. The integration of smart textiles and adaptive protective gear has further revolutionized workplace safety. Some protective clothing is now equipped with temperature regulation, impact absorption, and real-time monitoring systems that adjust to changing environmental conditions. The use of exoskeletons in physically demanding industries helps workers reduce strain and fatigue, improving both safety and performance. Overall, protective and work equipment in modern industry continues to evolve, driven by technological advancements and stringent safety standards. The combination of innovative materials, smart systems, and automated safety solutions contributes to a safer and more efficient work environment, ensuring that workers remain protected while performing their duties effectively. In addition to traditional protective gear, modern industry has embraced the use of automation and artificial intelligence to enhance worker safety. Smart helmets, for example, are now equipped with augmented reality (AR) displays, communication systems, and sensors that detect harmful gases, temperature changes, or excessive noise levels. These innovations allow workers to stay informed about potential hazards in real time, reducing the risk of accidents. Similarly, safety glasses with built-in heads-up displays provide essential data without distracting workers from their tasks, improving both efficiency and situational awareness. Another significant advancement in protective equipment is the use of biometric monitoring systems. Wearable devices integrated into protective clothing can track vital signs such as heart rate, body temperature, and hydration levels. These systems help prevent health issues caused by heat stress, overexertion, or exposure to toxic substances by alerting workers and supervisors to potential problems before they become serious. Such technology is particularly beneficial in industries like construction, mining, and manufacturing, where extreme working conditions pose significant health risks. Work equipment itself has also become more adaptive and user-friendly, incorporating ergonomic designs that minimize strain and fatigue. Tools and machinery are now designed with vibration-dampening systems, improved grips, and adjustable settings to accommodate different users. The use of collaborative robots, or cobots, has further improved workplace safety by assisting workers in physically demanding tasks, reducing the risk of musculoskeletal injuries. These robots are programmed to work alongside humans, recognizing their movements and adjusting accordingly to prevent collisions or accidents.

## **2. HIGH-TECH SENSORS AND IoT DEVICES AS PROTECTIVE AND WORK EQUIPMENT**

Beyond individual protective gear, industrial workplaces have implemented comprehensive safety systems that include advanced ventilation, fire suppression, and emergency response technologies. High-tech sensors and Internet of Things (IoT) devices continuously monitor air quality, temperature, and structural integrity, ensuring that workplaces remain safe at all times. Automated alert systems can quickly notify workers and management of potential dangers, allowing for rapid evacuation or corrective actions to prevent disasters. The introduction of exoskeleton technology has been particularly transformative in physically demanding industries such as construction, logistics, and manufacturing. These wearable robotic suits assist workers by providing mechanical support, reducing strain on muscles and joints, and preventing injuries caused by repetitive motions or heavy lifting. Exoskeletons not only enhance safety but also improve productivity by allowing workers to perform tasks more efficiently and with less physical exhaustion. Sustainability has also become an essential factor in the development of protective and work equipment. Many companies are now focusing on eco-friendly materials and production methods to reduce the environmental impact of protective gear. Recyclable, biodegradable, and non-toxic materials are being used in the manufacturing of gloves, helmets, and protective clothing, ensuring that workplace safety does not come at the cost of environmental harm. Additionally, energy-efficient tools and machinery contribute to sustainable industrial practices while maintaining high safety standards. Training and education have also evolved alongside advancements in protective equipment. Virtual reality (VR) and augmented reality (AR) simulations are now being used for safety training, allowing workers to experience hazardous situations in a controlled, risk-free environment. These interactive training methods improve knowledge retention and ensure that workers are well-prepared to handle emergencies and use protective equipment correctly. Overall, the continuous innovation in protective and work equipment is shaping a safer and more efficient industrial landscape. With the integration of smart technology, automation, and ergonomic design, modern industry is not only protecting its workforce but also enhancing productivity and sustainability. As industries continue to evolve, the development of advanced safety solutions will remain a top priority, ensuring that workers can operate in secure and comfortable environments. Protective and work equipment plays a fundamental role in modern industry by safeguarding workers from potential hazards and ensuring compliance with safety regulations. As industrial processes become more complex and technologically advanced, the need for specialized protective gear has increased significantly. Workers are frequently exposed to risks such as extreme temperatures, toxic chemicals, mechanical injuries, and high-noise environments, making reliable protective equipment essential for maintaining health and safety. Innovations in material science have led to the development of lightweight, durable, and highly resistant protective gear that enhances both safety and

comfort. Fire-resistant clothing, impact-resistant gloves, and anti-static footwear are designed to mitigate workplace dangers while allowing for ease of movement and prolonged use. Many industries now rely on smart helmets equipped with integrated communication systems and sensors that detect environmental hazards, providing workers with real-time safety alerts. Modern work environments require adaptive protective equipment that can respond to dynamic conditions. Some advanced protective suits feature temperature-regulating technology, helping workers maintain optimal body temperature in extreme heat or cold. High-tech respirators equipped with air-purifying filters ensure that workers in hazardous chemical environments can breathe safely without exposure to toxic substances. Similarly, noise-canceling earmuffs and visors with anti-glare coatings improve both safety and efficiency in high-risk sectors. Automation and robotics have influenced the evolution of protective gear, requiring the development of specialized equipment for human-robot collaboration. Workers operating alongside robotic systems need additional protection from mechanical impacts, unintended movements, and operational malfunctions. Wearable exoskeletons are increasingly being used in industries such as logistics and manufacturing to reduce strain and prevent musculoskeletal disorders caused by repetitive lifting or prolonged standing. The implementation of safety regulations has made it mandatory for industries to provide appropriate protective equipment to their employees. Governments and occupational health organizations establish strict guidelines to ensure that protective gear meets specific safety standards. Employers are responsible for not only supplying necessary equipment but also training workers on its proper use and maintenance. Failure to adhere to safety requirements can result in legal consequences, financial losses, and reputational damage for companies. Environmental sustainability has become a priority in the manufacturing of protective equipment, with many companies transitioning to eco-friendly materials. Biodegradable fabrics, recyclable helmets, and non-toxic coatings reduce industrial waste and lower the environmental impact of workplace safety measures. Some manufacturers have adopted circular economy practices, refurbishing used protective gear to extend its lifespan and reduce resource consumption. The integration of digital technologies into protective equipment has revolutionized workplace safety. Smart wearables embedded with biometric sensors can monitor workers' vital signs, alerting supervisors to signs of fatigue, dehydration, or heat stress. Augmented reality (AR) safety glasses provide workers with real-time instructions and hazard warnings, minimizing the risk of human error. IoT-enabled protective gear allows for remote monitoring, ensuring that safety protocols are followed and that workers remain in secure conditions. Ergonomic design has become a key consideration in the development of work equipment, ensuring that protective gear does not hinder productivity or cause discomfort. Modern industrial gloves offer flexibility and precision, allowing workers to perform delicate tasks while maintaining a high level of protection. Breathable fabrics and lightweight helmets improve comfort during extended use, reducing fatigue and increasing compliance with safety regulations. Adjustable

and customizable protective gear ensures a better fit, accommodating different body types and work environments. Workplace culture plays a crucial role in the effectiveness of protective equipment. When employees are encouraged to prioritize safety and properly use protective gear, workplace accidents decrease significantly. Regular safety drills, refresher courses, and incentive programs promote a proactive approach to hazard prevention. Managers and supervisors must set an example by adhering to safety standards, reinforcing a culture of responsibility and awareness. The role of protective and work equipment extends beyond individual safety, contributing to overall operational efficiency and business continuity. A well-protected workforce experiences fewer injuries, leading to reduced absenteeism, lower healthcare costs, and higher productivity levels. Companies that invest in state-of-the-art protective gear gain a competitive advantage by ensuring uninterrupted operations and fostering a reputation for workplace safety. Future advancements in protective equipment will likely include AI-powered predictive safety systems, self-repairing materials, and even more sophisticated wearable technology. Innovations in nanotechnology may lead to ultra-thin, high-strength protective fabrics that offer maximum resistance while remaining virtually weightless. As industries continue to evolve, the development of smarter and more efficient protective solutions will be essential in ensuring worker safety in increasingly complex work environments.

### **3. THE ROLE OF PROTECTIVE AND WORK EQUIPMENT IN MODERN INDUSTRY**

The role of protective and work equipment in modern industry extends beyond just physical protection; it also enhances worker confidence, efficiency, and overall job satisfaction. When employees feel safe and well-equipped, they can focus more on their tasks without fear of injury, leading to higher productivity and better quality of work. Companies that prioritize workplace safety and invest in high-quality protective gear also tend to experience lower turnover rates, as workers feel valued and supported. Another critical aspect of modern protective equipment is its adaptability to various industries and job roles. While construction workers require helmets, gloves, and reinforced boots to protect against falling objects and sharp materials, laboratory personnel rely on chemical-resistant suits, goggles, and respirators to safeguard against hazardous substances. In the food industry, protective clothing must meet strict hygiene standards, ensuring that contamination risks are minimized while still providing comfort and mobility for workers. Each industry has its own specific safety needs, and manufacturers of protective gear are constantly developing customized solutions to address these unique challenges. The digitalization of safety equipment has also introduced significant improvements in workplace security. Many industrial sites now use smart access control systems that require workers to wear RFID-enabled protective gear to enter hazardous areas. These systems ensure that only personnel with the proper training and equipment can access dangerous zones, reducing the likelihood of accidents caused by unprepared individuals. Additionally, real-time tracking of protective gear usage allows employers to monitor compliance and



ensure that safety protocols are being followed consistently. One of the most promising developments in protective equipment is the use of nanotechnology in material engineering. Advanced nanomaterials are being integrated into protective clothing and gear to provide enhanced resistance against heat, chemicals, and mechanical stress. Some nanofiber-based fabrics are designed to be self-cleaning, antimicrobial, and even capable of repairing minor damages on their own, significantly extending the lifespan of protective equipment. These innovations not only improve safety but also reduce long-term costs by minimizing the need for frequent replacements. Communication is another area where protective equipment has seen remarkable progress. Many industries now use helmets and vests equipped with built-in communication systems, allowing workers to stay in contact even in noisy or hazardous environments. Wireless headsets, noise-canceling microphones, and bone-conduction technology enable clear communication in settings such as construction sites, factories, and underground mining operations, where traditional communication methods might be ineffective. The psychological impact of modern protective equipment should not be overlooked. Wearing uncomfortable or outdated safety gear can create frustration and resistance among workers, leading to non-compliance and increased risk of injury. To address this, manufacturers are designing protective equipment with a focus on comfort, breathability, and lightweight materials that allow for greater freedom of movement. Custom-fit protective gear, tailored to individual body shapes and job requirements, is becoming more common, ensuring that workers can perform their tasks without unnecessary discomfort or restriction. Workplace culture also plays a significant role in the effectiveness of protective and work equipment. A strong safety culture, where both employers and employees recognize the importance of using protective gear correctly, leads to better adherence to safety protocols. Regular training sessions, safety drills, and incentive programs encourage workers to take safety seriously and foster a proactive approach to accident prevention. In industries where high-risk tasks are common, leadership involvement in promoting safety standards can make a significant difference in overall workplace security. As industries continue to evolve, so do the challenges associated with worker safety. The growing use of automation and robotics is changing the nature of workplace hazards, requiring new approaches to protective equipment design. While some traditional risks are being reduced through automation, new risks, such as cyber threats to industrial control systems and the need for human-machine collaboration, are emerging. Future developments in protective equipment will likely incorporate AI-driven predictive safety measures, wearable health monitors, and even exoskeletal enhancements to further reduce workplace injuries. Ultimately, the advancements in protective and work equipment are shaping a future where safety and efficiency go hand in hand. By integrating cutting-edge technology, ergonomic design, and sustainable materials, modern industry is creating safer working environments that support both human well-being and industrial progress. As research and development continue, protective equipment will become even more intelligent,

adaptable, and effective, ensuring that workers remain protected in an ever-changing industrial landscape. The future of protective and work equipment in modern industry is closely tied to technological innovation, regulatory advancements, and the growing emphasis on sustainability. As industries strive to create safer work environments, the integration of artificial intelligence (AI), machine learning, and the Internet of Things (IoT) is transforming how protective equipment functions. Smart PPE, for example, is becoming more common, with wearable sensors capable of detecting harmful environmental conditions, monitoring worker fatigue, and even predicting potential hazards before they occur. These intelligent systems provide real-time feedback to both workers and management, significantly reducing the risk of accidents. One of the most groundbreaking developments in safety technology is the use of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) for training and hazard recognition. Workers can now undergo immersive training sessions that simulate real-life industrial scenarios, allowing them to practice emergency procedures and proper use of protective equipment in a risk-free environment. This type of training improves knowledge retention, ensures better preparedness for hazardous situations, and helps workers develop critical problem-solving skills in high-pressure environments. Another emerging trend is the use of adaptive protective equipment that responds dynamically to environmental changes. Advanced materials are being developed to offer greater flexibility and protection based on external conditions. For instance, some new-generation protective suits can regulate temperature based on ambient heat, keeping workers comfortable while maintaining high levels of safety. Similarly, impact-resistant clothing can harden upon sudden force, providing enhanced protection without sacrificing mobility. These innovations help workers stay safe while allowing them to perform tasks with greater efficiency and ease. As industries become more globalized, standardization of protective equipment is becoming increasingly important. International safety organizations are working towards establishing unified regulations to ensure that workers across different regions receive the same level of protection. This effort helps create a more consistent approach to workplace safety while encouraging manufacturers to develop high-quality protective gear that meets global safety requirements. Environmental sustainability is also playing a crucial role in the evolution of protective and work equipment. Many manufacturers are shifting towards eco-friendly materials that reduce waste and minimize the carbon footprint of production processes. Biodegradable fabrics, recyclable protective gear, and energy-efficient manufacturing techniques are gaining popularity, aligning workplace safety with environmental responsibility. In addition, companies are implementing circular economy models where used protective equipment is refurbished, repurposed, or recycled instead of being discarded. Automation and robotics are further redefining the concept of workplace safety by minimizing direct human exposure to hazardous conditions. Industrial robots are increasingly taking over dangerous tasks such as handling toxic chemicals, working in extreme temperatures, and performing high-precision

operations in confined spaces. This shift not only enhances worker safety but also improves efficiency and consistency in industrial processes. However, as automation increases, the need for specialized protective equipment tailored to human-robot collaboration is also growing. Workers who interact with robotic systems require advanced protective gear that ensures safety without hindering their ability to operate and maintain these machines. In high-risk industries such as mining, oil and gas, and nuclear power, protective equipment is being developed to withstand extreme conditions while providing optimal functionality. Innovations such as fire-resistant suits with integrated cooling systems, advanced respiratory protection against airborne toxins, and high-visibility materials that enhance worker visibility in dark or complex environments are improving overall safety standards. Additionally, remote monitoring systems allow supervisors to track workers' health and safety conditions from centralized control rooms, enabling quick intervention in case of emergencies. The psychological impact of safety measures is another aspect that cannot be overlooked. When workers feel protected by state-of-the-art equipment, they are more likely to perform their tasks with confidence and efficiency. A strong focus on workplace safety not only reduces injuries but also fosters a culture of accountability and teamwork. Companies that invest in high-quality protective gear demonstrate a commitment to their employees' well-being, leading to higher job satisfaction, increased morale, and improved productivity. Looking ahead, the next generation of protective equipment will likely incorporate even more advanced features, including self-repairing materials, AI-driven predictive safety measures, and fully integrated communication systems. The development of ultra-lightweight yet highly durable protective gear will further enhance mobility and comfort, reducing fatigue and improving overall performance. The continuous evolution of protective and work equipment in modern industry is shaping a safer, smarter, and more sustainable work environment. As technology continues to advance, industries must remain proactive in adopting innovative safety solutions to protect workers while optimizing operational efficiency. The future of workplace safety is not only about preventing accidents but also about creating environments where workers can perform their duties with confidence, efficiency, and minimal risk.

## **CONCLUSION**

Protective and work equipment plays a crucial role in ensuring worker safety, improving productivity, and maintaining compliance with occupational health standards in modern industry. As industrial environments become more complex and hazardous, the need for high-quality protective gear continues to grow. The integration of advanced materials, ergonomic designs, and smart technologies has significantly enhanced the effectiveness of protective equipment, allowing workers to perform their tasks with greater confidence and efficiency. Technological advancements, such as IoT-enabled safety gear, AI-driven monitoring systems, and augmented reality training, have revolutionized workplace safety. These innovations not only reduce the risk of accidents but also provide real-time insights that help prevent injuries before they occur.

Additionally, the development of adaptive protective equipment, capable of responding to environmental changes, further enhances worker protection in high-risk industries. The importance of regulatory compliance and workplace safety culture cannot be overstated. Employers must ensure that workers are properly trained in the use of protective equipment and that all safety protocols are strictly followed. A proactive approach to safety, supported by continuous education and leadership involvement, significantly reduces workplace accidents and fosters a culture of responsibility. Sustainability is becoming an essential consideration in the manufacturing of protective equipment. The shift towards eco-friendly materials, recyclable components, and circular economy models demonstrates the industry's commitment to reducing environmental impact while maintaining high safety standards. As industries strive for greener practices, sustainable protective gear will become a key factor in responsible manufacturing and worker protection. Looking ahead, the future of protective and work equipment will be shaped by further innovations in nanotechnology, artificial intelligence, and wearable safety solutions. As new challenges emerge in modern industries, the development of smarter, more efficient, and more adaptable protective equipment will be essential to maintaining safe and productive work environments. Ultimately, continuous investment in safety technology and a strong commitment to worker well-being will define the success of industrial operations in the years to come.

## REFERENCES

- [1] Bolle, L., & Schneider, T. (2021). *Smart Personal Protective Equipment: The Integration of IoT and AI for Workplace Safety*. *Safety Science*, 138, 105-127.
- [2] Johnson, R., & Smith, A. (2020). *Advances in Industrial Protective Gear: Materials, Design, and Functionality*. *Journal of Occupational Safety and Health*, 45(3), 215-230.
- [3] Williams, J. & Carter, P. (2019). *Ergonomic Innovations in Work Equipment and Their Impact on Productivity*. *International Journal of Industrial Safety*, 37(4), 412-428.
- [4] Peterson, M., & Lee, C. (2022). *Sustainable Protective Equipment: Biodegradable and Recyclable Solutions for Industry*. *Environmental Safety Review*, 29(2), 89-105.
- [5] Martinez, F., & Huang, X. (2023). *AI and Wearable Technology in Occupational Safety: A Future Perspective*. *Journal of Engineering and Safety*, 56(1), 17-34.
- [6] Nguyen, D., & Patel, S. (2021). *Human-Robot Collaboration and Protective Gear: Challenges and Innovations*. *Robotics and Safety*, 19(3), 299-317.
- [7] Harrison, L., & Green, M. (2020). *Regulatory Standards for Industrial Protective Equipment: Global Trends and Challenges*. *Occupational Health and Compliance Journal*, 52(2), 140-158.
- [8] Stevenson, K., & Young, B. (2022). *Augmented Reality and Virtual Training in Workplace Safety: The Role of Immersive Technology*. *Safety and Training Journal*, 34(4), 221-238.

**Abhari P.B., Oliinyk D.S.** (*Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopil, Ukraine*)

## **A THEORETICAL INVESTIGATION OF DIFFERENT FILLET CONFIGURATIONS ON THE UPPER DIE IN RADIAL EXTRUSION USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Abstract:** *This paper examines the radial extrusion process at room temperature using computer-aided simulations. A rigid-plastic finite element program, QForm 2D, was employed to analyze the process. The study incorporated various parameters, including die schemes, die geometry, axisymmetric billet dimensions, and power mode settings, to investigate key forming characteristics. These characteristics include the distribution of effective stress throughout the process and the comparison of load–stroke curves under different relationships.*

**Keywords:** *cold forging; computer modeling; QForm 2D; rigid-plastic analysis; effective stress; load-stroke curves; die geometry; axisymmetric forming.*

**Анотація:** *У цій роботі досліджується процес радіального видавлювання при кімнатній температурі з використанням комп'ютерного моделювання. Для аналізу процесу було застосовано жорстко-пластичну програму скінченних елементів QForm 2D. У дослідженні враховувалися різні параметри, включаючи схеми матриць, геометрію матриць, осесиметричні розміри заготовки та налаштування режиму потужності, для дослідження ключових характеристик формування. Ці характеристики включають розподіл ефективної напруги протягом процесу та порівняння кривих "навантаження-хід" за різних співвідношень.*

**Ключові слова:** *холодне штампування; комп'ютерне моделювання; QForm 2D; жорстко-пластичний аналіз; ефективна напруга; криві навантаження-хід; геометрія матриць; осесиметричне формування.*

### **1. INTRODUCTION**

The extrusion process, which includes cold, warm, and hot forming, is a variant of metal forming with significant industrial applications for producing parts of various shapes. In extrusion, modeling is used to predict material flow, as well as strain and stress distributions, to evaluate the forces exerted on tools, and to identify potential sources of failure. For instance, extrusion performed at room temperature is classified as a cold forging process. With increasing market demand for reduced production costs, cold forging has become more widely adopted in manufacturing industries due to its competitive advantages, such as superior surface finish, enhanced mechanical properties, and improved dimensional accuracy of the final products.

There are several principal types of extrusion processes, including forward, backward, radial, and combined extrusion. In these processes, the billet is placed within a die cavity and is then compressed by one or more rams. As the billet is squeezed between punches and dies, the die cavity fills with the billet material, forming the desired shape.

Numerical methods, particularly the finite element method (FEM), have become essential tools in computer-aided engineering (CAE) for analyzing and simulating various aspects of design and manufacturing challenges, especially in

extrusion processes. Today, several commercial CAE software packages are available that facilitate process verification, modification, and design improvement, helping engineers optimize extrusion operations and ensure the quality and reliability of the final products [1].

## 2. METHOD OF ANALYSIS

The rigid-plastic finite element method (FEM), implemented in the QForm 2D software, has been used to analyze the various forming characteristics and parameters involved in radial extrusion. This approach allows for a detailed examination of material flow, strain, stress distributions, and tool interaction during the extrusion process, providing valuable insights for process optimization and design improvements.

## 3. PURPOSE OF INVESTIGATION

In this study, finite element simulations were used to investigate key forming characteristics during the radial extrusion process, including effective stress distributions at various stages with different fillet configurations on the upper die. Additionally, load–stroke curves were compared across the different fillet designs using theoretical simulation methods, providing insights into their effects on the process performance and tool interaction.

## 4. RADIAL EXTRUSION PROCESS

Figure 1 provides a comprehensive illustration of the single-ended radial extrusion process. It displays the die scheme, key die geometry parameters, the axisymmetric billet dimensions, and the final formed part. Detailed specifications for the die geometry, billet dimensions, and power mode parameters are provided below:  $R_0$  – the radius of billet ( $R_0=18\text{mm}$ ),  $R$  – the flange radius ( $R=36\text{mm}$ ),  $R_i$  – the variable flange radius,  $L$  – the billet height ( $L=70\text{mm}$ ),  $h$  – the relative flange height ( $h/R_0=0,65$ ),  $r$  – the die fillet ( $r=2; 6; 10\text{mm}$ ),  $V$  – punch velocity ( $V=1\text{mm/s}$ ),  $P$  – punch load, the friction factors between the billet and tools are constant (Zibel's law,  $\mu=0.08$ ).

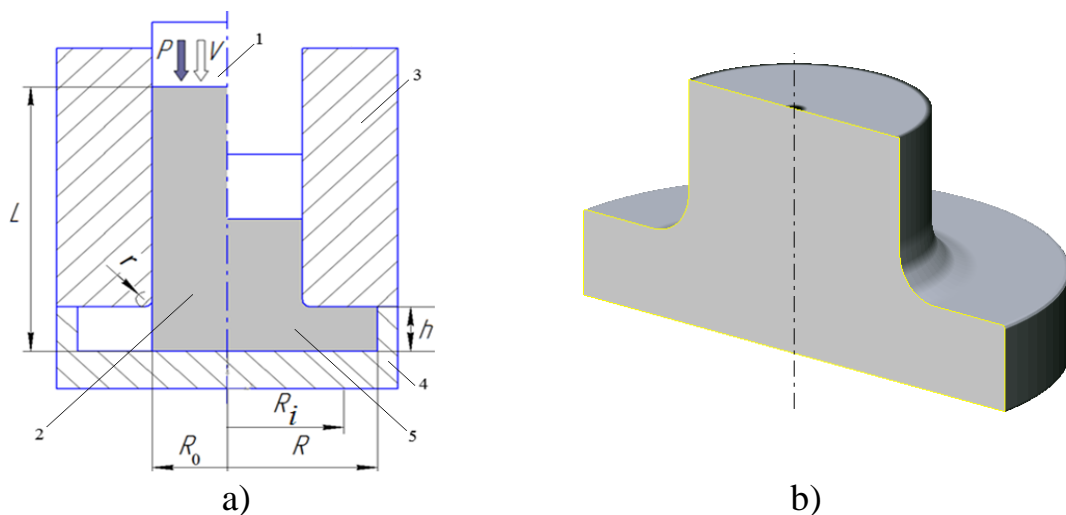


Fig. 1. Die scheme of single-ended radial extrusion process (a) and final formed part (b); 1 – punch, 2 – billet, 3 – upper die, 4 – lower die 5 – final formed part

## 5. MATERIAL PROPERTY

In this simulation, AA 6060 aluminum alloy was used as the material. The relationship between flow stress and effective strain for this alloy is approximated by the following equation:

$$\bar{\sigma} = 191.55 \bar{\varepsilon}^{0.202} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

## 6. ANALYSIS OF LATERAL EXTRUSION PROCESS

In the design of the radial extrusion process, an axisymmetric tubular billet is used along with several tooling components, including the upper die, lower die, and movable punches. Finite element simulations were performed using QForm software, which employs direct iteration and Newton-Raphson methods to solve the nonlinear equations associated with rigid-plastic behavior. In these simulations, the billet is modeled as a rigid-plastic body, while the tooling parts are treated as rigid bodies, with all components maintained at room temperature.

Figure 2 presents the variation of punch load with punch displacement (stroke) and compares the load–stroke curves for the different fillet designs on the upper die. The curves indicate a steep increase in forming loads as the punch stroke progresses through various stages of deformation, highlighting the influence of tool geometry on the process performance.

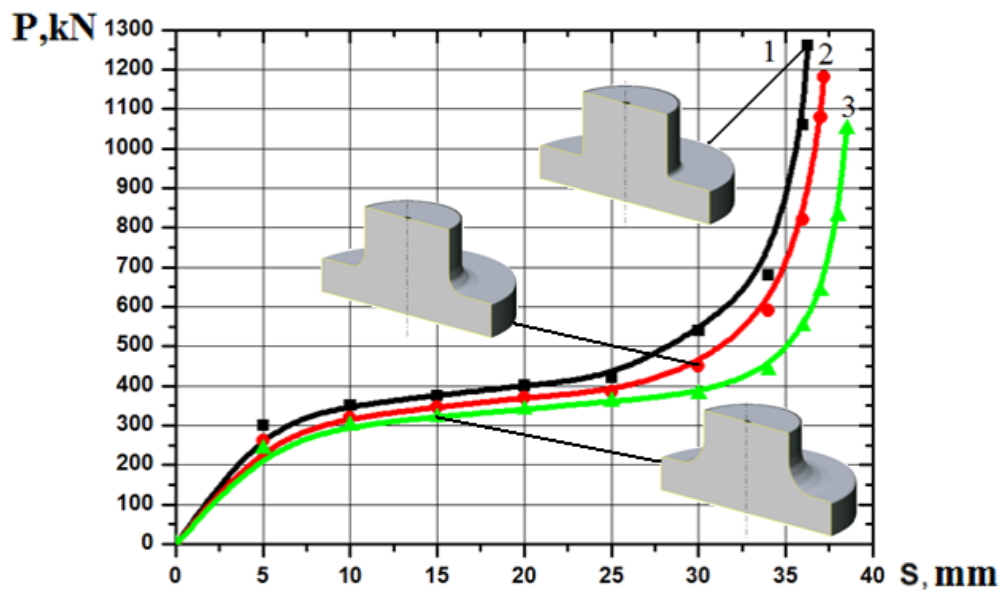


Fig. 2. The punch load vs. the punch stroke, 1 –  $r=2$  mm; 2 –  $r=6$  mm; 3 –  $r=10$  mm

The study explores the material flow behavior and the influence of various process parameters. During extrusion, the movable punch applies force to the billet, causing the material to be extruded radially and form the final part within the die cavity. Furthermore, Figure 3 illustrates the simulation results for a single-ended radial extrusion process with an  $h/R_0$  ratio of 0.65 and different fillet configurations on the upper die. The results show that the effective stress is symmetrically distributed throughout the billet, with a maximum effective stress of approximately 200 MPa.

	$R_i/R_0=1,5$	$R_i/R_0=1,75$	$R_i/R_0=2$
--	---------------	----------------	-------------

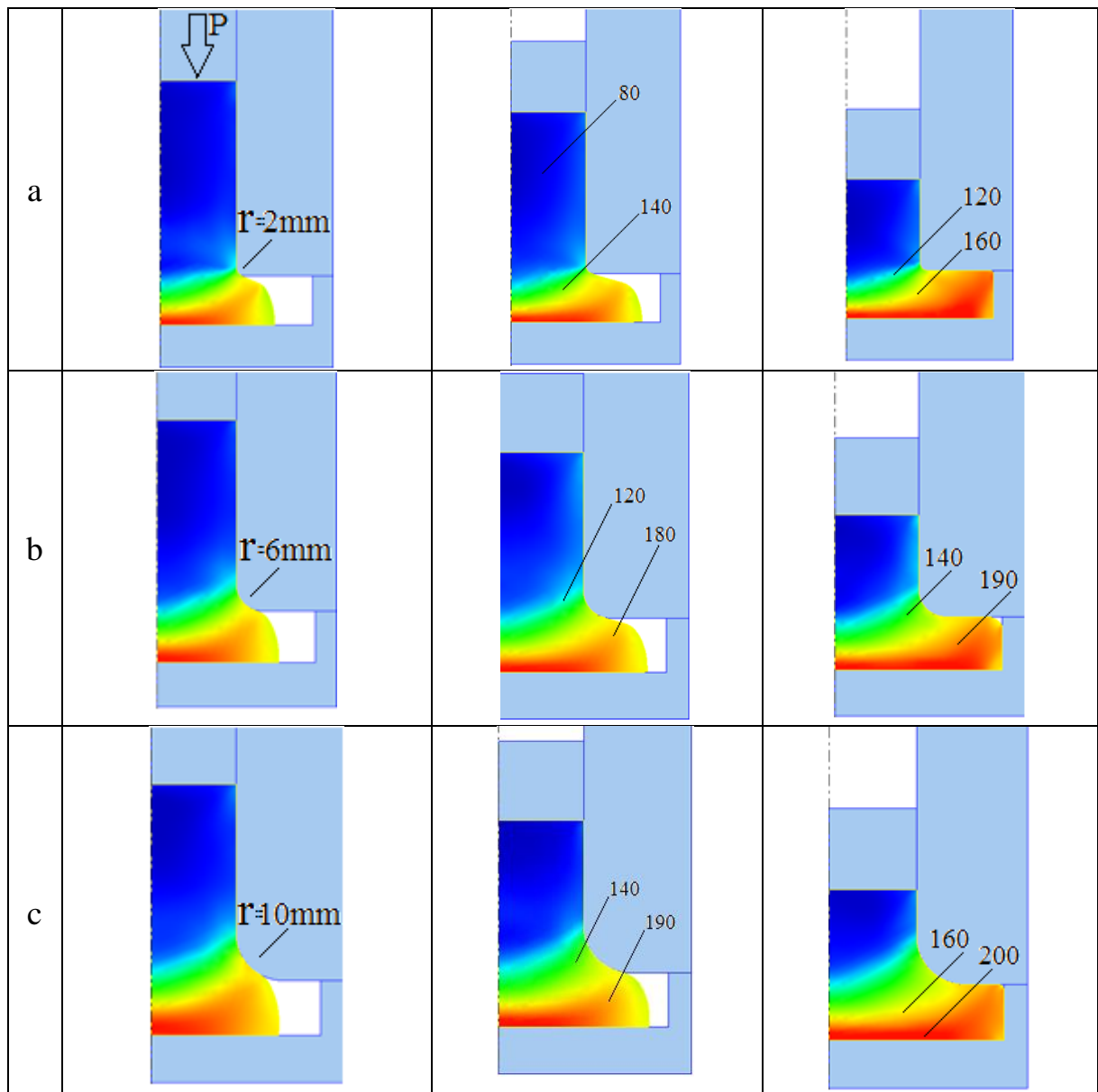


Fig. 3. Stress distributions  $\sigma_i$ , MPa in radial extrusion presses with relative flange height ( $h/R_0=0,65$ ) and different die fillets: a –  $r=2\text{mm}$ , b –  $r=6\text{mm}$ , c –  $r=10\text{mm}$ ; ( $\mu=0,08$ )

## 7. CONCLUSIONS

This study employed QForm 2D computer simulations to investigate the power mode and stress distributions in the single-ended radial extrusion process with various fillet configurations on the upper die. The simulation results indicated that the forming load reaches its maximum when the radial position is  $r=2\text{mm}$ , corresponding to a maximum effective stress of approximately 200 MPa.

## REFERENCES

1. *Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion* / Hrudkina N., Markov O., Shapoval A., Titov V., Aliiev I., Abhari P., Malii K. // *FME Transactions*. 2022. 50. 1, pp. 90-98. doi: 10.5937/fme2201090H



**Бабенко М.О., Люботин В.С.** (Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет, м. Дрогобич, Україна)

## ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ОБРОБЛЕННЯ ОТВОРІВ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ FUSION360

**Анотація:** Ефективність використання універсальних та спеціалізованих CAD/CAE/CAM-систем при розробленні технологічних процесів виготовлення деталей підвищує продуктивність і якість проектних робіт. В даній роботі проаналізовано технологічні можливості команди Drilling модуля MANUFACTURE програми Fusion 360 для проектування процесів оброблення різанням отворів корпусних деталей.

**Ключові слова:** технологічне проектування, оброблення отворів, CAD/CAM/CAE-системи, Fusion 360, Drilling, верстати з ЧПК, керуюча програма, симуляція обробки

**Abstract:** The efficiency of using universal and specialized CAD/CAE/CAM systems in the development of technological processes for part manufacturing significantly enhances the productivity and quality of design tasks. This study analyzes the technological capabilities of the Drilling operation within the MANUFACTURE module of Fusion 360 for designing hole machining processes in housing-type parts.

**Keywords:** technological design, hole machining, CAD/CAM/CAE systems, Fusion 360, Drilling, CNC machines, NC program, machining simulation.

Прийняття раціональних технологічних рішень при застосуванні автоматизації проектування процесів оброблення різанням є однією з актуальних проблем сучасного машинобудування. Використання CAD/CAM систем дозволяє організувати процес написання керуючих програм для верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) на більш високому рівні, оскільки позбавляє користувача від громіздких математичних розрахунків, підвищує швидкість і якість написання програм [1].

Актуальність питання удосконалення проектування технологічних процесів механічного оброблення заготовок при використанні універсальних та спеціалізованих CAD/CAE/CAM-систем підтверджується наявністю великої кількості публікацій із відображенням напрямків досліджень теоретичного та практичного характеру [2,3]. Стрімкий розвиток матеріалообробних технологій зумовлює розширення тематики проблем використання автоматизованих систем проектування.

При розробленні керуючої програми оброблення різанням для верстата з ЧПК постає питання обрання зручного продуктивного програмного забезпечення. Одним із лідерів щодо розроблення сучасних CAM-систем є компанія Autodesk, програмні продукти якої здатні забезпечувати вирішення великого спектру завдань, включаючи конструювання, перевірку на міцність і розроблення технологічних процесів. Наприклад, можливості програмного продукту компанії Autodesk Fusion 360 включають практично увесь життєвий цикл технічного об'єкта – від дизайнерського та конструктивного відпрацювання до візуалізації технології виготовлення [4].

При проектуванні технологічних процесів виготовлення корпусних виробів особлива увага приділяється оброблянню отворів, які є відповідальними елементами, забезпечуючи утримання деталей в корпусі та

його фіксацію. Використання можливостей опції Drilling модуля MANUFACTURE програми Fusion 360 сприяє підвищенню продуктивності та якості процесу розроблення керуючої програми обробляння отворів різанням.

Метою даної статті є дослідження технологічних можливостей обробляння отворів при використанні опції Drilling модуля MANUFACTURE Fusion 360 [5].

При програмуванні процесів обробляння отворів програмне забезпечення Fusion 360 пропонує використання команди Drilling, яка має можливості обирати опції, пов'язані із: обранням типу, геометрії, матеріалу різального інструмента (опція «Tool»); орієнтацією роботи інструмента відносно основних осей та поверхонь заготовки (опція «Tool Orientation»); обранням об'єктів для подальшої обробки за різними геометричними параметрами (опція «Geometry»); заданням відстаней робочих поверхонь різального інструмента відносно обраних базових поверхонь (опція «Clearance Height»); обиранням технологічних способів обробки отворів (опція «Cycle»); керуванням безпечною від ударів роботою різального інструмента (опція «Linking»).

Також треба зауважити щодо різноманіття технологічних можливостей обробляння отворів, запропонованого в опції «Cycle». Наприклад, при свердлінні отворів можна обрати наступні цикли: свердління зі швидким виходом різального інструмента (цикл Drilling – rapid out); свердління отвору зі заданою паузою, та швидким поверненням, що рекомендоване для зенкерування, розвертання або розточування ступінчастого отвору з метою покращення якості обробленої поверхні отвору (цикл Counter boring – dwell and rapid out); свердління неглибоких отворів із частковим відведенням інструмента з метою подрібнення стружки (цикл Chip breacking – partial retract); свердління глибоких отворів із повним відведенням різального інструмента (цикл Deep drilling – full retract); утворення різі (цикл Tapping); можливість переривання наскрізного свердління (цикл Break through); кероване глибоке гарматне свердління (цикл Guided deep drilling – gun drilling).

Для утворення різі в отворі запропоновані цикли: нарізання різі з руйнуванням стружки (цикл Tapping with chip breaking); фрезерування різі (цикл Thread milling).

Технологічні переходи розсвердлювання можна програмувати при використанні таких циклів, як: розсвердлювання із поверненням (цикл Reaming Feed Out), розточування із затримкою та поверненням (цикл Boring – dwell and feed out ), розточування з зупинкою та швидким поверненням (цикл Stop boring – stop and rapid out), чистове розточування із зазором (цикл Fine boring – shift), розточування зворотнього боку отвору (цикл Back boring).

Також у Fusion 360 при використанні команди Drilling можливим є програмування обробляння отворів кінцевими фрезами при використанні таких циклів: розфрезерування глухих отворів (колова інтерполяція) (цикл Circular pocket milling), розфрезерування наскрізних отворів (цикл Bore milling).

На рисунку 1 зображено приклад розробленої технологічної операції оброблення глибоких різьбових отворів деталі «Корпус» у програмному

середовищі Fusion 360. Технологічна операція складається із технологічних переходів свердління, зенкерування, нарізання різі мітчиком. При цьому з урахуванням глибини свердління були використані цикли: Deep drilling – full retract, Drilling – rapid out, Tapping with chip breaking.

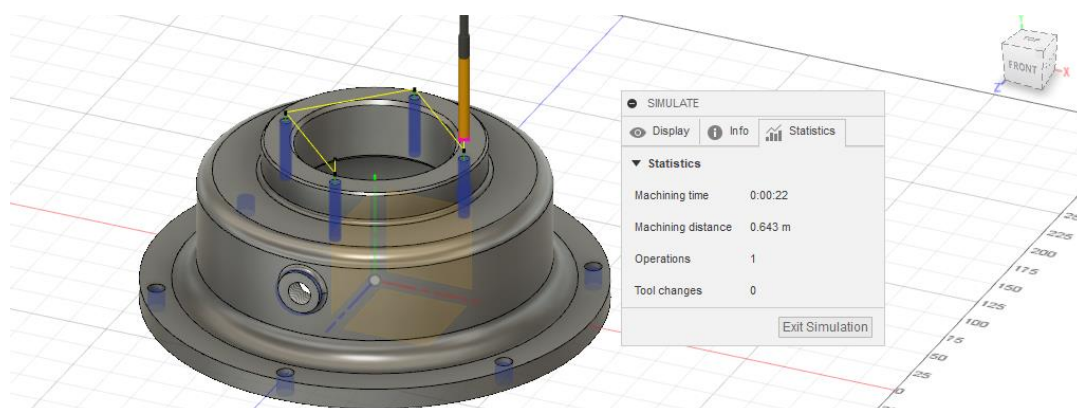


Рисунок 1 – Фрагмент симуляції оброблення різьбових отворів деталі у програмному середовищі Fusion 360

Однією із переваг при проектуванні процесу оброблення різанням у Fusion 360 є можливість отримання симуляції процесу із наданням змоги не тільки прослідкувати траєкторію переміщення різального інструмента та безпечність його роботи, але й отримати дані щодо машинного часу переходу та пройденого шляху, які у подальшому можуть бути використанні при розрахунках економічної ефективності технологічного процесу.

Таким чином, використання команди Drilling програмного комплексу Fusion 360 при проектуванні технологічних переходів оброблення отворів дозволяє варіювати параметрами обробки з метою досягнення найбільш економічного результату. Це сприятиме підвищенню продуктивності та якості проектних робіт із розроблення технологій оброблення різанням.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем : монографія / О. Ф. Тарасов та ін. Краматорськ : ЦТPI «Друкарський дім», 2017. – 239 с.
2. Danylchenko L., Yousif Duhair. Investigation of machining parameters in the design of CNC technologies // Book of abstract of the International scientific and technical student's conference "Fundamental and applied sciences. Actual questions" 26th-27th of April 2018. – Ternopil: TNTU, 2018. – P. 203-204.
3. Петраков Ю. В., Мацківський О. С. Забезпечення якості регулювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК // Вісник Житомирського державного технологічного університету, серія Технічні науки. – 2015. - № 2 (73). - С. 81–85.
4. Вірич С. О., Бабенко Д. Г. Автоматизація технологічного проектування у системі Fusion 360 // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 30.
5. Autodesk Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. – URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. (дата звернення: 17.03.2025).

**Безгін О.А.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

**Анотація:** Проведено критичний аналіз сучасних існуючих методів відновлення та зміцнення деталей для металургійного обладнання, таких як дугове наплавлення із застосуванням порошкового дроту в якості плавкого електроду. Розглянуто такі інновації, як використання керованих магнітних полів для стабілізації дуги та покращення якості наплавлення, що дозволяє зменшити кількість дефектів і підвищити зносостійкість. Показана важливість проведення подальших досліджень у галузі оптимізації параметрів магнітних полів.

**Ключові слова:** наплавлення, зміцнення поверхонь, металургійне обладнання, керовані магнітні поля, зварювальна дуга, зносостійкість, наплавлення порошковим дротом, поздовжнє магнітне поле

**Abstract:** A critical analysis of modern existing methods for restoring and strengthening components of metallurgical equipment has been conducted, including arc surfacing using flux-cored wire as a consumable electrode. Innovations such as the use of controlled magnetic fields for arc stabilization and improving surfacing quality have been considered, allowing for a reduction in defects and an increase in wear resistance. The importance of further research in the field of optimizing magnetic field parameters has been highlighted.

**Keywords:** surfacing, surface hardening, metallurgical equipment, controlled magnetic fields, welding arc, wear resistance, flux-cored wire surfacing, longitudinal magnetic field.

Відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей, що працюють в металургійному обладнанні, залишається актуальною проблемою, оскільки, працюючи у важких умовах експлуатації, вони зазнають значних механічних навантажень, абразивного зносу, температурних коливань та інших впливів. Такі деталі використовуються в різних вузлах, зокрема у машинах безперервного лиття заготовок (плити та ролики кристалізатора), прокатних станах (робочі та опорні валки, підшипникові вузли, шестеренні кліті), печах нагріву (транспортні ролики), вузлах різання, тощо. Точність, довговічність і експлуатаційна надійність таких деталей мають велике значення для забезпечення безперебійної роботи обладнання.

В ході експлуатації, робочі поверхні деталей зазнають різних видів навантажень, а саме високотемпературний вплив, абразивне та ударне зношування, корозія. Наприклад, деталі, що працюють при високих температурах, повинні мати високу термостійкість і опір термоциклічним навантаженням, тоді як деталі, що піддаються тертю, потребують високої зносостійкості.

В умовах великих виробництв заміна зношених деталей є економічно не вигідною, тому особливу увагу приділяють їхньому відновленню та

зміцненню. Це дозволяє суттєво продовжити термін їхньої служби та знизити витрати на виготовлення нових виробів.

Одним із найбільш ефективних методів відновлення та зміцнення є наплавлення, яке передбачає нанесення металевих сплавів або спеціальних покриттів на робочу поверхню деталей. Це дає змогу не лише відновити геометрію, але й покращити експлуатаційні характеристики, підвищуючи міцність, зносостійкість та корозійну стійкість деталей, що працюють у складних умовах.

Наплавлення використовується для нанесення шару металу на зношену поверхню, що дозволяє відновити оригінальну геометрію виробів або зміцнити їх поверхню [1], збільшити термін експлуатації деталей, скоротити виробничі простои та зменшити витрати на ремонт. Відновлені деталі після наплавлення можуть витримувати значні навантаження, механічний знос і вплив високих температур, що є особливо важливим для вузлів, які працюють при складних термоциклічних та ударних навантаженнях.

Метою даної роботи є проведення критичного аналізу сучасних методів відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей металургійного обладнання; виявлення технологічних недоліків їх нанесення; визначення оптимальних методів наплавлення для відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей.

Методи наплавлення, що застосовуються для відновлення, включають різні сучасні технології, такі як дугове наплавлення з використанням в якості плавкого електроду порошкового дроту (з них найбільш перспективним і сучасним є плазмове-дугове наплавлення з аксіальною подачею порошкового дроту, порошкової стрічки та плющенки [1]). Дугове наплавлення порошковим дротом, стрічкою та плющенкою широко використовується завдяки його економічності та високій продуктивності. Серед переваг цього методу можна виділити його економічність; високу продуктивність; гнучкість у виборі матеріалів. Але є і недоліки. Наприклад, в процесі наплавлення існує відставання швидкості плавлення осердя від оболонки порошкового дроту, в результаті чого періодично відбувається руйнування осердя та забруднення зварювальної ванни неметалевими включеннями. Це, у свою чергу, призводить до появи дефектів у наплавленому металі, сприяє нерівномірності фізикохімічних властивостей наплавленого металу шва по довжині валика, знижує якість покриття. Ці недоліки вимагають постійного моніторингу та коригування технологічного процесу для досягнення високої якості покриття та уникнення дефектів.

Плазмове наплавлення з аксіальною подачею порошкового дроту - технологічний процес, де джерелом нагріву є плазмова дуга, яка створює високотемпературне середовище для плавлення матеріалу порошкового дроту. Дріт подається аксіально (вздовж осі плазмової дуги) і плавиться, утворюючи розплавлену масу, яка осідає на поверхні деталі, створюючи захисне або зміцнююче покриття. Плазмова дуга дає можливість досягти

високої точності і контролю під час наплавлення, а також дає можливість використовувати різні матеріали, зокрема порошкові композиції, які важко плавляться іншими методами. Переваги цього способу наплавлення - висока міцність покриття, можливість роботи з різними матеріалами і точне керування параметрами процесу. Також можна виділити високу концентрацію теплової потужності та можливість отримувати мінімальну ширину зони термічного впливу, товщину наплавленого шару від 0,1 мм до декількох міліметрів; можливість наплавлення різних зносостійких матеріалів на сталеву деталь та одночасного плазмового загартування поверхні деталі; високий ККД дуги; мале (порівняно з іншими видами наплавлення) перемішування матеріалу, який наплавляється, з основою, що дозволяє досягти необхідні характеристики покриття вже в першому-другому шарі [2]. Проте, цей метод має і певні недоліки - високу вартість та конструктивну складність обладнання (крім того, промисловість серійно не випускає устаткування для цього процесу); складність процесу; висока енергоспоживаність.

Найбільш перспективним, з точки зору ефективності нанесення покриттів, є новітня технологія з використанням керованих магнітних полів, яка допомагає стабілізувати зварювальну дугу, покращити перемішування рідкого металу і зменшити кількість дефектів у зоні наплавлення. Це дозволить забезпечити довший термін експлуатації деталей та знизити витрати на додаткову обробку поверхонь після відновлення.

В результаті проведеного аналізу методу наплавлення з використанням керованих магнітних полів визначено, що він є найбільш перспективним з точки зору отримання якісного покриття на робочій поверхні деталей. Зовнішнє магнітне поле впливає на процес наплавлення, забезпечуючи кращу структуру покриття і його механічні властивості. Контроль зварювальної дуги за допомогою магнітних полів дозволяє отримати високу точність зварних валиків, мінімізуючи деформацію матеріалу. Це особливо важливо для таких відповідальних деталей, як валки прокатних станів або ролики МБЛЗ, де навіть незначні відхилення можуть суттєво вплинути на якість готової продукції. Якість наплавлення впливає на механічні характеристики деталей, зокрема на їх міцність та стійкість до зношування, тобто використання магнітних полів для керування зварювальним процесом допомагає знизити внутрішні напруження і мікрodefекти в зоні наплавлення, що підвищує довговічність деталей і дозволяє збільшити їх експлуатаційний ресурс. Магнітні поля стабілізують зварювальну дугу, що знижує ймовірність утворення дефектів, таких як пори, тріщини чи шлакові включення. Це надзвичайно важливо, оскільки дефекти, які виникають в процесі експлуатації, можуть призвести до браку продукції що випускається.

Застосування керованих магнітних полів під час зварювання (наплавлення) може знизити потребу в додатковій механічній обробці швів (шліфування, правки та інші). Це прискорює процес відновлення деталей і

знижує витрати на їх виробництво, що є важливим для промислових підприємств, працюючих в різних галузях промисловості. Актуальність вирішення поставленої задачі зумовлена потребою у виборі та удосконаленні технологій, що забезпечать високу точність, якість і довговічність для масового виробництва.

Метод наплавлення із додаванням керуючих магнітних полів можна розділити на наплавлення із накладенням на електричну дугу зовнішніх керуючих поздовжніх магнітних полів (ПДМП) та наплавлення із накладенням на електричну дугу поперечних магнітних полів (ПОМП).

Накладення на електричну дугу ПДМП призводить до змін форми дуги і її властивостей. Зварювальна дуга під дією ПДМП починає обертатися навколо поздовжньої осі, внаслідок чого форма дуги перетворюється з дзвіноподібної в конусну [3]. Усередині цього конуса є порожнина, вільна від плазми. Перебудова дуги з природної форми в конусоподібну і навпаки слідує за змінами індукції практично безінерційно. Також відомо, що під впливом ПДМП можливе підвищення ефективності дугового наплавлення під флюсом за рахунок збільшення коефіцієнта розплавлення дроту та зменшення розмірів зони проплавлення основного металу [4].

Відомо [5], що для дугового наплавлення із введенням ПДМП зазвичай використовують пристрій введення (ПВ) у вигляді круглого феромагнітного осердя, розміщеного співвісно з електродом (рис. 1). Цей пристрій забезпечує значну подовжню компоненту індукції в зоні дуги, краплі під торцем електрода і зварювальної ванни під дугою. У поверхні феромагнітної пластини в зоні дуги поперечна компонента незначна, а в зоні під торцем феромагнітного електрода - може досягати половини величини поздовжньої компоненти індукції, яку генерує ПВ ПДМП.

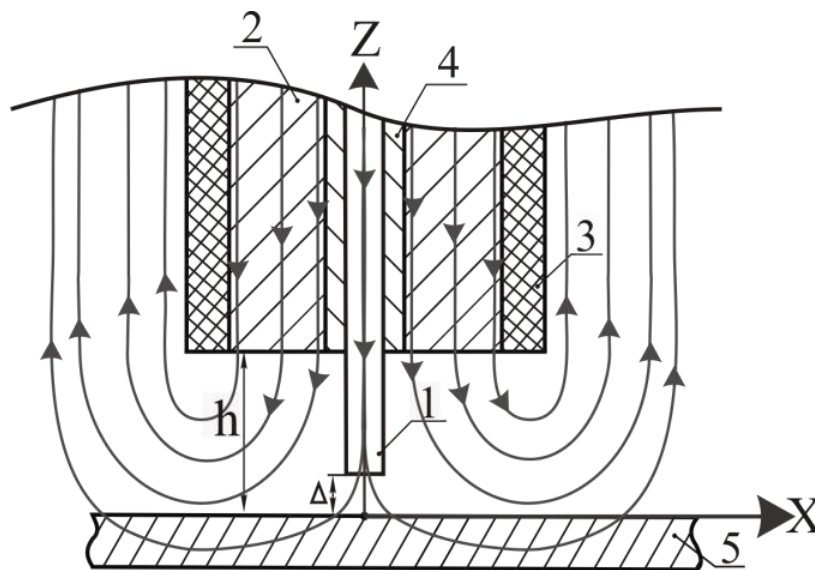


Рисунок 1. Конструкція ПВ ПДМП, виконаного у вигляді соленоїда: 1 – електрод; 2 – осердя; 3 – обмотка; 4 – мундштук; 5 – виріб (стрілками показані силові лінії поля) [5]

За рахунок створення в рідкому металі вимушених потоків від об'ємних електромагнітних сил при взаємодії струму, що розтікається в рідкому металі ванни, з керуючими магнітними полями, можливо управляти формою і розмірами валика в поперечному перерізі. Форма, розміри шва в перерізі і якість формування швів визначаються характером руху рідкого металу в зварювальній ванні під дією керуючих ПДМП.

Критичний аналіз публікацій за даною темою показав, що недостатня кількість розрахункових методик, які дозволяють точно визначити частоту і рівень індукції знакозмінного ПДМП, що забезпечують ефективно перемішування рідкого металу ванни при дуговому наплавленні [1-5]. Вивчення будови ПДМП в зоні дуги, краплі і зварювальної ванни має і теоретичне, і практичне значення. На практиці при дуговому зварюванні та наплавленні під флюсом найчастіше електрод і виріб є феромагнітними тілами, які спотворюють будову магнітного поля в зоні під фероосердям ПВ ПДМП. Фізичні процеси в зварювальній дузі і рідкому металі зварювальної ванни, що відбуваються при дії ПДМП складні, і недостатня їх вивченість стримують практичне використання цього способу наплавлення. В даний час недостатньо досліджень і про індукції керуючого ПДМП, які генерує ПВ ПДМП, і методів її розрахунку.

Введення поперечного магнітного поля при наплавці – це метод, який використовують для поліпшення якості зварних швів та зменшення дефектів у процесі наплавки. Це робиться шляхом створення додаткового магнітного поля, яке впливає на розподіл тепла, рідкого металу та домішок у зоні наплавки. Цей метод дозволяє зменшити пористість наплавленого матеріалу та покращити його структуру. При використанні цього способу, вісь стовпа дуги, відхиленого зовнішнім поперечним магнітним полем, займає такі точки простору в зоні між електродами, в яких сумарна величина індукції дорівнює нулю [6]. На зміщення плями дуги на виробі додатково впливають сили Лоренца як в дузі, так і в рідкому металі ванни. Визначено, що ефект розширення валика при наплавленні отримано через взаємодію струму в зварювальній дузі з керуючим магнітним полем [5].

Важливим є продовження проведення досліджень щодо забезпечення максимального рівня поперечної компоненти індукції ПОМП в зоні зварювальної ванни (стосовно до зварювання-наплавлення феромагнітними і немагнітними матеріалами), щоб ефективно управляти гідродинамічними процесами в ванні і розмірами зони проплавлення основного металу, забезпечити якісне формування швів (валиків) та підвищити працездатність виробів, які наплавляються.

Останні дослідження фокусуються на стабілізації зварювальної дуги за допомогою магнітного поля та його впливі на рух рідкого металу у зварювальній ванні. Відомо [7-8], що ПДМП змінює форму дуги, викликаючи її обертання та перетворення з дзвіноподібної на конусоподібну, що покращує контроль над зварювальним процесом. Також



дослідниками встановлено, що магнітне поле дозволяє покращити перемішування рідкого металу, що особливо важливо, наприклад, при зварюванні під шаром флюса. Однак, оптимальні частоти та індукції ПДМП ще потребують подальшого уточнення.

Зараз перед наплавленням із використанням поперечних та подовжніх магнітних полів стоїть низка важливих завдань, які потребують подальших досліджень і вдосконалення. Одним із основних шляхів є удосконалення методик розрахунку частоти та індукції магнітних полів, що дозволить ефективно перемішувати рідкий метал у зварювальній ванні. Наприклад, немає достатньо чітких методик, які б дозволяли визначати ці параметри з високою точністю, що суттєво обмежує використання цього методу на практиці. Також існує потреба у доскональному вивченню впливу магнітного поля на процеси зварювання та наплавлення феромагнітних матеріалів, адже досліджень у цій сфері поки що недостатньо. Потрібно уточнити параметри магнітного поля, такі як його частота й інтенсивність, для покращення якості швів та забезпечення кращого контролю над структурою наплавленого металу.

Не менш важливою задачею є оптимізація магнітного впливу на процес наплавлення. Потрібно мати глибше розуміння того, як поперечні й подовжні компоненти магнітного поля взаємодіють з рідким металом і як це впливає на форму та розмір швів, що дозволить зменшити дефекти та покращити якість наплавлення. Водночас, важливим є вивчення гідродинамічних процесів у зварювальній ванні під дією магнітного поля, адже цей вплив досі залишається недостатньо дослідженим [3,5,6]. Поглиблення знань у цьому напрямку допоможе підвищити працездатність наплавлених виробів та забезпечити якісне формування зварних швів.

Одним із перспективних напрямів досліджень є стабілізація зварювальної дуги під впливом магнітного поля. Потрібно уточнити механізми її стабілізації та вплив Лоренцевих сил на процес, що дозволить не тільки поліпшити контроль над процесом наплавлення, але й мінімізувати можливі деформації та дефекти.

Таким чином, подальші дослідження у сфері наплавлення із використанням магнітних полів є необхідними для покращення якості, надійності та ефективності процесів, а також для розвитку новітніх методів управління процесами наплавлення.

## **ВИСНОВКИ**

1. Проведений критичний аналіз сучасних високопродуктивних способів наплавлення показав, що для зміцнення та відновлення виробів, які працюють в умовах термоциклічних та ударних навантажень, є метод наплавлення з використанням керованих магнітних полів, який надасть змогу збільшити термін служби металургійного обладнання.

2. Доведено, що спосіб наплавлення з використанням магнітних полів має ряд недоліків, ліквідація яких надасть змогу поліпшити його техніко-технологічні можливості.

3. Виявлено, що для поліпшення техніко-економічних показників наплавлення з використанням керованих магнітних полів, необхідно розв'язати деякі задачі: уточнити параметри магнітного поля (такі, як його частота та інтенсивність); глибше дослідити як поперечні, так і поздовжні компоненти магнітного поля, їх взаємодію із рідким металом; визначитись з механізмами стабілізації зварювальної дуги та уточнити вплив дії Лоренцевих сил на процес наплавлення.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Новомлинець О. О. *Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : навчальний посібник / О.О.Новомлинець, С.В.Олексієнко, С.М.Ющенко*. - Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 130 с. - ISBN 978-617-7932-50-4.

2. Макаренко Н. О. *Дослідження процесу плазма-MIG наплавлення із застосуванням порошкової плющеники та розробка наплавочного матеріалу для відновлення деталей машин / УДК 621.791.927.5 ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (38), 2016. 1663.*

3. Размишляєв О.Д., Агєєва М.В. *Характеристики стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля // Журнал «Автоматичне зварювання», № 11, 2021, с. 3-7*

4. Y. H. Kang, S.J. Na. *Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation // The Welding Journal. – 2023. – Vol. 82, № 5. – P. 93–99.*

5. Размишляєв О. Д., Агєєва М. В. *Дослідження міцності стикових з'єднань при дуговому зварюванні з впливом магнітних полів / ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (38), 2016. 206*

6. Размишляєв О.Д., Агєєва М. В. *Вплив поперечного магнітного поля на геометрію валіків при відновленні виробів// УДК 621.791.927.5 ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (44), 2018. с. 77-79*

7. Лебедев В. О. *Інноваційна техніка і технології для електродугового зварювання та наплавлення : монографія / В. О. Лебедев, С. Ю. Максимов, М. М. Бриков [та ін.]. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 262 с. - ISBN 978-617-7932-49-8.*

8. Лебедев В. О. *Аддитивні технології електродугового зварювання, наплавлення та напилення : монографія / В. О. Лебедев, М. М. Бриков, Н. О. Макаренко [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 156 с. - ISBN 978-617-7932-66-5.*

Безпалов Є.В., к.т.н., доц. Онищук С.Г., к.т.н. Тулупов В.І. (Україна, м. Краматорськ - Тернопіль, Донбаська державна машинобудівна академія)

## ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ОПОРЯДЖУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

*В статті розглянуті особливості опоряджувальної обробки отворів деталей типу тіл обертання. Проаналізовано доцільність використання розглянутих технологічних методів для збільшення життєвого циклу виробів.*

**Ключові слова:** *опоряджувальна обробка, тіла обертання, отвори, хонінгування, розкочування, шліфування, фінішна обробка, точність отворів, шорсткість поверхні, життєвий цикл виробів*

*The article discusses the features of finishing holes in parts such as bodies of revolution. The feasibility of using the considered technological methods to increase the life cycle of products is analyzed.*

**Keywords:** *finishing treatment, bodies of revolution, holes, honing, burnishing, grinding, final processing, hole accuracy, surface roughness, product life cycle*

Класична структура технологічних операцій технології виготовлення деталей машин із робочими поверхнями деталей класу «тіла обертання» (гільзи циліндрів ДВЗ, гільзи гідроциліндрів, труби, та інші) повинна забезпечити два основних завдання: задані конструктором геометричні параметри (форму та розміри) із необхідною точністю та необхідні фізико-механічні властивості поверхні. Геометричні параметри досягаються, в основному операціями механічного оброблення. Фізико-механічні властивості робочих поверхонь можна сформулювати різними способами [1].

Метою роботи є дослідження технологічних методів опоряджувальної обробки отворів деталей типу тіл обертання.

Для фінішної обробки робочих поверхонь використовують операції тонкого розточування, шліфування, хонінгування, полірування, притирання, обробку методами поверхнево-пластичного деформування [2].

Операції тонкого розточування виконують на обладнанні підвищеної точності з використанням розточувальних головок та блоків. Основною вимогою є висока жорсткість металорізального обладнання. Різальні пластини виготовляються з твердого сплаву марок Т15К6, Т30К4. Тонке розточування виконується при швидкості різання 120-150 м/хв, подачі 0,1-0,15 мм/об. Досягається точність 6-7 квалітетів та шорсткість  $Ra = 0,8-2,5$  мкм.

Шліфування отворів виконується на внутрішньошліфувальних верстатах. Основними перевагами внутрішнього шліфування є висока точність геометричних параметрів отвору та висока якість поверхні.

Недоліками шліфування є висока вартість реалізації процесу; низька продуктивність; неможливість шліфування канавок; висока температура в зоні шліфування, що при недостатньому охолодженні може вплинути на якісні показники поверхневого шару (наявність припиків та мікротріщин).

Точність після чистового шліфування досягає 6-7 квалітетів, шорсткість  $Ra = 0,32-1,6$  мкм.

Хонінгування використовують для опорядження наскрізних гладких отворів діаметром 25...500 мм. Особливістю хонінгування є використання спеціального інструмента – хона (рис. 1, а). Хон, шарнірно з'єднаний зі шпинделем верстата, виконує обертальний та зворотно-поступальний рух відносно осі нерухомої заготовки. Причому швидкість обертального руху більше. Хонінгуванням створюється специфічний сітчастий мікропрофіль обробленої поверхні (рис. 1, б), що сприяє кращому утриманню змазки на цій поверхні в експлуатаційних умовах.



Рисунок 1 – Схема хонінгування

За допомогою хонінгування отримують точність діаметральних розмірів отворів за 6-м квалітетом, точність геометричної форми отворів діаметром до 250 мм (овальність і конусоподібність) в межах 0,003...0,004 мм, параметр шорсткості поверхні  $Ra=0,16...0,004$  мкм. Але цей процес не дозволяє виправити положення осі отвору відносно бази. Хонінгування виконують на спеціальних одношпиндельних або багатшпиндельних верстатах з вертикальною або горизонтальною компоновкою. Хонінгування особливо ефективно при необхідності обробки високоточних довгих отворів порівняно великого діаметру.

Розкочування отворів – метод опорядкування, що ґрунтується на пластичному деформуванні оброблюваної поверхні. Розкочування виконують на свердлильних, токарних або спеціальних верстатах. Інструментом є різні за конструкцією багатороликові розкатки, які обертаються відносно осі отвору. Ролики виготовляють з якісних інструментальних сталей, їх твердість після гартування  $HRC_{\text{э}} 62...64$ . Розкочування виконують після чистового розточування, точність отвору під розкочування – 0,01...0,015 мм.

Розкочування не виправляє положення осі отвору, розкатка самоустановлюється по отвору, тому точність положення отвору відносно бази забезпечується на розточувальній операції. Розкочування використовують для опорядження наскрізних і глухих отворів в корпусах з різних матеріалів, що можуть пластично деформуватись в холодному стані. Твердість таких матеріалів не перевищує  $HRC_{\text{э}} 35...40$ .

Розкочування забезпечує точність отвору за 6...9-м квалітетами, параметр шорсткості  $Ra=0,016...0,008$  мкм, похибка геометричної форми для отворів діаметром до 120 мм становить 0,005...0,008 мм. Поверхневий шар після розкочування має твердість, що збільшується на 20%.

Крім аналізу точності та якості поверхні після опорядкувальних методів слід враховувати їх собівартість (рис. 2) [3]. Наприклад,

розкочування при тих же показниках якості, як при хонінгуванні, має меншу собівартість.

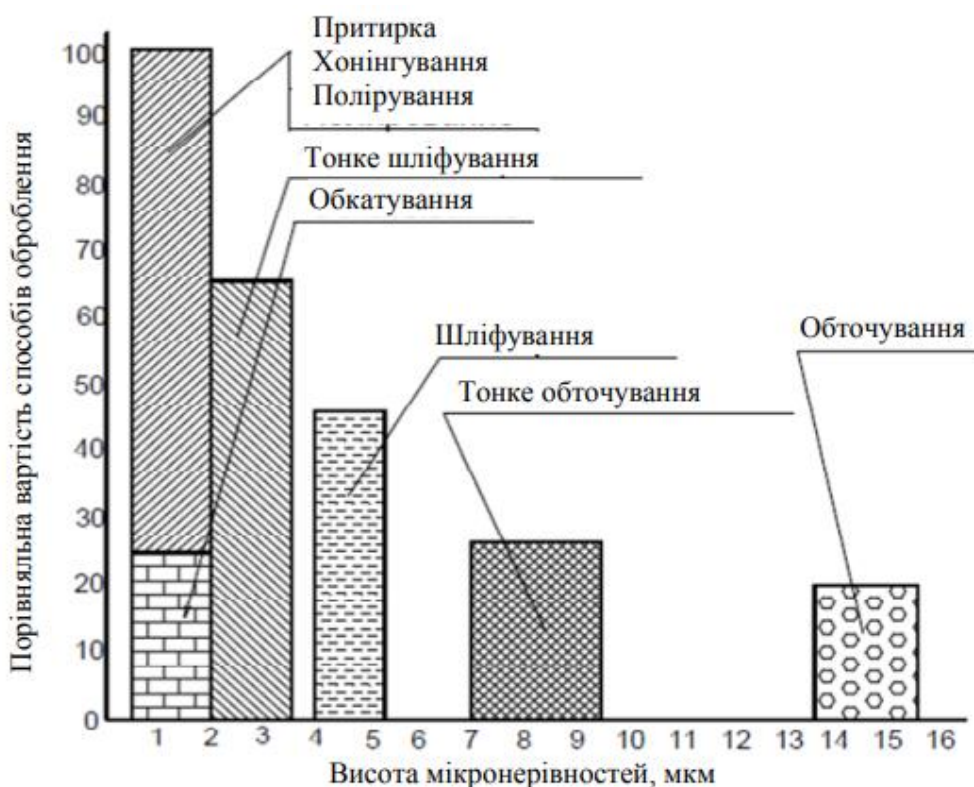


Рисунок 2 - Порівняльна діаграма різних методів чистової обробки і досягнутої при цьому шорсткості поверхні (по даних фірми «Hegenschiede»)

## ВИСНОВОК

Використання технологічних методів опоряджувальної обробки отворів дозволяє забезпечити показники точності та якості поверхні, що сприяє збільшенню життєвого циклу виробів. Вибір того чи іншого методу повинен ґрунтуватися не тільки на технологічних можливостях методу, але й враховуватись собівартість.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1 Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". 2000. № 412. С. 3-11.
- 2 Технологія обробки типових деталей та складання машин: конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / укл. : С. В. Ковалевський, С. Г. Онищук. Краматорськ – Тернопіль : ДДМА, 2023. 132 с.
- 3 Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Маруцак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.

**Борисенко Ю.Ю.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗВАРЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ СУМІШІ

**Анотація:** Проведено аналіз впливу екзотермічних сумішей на процеси дугового та електрошлакового зварювання. Розглянуто можливості їх застосування для підвищення стабільності зварювального процесу, зменшення дефектності зварних з'єднань та покращення механічних характеристик шва. Проаналізовано вплив екзотермічних компонентів на тепловий баланс у зварювальній ванні та їх роль у зниженні енергетичних витрат. Показана необхідність подальших досліджень щодо оптимізації складу екзотермічних сумішей та їх впливу на характеристики зварних з'єднань.

**Ключові слова:** Зварювання з екзотермічною сумішшю, дугове зварювання, електрошлакове зварювання, екзотермічні флюси, тепловий баланс, ефективність зварного процесу,

**Abstract:** An analysis of the influence of exothermic mixtures on arc and electroslag welding processes has been conducted. The possibilities of their application to improve the stability of the welding process, reduce weld defects, and enhance the mechanical properties of the weld are considered. The impact of exothermic components on the heat balance within the weld pool and their role in reducing energy consumption is analyzed. The necessity for further research focused on optimizing the composition of exothermic mixtures and their effect on the characteristics of welded joints is highlighted.

**Keywords:** welding with exothermic mixtures, arc welding, electroslag welding, exothermic fluxes, heat balance, welding process efficiency.

Розвиток сучасних технологій зварювання та наплавлення спрямований на підвищення продуктивності процесів, покращення якості зварних з'єднань і зниження енергетичних витрат. Процеси зварювання та наплавлення є важливими для машинобудування, будівництва, суднобудування та інших галузей промисловості. Тому вдосконалення технологій, що підвищують ефективність і надійність зварних з'єднань, має велике значення.

Одним із перспективних підходів є метод зварювання із застосуванням екзотермічних сумішей, які забезпечують додаткове джерело тепла під час зварювального процесу. Використання таких матеріалів дозволяє покращити стабільність процесу, зменшити дефекти та підвищити механічні характеристики шва. Для вдосконалення дугового та електрошлакового зварювання застосування екзотермічних сумішей можна розглядати як один із перспективних напрямків підвищення ефективності процесу, адже їх використання дозволяє компенсувати теплові втрати, що виникають при традиційних методах зварювання, та сприяє більш рівномірному розподілу температури у зварювальній ванні.

Окремі наукові праці, що вивчають цю тему [1, 2, 3], розглядають вплив екзотермічних сумішей на процеси дугового та електрошлакового зварювання. Ці дослідження показали, що введення екзотермічних компонентів у зварювальні матеріали дозволяє збільшити тепловиділення, покращити якість металу шва та підвищити продуктивність. Інші роботи [4, 5] зосереджені на впливі різних складів екзотермічних флюсів на формування зварного з'єднання, доводячи їхню ефективність у скороченні часу процесу та покращенні його стабільності. Ці дослідження вказують на ефективність екзотермічних флюсів у автоматизованих та механізованих методах зварювання, зокрема при наплавленні з використанням порошкових дротів та покритих електродів. Важливо відзначити, що легування наплавленого металу під час застосування екзотермічних сумішей сприяє покращенню його механічних властивостей, знижує пористість та підвищує стійкість до корозії.

Метою даного дослідження є аналіз сучасних підходів до використання екзотермічних сумішей у зварюванні, визначення їхньої ефективності та перспектив подальшого розвитку.

Тепловиділення у процесі зварювання з екзотермічними сумішами визначається рівнянням моментального теплового балансу:

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8$$

де:  $q_1$  – теплота дугового розряду;  $q_2$  – теплота випромінювання та конвекції;  $q_3$  – теплота від електричного струму в електродному стержні;  $q_4$  – теплота, що виділяється під час екзотермічної реакції;  $q_5$  – теплота нагріву та плавлення покриття електрода;  $q_6$  – теплота, передана стержню електрода;  $q_7$  – теплота, що передається навколишньому середовищу;  $q_8$  – теплота, втрачена з краплями розплавленого металу.  $Q$  – загальна кількість тепла (Дж); [ 2, с. 152 ]

Це рівняння дозволяє оцінити розподіл енергії між електродом, зварювальною ванною та навколишнім середовищем під час процесу (рис.1).

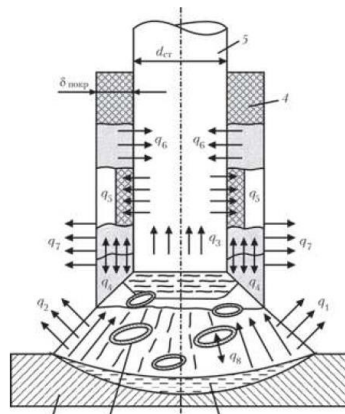


Рисунок 1 Модель нагрівання і плавлення електрода з екзотермічною сумішшю в покритті: 1 – основний метал; 2 – крапля електродного металу; 3 – зварювальна ванна; 4 – покриття; 5 – стрижень. [ 2, с. 151 ]

Застосування екзотермічних сумішей у цьому процесі дозволяє значно покращити стабільність дуги, зменшити розбризкування металу та знизити витрати електроенергії. Екзотермічні компоненти сприяють інтенсивнішому нагріванню електрода і покращенню перенесення металу в зварювальну ванну.

При дуговому зварюванні важливими параметрами є: напруга дуги ( $U$ ) – впливає на довжину дуги та форму шва; сила струму ( $I$ ) – визначає інтенсивність плавлення металу; коефіцієнт корисної дії процесу ( $\eta$ ) – відображає ефективність використання енергії дуги; час зварювання ( $t$ ) – впливає на загальний тепловий баланс процесу.

Для визначення кількості тепла, що виділяється при дуговому зварюванні, використовують таку формулу:

$$Q = U * I * \eta * t$$

Додавання екзотермічних компонентів у покриття електродів дозволяє збільшити  $\eta$ , що знижує енергетичні витрати та сприяє рівномірному плавленню металу.

Екзотермічні суміші у складі покриття електродів також впливають на хімічний склад шва, покращуючи його механічні властивості[4]. Наприклад, введення оксидів заліза та алюмінію підвищує зносостійкість та корозійну стійкість наплавленого металу. Однак необхідно враховувати можливість надмірного нагрівання, що може спричинити утворення дефектів, таких як гарячі тріщини чи пористість шва.

Одним із ключових викликів при використанні екзотермічних сумішей у дуговому зварюванні є необхідність оптимізації складу флюсів. Дослідження показують, що правильне співвідношення екзотермічних компонентів може суттєво впливати на стабільність процесу, якість шва та загальні енергетичні витрати. У промислових умовах дугове зварювання з екзотермічними сумішами використовується при ремонті великих металоконструкцій, у суднобудуванні та в інших сферах, де важливі надійність і висока якість зварних з'єднань. Подальші дослідження в цій сфері мають бути спрямовані на розробку оптимальних рецептур екзотермічних сумішей, що дозволить ще більше підвищити ефективність процесу.

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) є одним із високоефективних процесів, що використовується для отримання якісних зварних з'єднань у товстостінних деталях. Даний метод передбачає використання рідкого шлаку як нагрівального середовища, що сприяє рівномірному розподілу тепла та зменшенню кількості дефектів у металі.



Основною особливістю електрошлакового процесу є використання теплової енергії, що виділяється внаслідок проходження електричного струму через шлакову ванну. Це забезпечує стабільність температурного режиму та контрольований процес формування шва. Завдяки цьому ЕШЗ широко застосовується в суднобудуванні, важкому машинобудуванні та при виробництві великогабаритних металевих конструкцій.

Використання екзотермічних флюсів у цьому процесі дозволяє значно покращити енергетичну ефективність та підвищити якість наплавленого металу. Зокрема, додавання екзотермічних компонентів у флюси сприяє збільшенню тепловиділення, що позитивно позначається на стабільності процесу зварювання[6]. Проте для ефективного застосування таких сумішей необхідне ретельне дослідження їхнього складу та впливу на формування структури металу шва.

Потужність тепловиділення в електрошлаковому процесі визначається формулою:

$$P = I^2 * R$$

де: P – потужність нагріву (Вт); I – зварювальний струм (А); R – опір шлакової ванни (Ом).

Дослідження показують, що оптимізація складу флюсу дозволяє змінювати електричний опір шлакової ванни, що, у свою чергу, дає змогу контролювати процес плавлення електрода та швидкість формування зварного з'єднання. Використання спеціально розроблених екзотермічних сумішей у флюсах сприяє зниженню витрат енергії, збільшенню однорідності наплавленого металу та покращенню механічних властивостей шва.

Однак, незважаючи на всі переваги, електрошлакове зварювання з використанням екзотермічних сумішей потребує подальших досліджень. Необхідно вивчити довготривалі зміни в мікроструктурі металу шва, вплив нових композицій флюсів на властивості зварних з'єднань та розробити методи, що дозволяють забезпечити максимально ефективне використання екзотермічного нагрівання у промислових умовах.

Застосування екзотермічних сумішей у зварюванні є перспективним напрямком, який дозволяє підвищити продуктивність процесів, покращити якість шва та знизити енергетичні витрати. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на розробці нових складів сумішей, оптимізації параметрів зварювання та оцінці довгострокових характеристик зварних з'єднань.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано вплив екзотермічних сумішей на дугове та електрошлакове зварювання, встановлено їхню роль у підвищенні

стабільності процесу, зменшенні дефектності зварних з'єднань та покращенні механічних характеристик шва.

2. Наявність екзотермічних компонентів у складі флюсів та покриттів електродів сприяє збільшенню тепловиділення, що дозволяє компенсувати теплові втрати, знизити енергетичні витрати та покращити якість формування шва.

3. Введення екзотермічних компонентів у зварювальні матеріали позитивно впливає на металургійні процеси у зварювальній ванні, зменшуючи пористість, ймовірність утворення гарячих тріщин і підвищуючи корозійну стійкість зварного з'єднання.

4. Застосування екзотермічних флюсів у механізованих і автоматизованих методах зварювання дозволяє покращити стабільність дуги, зменшити розбризкування металу та підвищити продуктивність процесу.

5. Обґрунтовано необхідність подальших досліджень щодо оптимізації складу екзотермічних сумішей, їхнього впливу на довготривалі характеристики зварних з'єднань та можливості адаптації до різних видів зварювання.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Власов А. Ф., Макаренко Н. А. Екзотермічні суміші в зварювальному виробництві. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, №1 (32), 2014., с 173-179.
2. Власов А.Ф., Макаренко Н. О., Куцій Г.М. Нагрів і плавлення електродів з екзотермічною сумішшю в покритті. Автоматичне зварювання, №6-7 (733), 2014., с. 151 – 154.
3. Власов А.Ф., Карпенко В.М., Леценко О.І. Експериментальне визначення екзотермічного процесу, що проходить при нагріванні і розплавленні електродів / Вісник ДДМА. – 2006. -4, №2 – С. 65-68.
4. Чигарев В.В., Зареченський Д.А., Білик О.Г., Особливості плавлення порошкових стрічок з екзотермічними сумішами в наповнювачі // Автоматичне зварювання – 2007. - №2. – с. 53-55
5. Власов А.Ф., Пресняков В.А., Куцій Г.М. Високопродуктивні електроди на новому зв'язуючому для наплавлення вуглецевих легованих сталей. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, №1 (22), 2011., с 26 - 29
6. Глуценко О. С. Підвищення продуктивності розплавлення металу при термітному зварюванні під флюсом/ О. С. Глуценко, Л. К. Лецинський // Автоматичне зварювання, 1976. – № 10. – С. 68.

**Брижак О.А.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна), **Ковалевський С.В.**, (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ

**Анотація:** статті розглянуто сучасні технологічні можливості енергозберігаючих технологій у машинобудівній галузі. Проаналізовано інноваційні підходи до оптимізації енергоспоживання на різних етапах виробничого процесу, включаючи проектування, виготовлення та експлуатацію обладнання. Запропоновано класифікацію енергозберігаючих технологій за рівнем їх впливу на енергоефективність виробництва. На основі аналізу статистичних даних та експериментальних досліджень визначено пріоритетні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій у машинобудуванні. Обґрунтовано економічну доцільність та екологічні переваги впровадження таких технологій. Дослідження демонструє, що комплексне застосування енергозберігаючих технологій може забезпечити скорочення енергоспоживання на 25-40% залежно від типу виробництва.

**Ключові слова:** енергозбереження, машинобудування, енергоефективність, адитивні технології, рекуперация енергії, цифрові двійники, інтелектуальні системи керування.

**Abstract:** The article examines modern technological capabilities of energy-saving technologies in the machine-building industry. Innovative approaches to optimizing energy consumption at various stages of the production process, including equipment design, manufacturing, and operation, are analyzed. A classification of energy-saving technologies based on their impact on production energy efficiency is proposed. Based on the analysis of statistical data and experimental research, priority directions for the implementation of energy-saving technologies in machine-building are identified. The economic feasibility and environmental advantages of adopting such technologies are substantiated. The study demonstrates that the comprehensive application of energy-saving technologies can reduce energy consumption by 25–40% depending on the type of production.

**Keywords:** energy saving; machine building; energy efficiency; additive technologies; energy recovery; digital twins; intelligent control systems.

Сучасне машинобудування є одним із найбільш енергоємних секторів промисловості, що споживає значні обсяги енергоресурсів та має суттєвий вплив на навколишнє середовище. В умовах зростання цін на енергоносії, посилення екологічних вимог та загострення конкуренції на світовому ринку, впровадження енергозберігаючих технологій стає не лише екологічним імперативом, але й важливим чинником економічної ефективності виробництва [1-3].

Актуальність дослідження технологічних можливостей енергозберігаючих технологій у машинобудуванні обумовлена необхідністю системного підходу до вирішення проблеми енергоефективності галузі. Незважаючи на значний прогрес у розробці

окремих енергоефективних технологій, їх впровадження у виробничу практику залишається фрагментарним та неповним [2,3].

Метою даного дослідження є аналіз технологічних можливостей енергозберігаючих технологій у машинобудуванні, визначення перспективних напрямків їх розвитку та формулювання рекомендацій щодо їх ефективного впровадження у виробничу практику.

Аналіз останніх досліджень показує, що в сучасній науковій літературі переважають роботи, присвячені окремим аспектам енергозбереження, таким як впровадження енергоефективного обладнання, оптимізація технологічних процесів, використання альтернативних джерел енергії. Однак, комплексні дослідження, які б розглядали технологічні можливості енергозберігаючих технологій у машинобудуванні як системне явище, є недостатніми.

В процесі дослідження використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Інформаційною базою дослідження слугували наукові публікації, статистичні дані, технічна документація підприємств машинобудівної галузі, а також результати власних експериментальних досліджень авторів.

На основі аналізу наукової літератури та практичного досвіду впровадження енергозберігаючих технологій у машинобудуванні запропоновано їх класифікацію за рівнем впливу на енергоефективність виробництва (табл.1).

Таблиця 1. Класифікація енергозберігаючих технологій у ашинобудуванні

Рівень впливу	Типи технологій	Приклади
Мікрорівень	Технології оптимізації окремих елементів обладнання	Енергоефективні електродвигуни, системи змащування з низьким тертям
Мезорівень	Технології оптимізації технологічних процесів	Адитивні технології, технології холодного деформування
Макрорівень	Технології оптимізації виробничих систем	Інтелектуальні системи керування виробництвом, рекуперація енергії
Метарівень	Технології оптимізації життєвого циклу продукції	Цифрові двійники, методи проектування з урахуванням енергоефективності

На етапі проектування закладаються основи енергоефективності майбутнього виробу. Сучасні технології цифрового проектування дозволяють оптимізувати конструкцію виробу з урахуванням енергоефективності, як при виготовленні, так і при експлуатації. Особливої уваги заслуговують технології генеративного дизайну, які дозволяють створювати оптимальні конструкції з мінімальною вагою та максимальною міцністю, що забезпечує зниження енергоспоживання при експлуатації .

Технологія цифрових двійників дозволяє моделювати енергоспоживання виробу протягом усього життєвого циклу та

оптимізувати його конструкцію з урахуванням енергоефективності. Проведені дослідження показують, що застосування цифрових двійників забезпечує скорочення енергоспоживання на етапі експлуатації на 15-20% .

1. На етапі виготовлення ключовими енергозберігаючими технологіями є:
2. Адитивні технології (3D-друк) — дозволяють значно скоротити кількість відходів матеріалу та енергоспоживання порівняно з традиційними технологіями. Експериментальні дослідження показують, що при виготовленні складних деталей адитивні технології забезпечують зниження енергоспоживання на 30-50% порівняно з традиційними методами.
3. Технології холодного деформування — дозволяють уникнути енергоємних процесів нагрівання металу при формоутворенні деталей. Застосування цих технологій забезпечує скорочення енергоспоживання на 40-60% порівняно з традиційними методами гарячого деформування.
4. Гібридні технології обробки — поєднують переваги різних методів обробки матеріалів, забезпечуючи оптимальне енергоспоживання. Прикладом є гібридна технологія лазерно-механічної обробки, яка дозволяє знизити енергоспоживання на 25-35% порівняно з традиційними методами.

На етапі експлуатації машинобудівної продукції ключовими енергозберігаючими технологіями є:

1. Інтелектуальні системи керування — забезпечують оптимальні режими роботи обладнання з мінімальним енергоспоживанням. Застосування таких систем дозволяє скоротити енергоспоживання на 15-25% .
2. Системи рекуперації енергії — дозволяють повторно використовувати енергію, яка виділяється при роботі обладнання (наприклад, при гальмуванні електроприводів). Ефективність таких систем може досягати 40-60% .
3. Технології моніторингу та діагностики — забезпечують своєчасне виявлення несправностей та відхилень від оптимальних режимів роботи, що дозволяє уникнути зайвих енерговитрат. Застосування цих технологій забезпечує скорочення енергоспоживання на 10-15% .

На основі аналізу технологічних можливостей та експертних оцінок визначено пріоритетні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій у машинобудуванні:

1. Впровадження технологій цифрового проектування та цифрових двійників — дозволяє оптимізувати конструкцію виробів з урахуванням енергоефективності їх виготовлення та експлуатації. Потенціал енергозбереження — 15-20%.

2. Розширення застосування адитивних технологій — забезпечує значне скорочення відходів матеріалу та енергоспоживання при виготовленні складних деталей. Потенціал енергозбереження — 30-50%.
3. Розвиток гібридних технологій обробки — поєднує переваги різних методів обробки матеріалів, забезпечуючи оптимальне енергоспоживання. Потенціал енергозбереження — 25-35%.
4. Впровадження інтелектуальних систем керування виробництвом — забезпечує оптимальні режими роботи обладнання з мінімальним енергоспоживанням. Потенціал енергозбереження — 15-25%.
5. Розвиток систем рекуперації енергії — дозволяє повторно використовувати енергію, яка виділяється при роботі обладнання. Потенціал енергозбереження — 40-60%.

Для оцінки економічної ефективності впровадження енергозберігаючих технологій у машинобудуванні проведено аналіз витрат та вигод на прикладі типового машинобудівного підприємства середнього розміру (табл. 2).

Таблиця 2. Економічна ефективність впровадження енергозберігаючих технологій

Тип технологій	Інвестиції, тис. грн.	Річна економія енергії, %	Річна економія коштів, тис. грн.	Термін окупності, років
Технології цифрового проектування	3500	15-20	1800-2400	1.8-2.0
Адитивні технології	8000	30-50	3600-6000	2.2-2.5
Гібридні технології обробки	5000	25-35	3000-4200	1.7-1.9
Інтелектуальні системи керування	2500	15-25	1800-3000	1.4-1.7
Системи рекуперації енергії	4000	40-60	4800-7200	0.8-1.0

Аналіз показує, що найбільш економічно ефективними є системи рекуперації енергії, які мають найкоротший термін окупності — менше одного року. Також високу економічну ефективність демонструють інтелектуальні системи керування та гібридні технології обробки.

Проведене дослідження дозволяє зробити висновок, що технологічні можливості енергозберігаючих технологій у машинобудуванні є значними та охоплюють всі етапи життєвого циклу продукції — від проектування до експлуатації. Комплексне застосування цих технологій може забезпечити скорочення енергоспоживання на 25-40% залежно від типу виробництва.

Порівняння отриманих результатів з даними інших досліджень показує, що запропонована класифікація енергозберігаючих технологій за рівнем впливу на енергоефективність виробництва є оригінальною та дозволяє систематизувати різноманітні технологічні рішення. Визначені пріоритетні напрямки впровадження енергозберігаючих технологій у

машинобудуванні узгоджуються з глобальними тенденціями розвитку галузі та відповідають сучасним вимогам до енергоефективності виробництва.

Разом з тим, необхідно відзначити, що впровадження енергозберігаючих технологій у машинобудуванні стикається з рядом викликів, серед яких:

1. Висока вартість початкових інвестицій — багато енергозберігаючих технологій потребують значних капіталовкладень, що може бути проблематичним для малих та середніх підприємств.
2. Дефіцит кваліфікованих фахівців — впровадження сучасних енергозберігаючих технологій вимагає наявності спеціалістів з відповідними знаннями та навичками.
3. Інертність виробничих систем — зміна технологічних процесів та обладнання може бути складним та тривалим процесом, особливо на великих підприємствах з усталеними виробничими традиціями.
4. Недостатній рівень стандартизації — відсутність єдиних стандартів та методик оцінки енергоефективності ускладнює вибір та порівняння різних технологічних рішень.

Подолання цих викликів потребує комплексного підходу, який включає державну підтримку, розвиток системи підготовки кадрів, вдосконалення нормативно-правової бази та стимулювання інноваційної діяльності у сфері енергозбереження.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський С. В., Матвієнко С. А. Особливості енергозберігаючих технологій зміцнення робочих поверхонь деталей автомобілів // *Логістика промислових регіонів : матеріали третьої міжнародної науково-практичної конференції, м. Донецьк – м. Святогірськ, 6–9 квітня 2011 р. – Донецьк : Ландон XXI, 2011. – С. 373–376.*

2. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Віртуальна реальність як інструмент оптимізації життєвого циклу виробів машинобудування // *Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса, 2023. – С. 129–131.*

3. Ковалевський С. В., Сидюк Д. М., Дятленко В. І. Методичний підхід до класифікації та оцінки технологічних систем // *Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса, 2023. – С. 129–133.*

**Бутовський Д.В., Нечаєв В.П., Рязанцев А.О.** (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна)

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВО - МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

***Анотація:** Було проведено аналіз результатів впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок з важкооброблюваних матеріалів і обґрунтування можливості підвищення продуктивності їх обробки на металорізальних верстатах, описаний спосіб здійснення процесу плазмово-механічної обробки. У реальних виробничих умовах необхідно дотримуватися вимог до джерела високотемпературного плазмового нагрівання: можливість регулювання розмірів зони нагрівання; відсутність оплавлення поверхневого шару; забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень; досягнення раціональної мікроструктури зміцненого шару. Використання технології плазмово-механічної обробки забезпечує підвищення продуктивності обробки заготовок з важкооброблюваних матеріалів, які використовуються в суднобудуванні, енергетичному й гірничому машинобудуванні.*

***Ключові слова:** плазмово-механічна обробка, важкооброблювані матеріали, високотемпературний плазмовий нагрів, продуктивність обробки, термічний вплив, металорізальні верстати, стійкість інструменту*

***Abstract:** An analysis was carried out on the effects of plasma arc heating on the machining allowance material of workpieces made from hard-to-machine materials, along with a justification of the potential for increasing processing efficiency on metal-cutting machines. The method for implementing plasma-mechanical processing is described. Under real industrial conditions, it is necessary to meet the requirements for a high-temperature plasma heat source: the ability to adjust the heating zone dimensions; the absence of surface layer melting; the assurance of uniform structural transformation depth; and the achievement of an optimal microstructure in the hardened layer. The application of plasma-mechanical processing technology enhances the efficiency of machining hard-to-process workpieces used in shipbuilding, power engineering, and mining machinery manufacturing.*

***Keywords:** plasma-mechanical processing, hard-to-machine materials, high-temperature plasma heating, machining efficiency, thermal impact, metal-cutting machines, tool wear resistance.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Деталі сучасного технологічного обладнання для переробки мінеральної сировини виготовляють зі сталей і сплавів з підвищеними механічними характеристиками, що приводить до значних утруднень при їхній обробці на металорізальних верстатах. Процес обробки супроводжується підвищеним опором різанню, високими температурами в зоні обробці, швидкою втратою ріжучої здатності інструмента.

Зниження негативного впливу названих факторів можливо завдяки застосуванню високотемпературного плазмового нагрівання матеріалу зрізаного припуску. Вивчення технологічних особливостей плазмово-



механічної обробки (ПМО) заготовок деталей технологічного встаткування представляє практичний і науковий інтерес, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Плазмова дуга, як високотемпературне джерело нагрівання, має широкі технологічні можливості: вона дозволяє реалізувати різноманітні способи обробки металів, у яких, залежно від цілей обробки, плазма може виконувати функції інструмента (сплавка припуску), або функції джерела нагрівання, що передує зняттю припуску лезовим інструментом або поверхневому загартуванню.

Нагрівання заготовки плазмовою дугою викликає ряд явищ: збільшення здатності оброблюваного металу до пластичної деформації; зниження його міцності; виникнення системи структурних перетворень і термічних напружень у поверхневих шарах заготовки; розплавлення поверхневого шару припуску; зміна параметрів тертя на контактних поверхнях заготовки й інструмента, температури контакту; зміна хімічного складу в поверхневих шарах [1]. Характер і обсяг протікання перерахованих явищ залежить від теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, швидкості відносного переміщення заготовки й джерела нагрівання, теплової потужності плазмової дуги. Міняючи зазначені параметри, можна домагатися збільшення ступеня прояву тієї сторони плазмового впливу на матеріал заготовки, домінування якої вважається доцільним для даного випадку [2].

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Оскільки в спеціальній літературі практично відсутня структурована інформація про особливості змін параметрів якості поверхневих шарів деталі при ПМО, прийнято за доцільне доповнити відсутню інформацію по даному напрямку.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою дослідження є проведення аналізу результатів впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок з важкооброблюваних матеріалів і обґрунтування можливості підвищення продуктивності їх обробки на металорізальних верстатах.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

В основу процесу розробки технологічних рекомендацій було поставлено завдання підвищення продуктивності процесу різання й збільшення стійкості різального інструменту за рахунок застосування схеми нагрівання скануючою плазмовою дугою, яка дозволяє реалізувати максимальний ККД нагрівання. Технічний результат від використання пропонованої моделі плазмово-механічної обробки литих і кованих злитків і заготовок із твердою ливарною кіркою, або з важкооброблюваних сплавів, забезпечує поліпшення їх оброблюваності шляхом створення по всьому перетину припуску, за рахунок термічного впливу, аустенітної або іншої структури, яка має значно більш низькі фізико-механічні властивості, ніж

вихідний матеріал заготовки. Внаслідок цього також підвищується період стійкості різального інструменту.

Поставлене завдання вирішується за рахунок способу плазмового нагрівання припуску, яке включає поверхневе плазмове нагрівання поверхні різання без оплавлення при заданій силі струму, його розміщення припуску, переміщення його в зону обробки зі швидкістю різання й видалення інструментом. Значення швидкості різання, яка буде дорівнює швидкості переміщення плазмової дуги щодо заготовки, установлюють із урахуванням величини максимальної температури нагрівання припуску, для забезпечення структурних перетворень на задану глибину, без оплавлення поверхні заготовки.

$$V_p = \left( \frac{I \cdot U \cdot \eta}{\theta_{\max} \cdot b_n \cdot a_n \cdot \lambda} \right)^2 \cdot \frac{\omega \cdot b_n}{\pi}, \quad (1)$$

де  $V_p$  – швидкість різання, м/хв;  $I, U$  – сила струму і напруга плазмової дуги;  $\eta$  – тепловий ККД плазмової дуги;  $\theta_{\max}$  – максимальна температура нагрівання припуску ( $\theta_{\max} \leq \theta_{\text{плавл}}$ );  $b_n, a_n$  – ширина й довжина плями нагрівання на поверхні різання, мм;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/см $\cdot$ °С;  $\omega$  – коефіцієнт температуропровідності см $^2$ /с.

Даний спосіб обробки пояснюється схемою (рис.1), на якому показано розташування джерела нагрівання й зони нагрівання щодо заготовки.

У якості джерела плазмової дуги 3 обраний плазмотрон прямої дії 1. Плазмотрон оснащений магнітно-відхиляючою системою 2, яка складається із двох охолоджуваних магнітопроводів, торці яких розташовані біля сопла плазмотрона й перпендикулярні вектору швидкості різання.

Щоб уникнути перегрів припуску та розташованих нижче шарів заготовки, силу струму плазмової дуги встановлюють з урахуванням накопиченого тепла в заготовці:

$$I \approx \frac{\theta_H \cdot b \cdot \lambda \cdot L \cdot \sqrt{k_1} \exp[0,01 \cdot k_1 \cdot a^2]}{\beta \cdot C_H} \quad (2)$$

де  $\theta_H$  – середня температура нагрівання припуску по перетину шару, що зрізується, на ріжучій кромці інструмента, °С;  $a, b$  – товщина та ширина перетину шару, що зрізується, мм;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/см $\cdot$ °С;  $L$  – відстань між опорною плямою нагрівання та ріжучою кромкою, мм;  $C_H$  – масштабна характеристика плазмової дуги залежно від виду плазмоутворювального газу ( $C_H = 60$  – для аргону;  $C_H = 90$  – для повітря);  $k_1$  – розмірний комплекс, що враховує параметри режиму різання та теплофізичні властивості матеріалу заготовки;  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує накопичення тепла в заготовці в процесі механічної обробки з плазмовим нагріванням зони різання.

$$k_1 = 100V / 24 \omega L, \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість різання, м/хв;  $\omega$  – коефіцієнт температуропровідності см $^2$ /с.

$$\beta = 1 + (\theta_{\text{но}} / \theta_H), \quad (4)$$

де  $\theta_{нд}$  – додаткова температура нагрівання припуску, викликана накопиченням теплоти в заготовці, °C;  $\theta_n$  – середня температура нагрівання припуску.

При цьому в заготовку вноситься певна кількість теплоти, яка не повністю видаляється разом зі стружкою. За експериментальними даними, при чорновій обробці видаляють 70...80 % теплоти, при чистовій обробці – 20...30%, отже, значна частина теплоти, внесена плазмотроном, може залишатися в заготовці та приводити до виникнення деформацій та структурних змін обробленої поверхні.

При цьому амплітуда сканування дуги ( $a_n$ ) становить 0,8-0,9 ширини площини різання. Менше значення амплітуди сканування плазмової дуги встановлюють для матеріалів заготовки з більшим значенням коефіцієнта теплопровідності (леговані сталі), а менше значення – для заготовок з меншим значенням коефіцієнта теплопровідності (титанові сплави), щоб уникнути дефектів на обробленій поверхні.

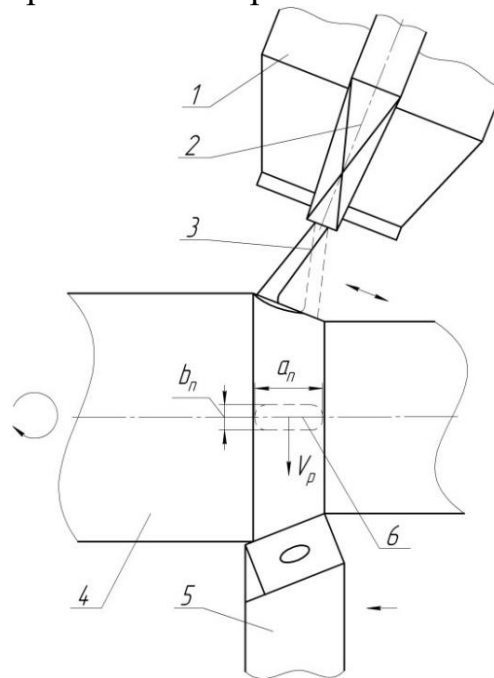


Рисунок 1 – Схема процесу плазмово-механічної обробки

У результаті на оброблюваній поверхні заготовки виникає область термічно знеміцненого металу, що дозволяє збільшити продуктивність механічної обробки різцем при забезпеченні стабільності параметрів процесу плазмового нагрівання внаслідок відсутності оплавлення поверхні заготовки, зменшенні ступеня перегріву різця й, внаслідок цього, збільшенні його періоду стійкості.

Викликає інтерес вплив силового і теплового навантаження леза інструменту на його стійкість не тільки при точінні, а також при плазмово-механічному фрезеруванні (ПМФ).

У результаті проведених досліджень були отримані дані про

температурні поля в матеріалі заготовки при нагріванні плазмовою дугою, що сканує одночасно в двох напрямках щодо вектору хвилинної подачі. Виявлене падіння інтенсивності навантаження передньої поверхні ріжучого клину по всьому шляхові контакту зуба фрези із заготовкою, у порівнянні з обробкою без нагрівання. Вивчені особливості зношування ріжучого леза та умови виникнення та розвитку округлення ріжучої крайки, виведені залежності, що визначають зв'язок стійкості інструмента з режимами нагрівання й різання в конкретних умовах ПМФ.

Встановлено, що попереднє плазмове нагрівання при фрезеруванні площини забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до його округлення, що позитивно позначається в цілому на стійкості інструмента.

Проведене, методом природної термопар, експериментальне вивчення температури різання показало, що вона істотно змінна по шляху контакту зуба фрези із заготовкою. При цьому середній за час контакту рівень температури різання при ПМФ перлітно-мартенситних сталей мінімальний при охолодженні припуску аж до точки початку мартенситного перетворення (рис.2).

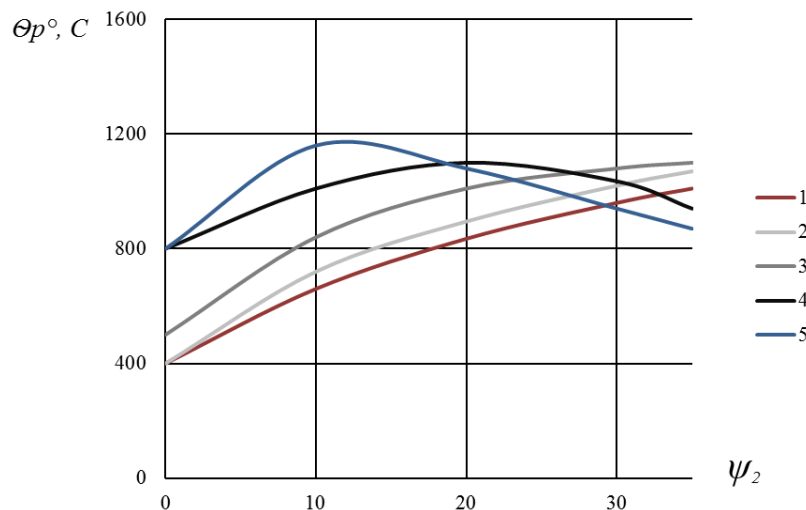


Рисунок 2 – Зміна температури різання по шляху контакту зуба фрези із заготовкою при попутному ПМФ сталі 38ХНЗМФА ( $V = 160$  м/хв;  $t = 8$  мм;  $S_z = 0,2$  мм/зуб; 1,2,3,4 - при плазмовому нагріванні:  $\theta = 450$  °C; 2 -  $\theta = 300$  °C; 3 -  $\theta = 200$  °C; 4 -  $\theta = 20$  °C; 5 - при обробці без нагріву)

При торцевому ПМФ різні ділянки ріжучої крайки в процесі різання знаходяться в різних умовах. Так, вершина зуба на всьому шляху по дузі контакту може переміщатися в шарі, що не зазнає будь-яких структурних

перетворень. У той же час, віддалена від вершини ділянка різальної кромки буде рухатися в застиглому після розплавлення шарі.

При торцевому ПМФ, також, як і при циліндричному, рекомендується попутне фрезерування, оскільки така схема практично запобігає викришування різальних кромки фрези через приварювання стружки до передньої поверхні. При торцевому фрезеруванні можна виключити приварювання стружки в результаті меншого нагріву зони виходу зуба фрези з контакту з заготовкою, що легко здійснити відповідним розташуванням джерела нагріву [3-5].

Зниження інтенсивності навантаження зубів фрези в умовах ПМФ дозволяє ефективно застосовувати безвольфрамкові тверді сплави типу КНТ16 і ТН20, зазвичай непридатні при чорновому фрезеруванні враховуючи їх підвищену крихкість. Зносостійкість таких сплавів в умовах ПМФ часто не гірше, ніж у сплаву Т15К6.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У даній роботі був проведений аналіз результатів впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок з важкооброблюваних матеріалів і обґрунтування можливості підвищення продуктивності їх обробки на металорізальних верстатах, описаний спосіб здійснення процесу плазмово-механічної обробки.

У реальних виробничих умовах необхідно дотримуватися вимог до джерела високотемпературного плазмового нагрівання: можливість регулювання розмірів зони нагрівання; відсутність оплавлення поверхневого шару; забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень; досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.

Технічний результат від використання пропонованої моделі плазмово-механічної обробки литих і кованих злитків і заготовок із твердою ливарною кіркою, або з важкооброблюваних сплавів, забезпечує поліпшення їх оброблюваності шляхом створення по всьому перетину припуску, за рахунок термічного впливу, аустенітної або іншої структури, яка має значно більш низькі фізико-механічні властивості, чому вихідний матеріал заготовки. Внаслідок цього також підвищується період стійкості різального інструменту.

У результаті проведених досліджень були отримані дані про стан параметрів якості обробленої поверхні заготовки при нагріванні плазмовою дугою. Виявлена залежність виду мікроструктури від глибини поверхневого шару заготовки, установлений розподіл залишкових напруг по глибині поверхневого шару. Вивчені особливості схем розташування зон зі зміненою мікроструктурою і їх взаємозв'язок з режимами нагрівання й різання в конкретних умовах плазмово-механічної обробки.

Розроблений процес плазмово-механічного точіння й фрезерування та рекомендації з вибору параметрів нагрівання й різання дозволяють

побільшати продуктивність обробки заготовок із середньо легованих сталей при забезпеченні заданих параметрів якості обробленої поверхні.

Встановлено, що попереднє плазмове нагрівання при механічній обробці забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до стабілізації його округлення, що позитивно позначається в цілому на висоті мікронерівностей і ступені наклепу обробленої поверхні.

Використання технології плазмово-механічної обробки забезпечує підвищення продуктивності обробки заготовок з важкооброблюваних матеріалів, які використовуються в суднобудуванні, енергетичному й гірничому машинобудуванні.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Нечаєв В. П., Рязанцев А. О., Реброва С. В., Лавриненко Д. О. Дослідження впливу технологічних факторів на стійкість ріжучого інструменту при плазмово-механічній обробці // Вісник Криворізького національного університету. – 2021. – Вип. 52. – С. 39–44.

2. Нечаєв В. П., Рязанцев А. О., Чернявська О. В., Лаухіна Л. І., Лавриненко Д. О. Вплив параметрів процесу плазмово-механічної обробки на якість поверхневого шару деталей // Вісник Криворізького національного університету. – 2019. – Вип. 49. – С. 105–113.

3. Нечаєв В. П., Рязанцев А. А. Особливості теплових процесів при обробці заготовок з плазмовим нагрівом // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. пр. – 2010. – Вип. 26. – С. 157–160.

4. Nechaev V. P., Ryazancev A. O., Bondar O. V. Substantiation of the parameters of the process of plasma mechanical milling of titanium alloys and alloyed steels // Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES). – 2020. – Vol. 14, No. 4. – DOI: [10.15282/jmes.14.4.2020.18.0592](https://doi.org/10.15282/jmes.14.4.2020.18.0592).

5. Спосіб механічної обробки з плазмовим нагріванням зони різання : пат. 147056 Україна, МПК В23К 10/02 / Криворізький національний університет ; заявл. 10.11.2020 ; опубл. 07.04.2021, Бюл. № 14.

**Врублевський І. Б.** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## **ГІБРИДНЕ ВИРОБНИЦТВО: ПОЄДНАННЯ АДИТИВНИХ ТА СУБТРАКТИВНИХ (ТРАДИЦІЙНИХ) МЕТОДІВ**

***Анотація:** У статті розглянуто гібридне виробництво, що об'єднує адитивні (3D-друк) та субтрактивні (традиційні) методи обробки в машинобудуванні. Показано економічну ефективність таких процесів завдяки скороченню часу й витрат матеріалів, а також екологічні переваги зменшення відходів. Визначено ключові виклики, зокрема відсутність стандартів, складність розробки програмного забезпечення та високу вартість обладнання. Запропоновано напрями подальших досліджень, що охоплюють розроблення стандартів, удосконалення цифрових платформ та вивчення нових матеріалів.*

***Ключові слова:** гібридне виробництво; адитивні технології; субтрактивні технології; 3D-друк; машинобудування; економічна ефективність; цифрові платформи; стандартизація.*

***Abstract:** This paper examines hybrid manufacturing that combines additive (3D printing) and subtractive (traditional) methods in mechanical engineering. The economic benefits of such processes are highlighted, including reduced production time and material costs, as well as ecological advantages from minimizing waste. Key challenges are identified, such as the lack of standards, the complexity of software development, and high equipment costs. Possible directions for future research include the development of standards, the improvement of digital platforms, and the exploration of new materials.*

***Keywords:** hybrid manufacturing; additive technologies; subtractive technologies; 3D printing; mechanical engineering; economic efficiency; digital platforms; standardization.*

### **1. Постановка проблеми та її зв'язок із науковими і практичними розробками**

Сучасне машинобудування вимагає виробів із дедалі складнішими геометричними формами та підвищеними експлуатаційними характеристиками. Традиційні (субтрактивні) методи оброблення, що ґрунтуються на видаленні надлишкового матеріалу, не завжди дають змогу швидко та економічно отримувати деталі складної конфігурації. Адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM), зі свого боку, дозволяє «надрукувати» виріб пошарово та досягти неабиякої гнучкості в конструюванні.

Проте адитивні методи нерідко потребують додаткової механічної обробки (наприклад, фрезерування або точіння) для досягнення високої точності та чистоти поверхні. Тому в наукових і практичних роботах з'явився підхід, що поєднує обидва види оброблення – **гібридне виробництво** (Hybrid Manufacturing, HM). Завдяки йому знижується матеріаломісткість, скорочуються технологічні операції та підвищується конкурентоспроможність готових виробів.

### **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

- У статті «Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review» [1] здійснено детальний аналіз гібридних виробничих процесів, визначивши переваги щодо зменшення виробничих витрат та скорочення часу виготовлення виробів. Автор запропонував практичні рекомендації для реалізації інтегрованих адитивно-субтрактивних процесів у промислових умовах.
- У статті «Additive manufacturing-integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis»[2] представили економічну модель гібридного виробництва, яка демонструє значну економію матеріалів і зменшення часу виготовлення виробів порівняно з традиційними методами, але також вказали на високі початкові капіталовкладення, що стримують широке застосування цієї технології.
- У статті «Sustainability Perspectives – A Review of Additive and Subtractive Manufacturing» [3] здійснили аналіз екологічних аспектів адитивного і субтрактивного виробництва, довівши, що адитивні технології мають потенціал зменшити негативний вплив на довкілля завдяки мінімізації виробничих відходів і скороченню енергоспоживання. Проте наголошується на необхідності подальших досліджень для оптимізації гібридних технологій з позицій сталого розвитку.
- У статті «Review of Intelligence for Additive and Subtractive Manufacturing: Current Status and Future Prospects» розглянуто потенціал впровадження інтелектуальних технологій (штучного інтелекту, машинного навчання) в адитивне та субтрактивне виробництво. Автори проаналізували поточний стан інновацій у керуванні процесами, контроль якості та автоматизацію, а також окреслили перспективи подальшого розвитку. Вони наголошують на важливості інтегрованих платформ, які можуть оптимізувати планування й моніторинг виробництва, водночас підкреслюючи потребу в стандартизації й міждисциплінарній взаємодії для успішного впровадження інтелектуальних рішень.

### **3. Формулювання невирішених частин загальної проблеми**

Незважаючи на значні досягнення, існують такі невирішені аспекти:

- **Узгодження технологічних режимів друку та фрезерування.** Адитивне виготовлення може спричиняти внутрішні напруження і деформації, які ускладнюють подальше субтрактивне оброблення.
- **Стандартизація й сертифікація** гібридних процесів. Потрібні уніфіковані вимоги до параметрів друку, чистоти поверхні та механічних властивостей виробів, виготовлених комплексним методом.



- **Економічна та екологічна доцільність.** Хоча гібридні технології відкривають широкі конструктивні можливості, їх окупність і вплив на довкілля потребують подальшого детального вивчення.
- **Автоматизація та цифрові технології.** Відсутній єдиний підхід до інтеграції CAD/CAM/CAE для повноцінного управління гібридним процесом у режимі реального часу.

#### **4. Цілі статті та постановка задачі**

Метою статті є аналіз сучасних підходів до гібридного виробництва та визначення основних викликів, які стоять перед дослідниками й інженерами.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати концепцію гібридного виробництва;
- визначити переваги й недоліки інтегрованих технологій;
- оцінити економічні й екологічні аспекти гібридних технологій;
- окреслити складності створення програмного забезпечення;
- сформулювати перспективні напрями подальших досліджень.

#### **5. Виклад основного матеріалу дослідження**

##### **5.1 Концептуальні основи**

Гібридне виробництво передбачає поєднання адитивних методів (наприклад, Directed Energy Deposition (DED) чи Laser Metal Deposition (LMD)) із традиційними субтрактивними методами (фрезерування, точення) у межах одного обладнання. Це дозволяє отримувати вироби з високою точністю і якістю поверхні [1].

**Переваги** такого підходу:

- Зменшення кількості переналагоджень та операцій;
- Отримання складних форм із точними розмірами;
- Скорочення часу та матеріалу, особливо при виготовленні деталей зі складною геометрією.

**Недоліки:**

- Висока вартість устаткування та складність його обслуговування;
- Потреба у кваліфікованому персоналі;
- Додаткові ризики, пов'язані зі стабільністю процесів (особливо за великогабаритного друку).

##### **5.2 Економічні аспекти гібридного виробництва**

Згідно з дослідженням [2], економічна модель інтегрованих адитивно-субтрактивних процесів показує суттєве зменшення витрат, пов'язаних з виробництвом деталей порівняно з традиційними технологіями. Основними чинниками економічної вигоди виступають зменшення витрат матеріалу, скорочення часу на виготовлення та зменшення кількості технологічних

операцій. Проте автори підкреслюють, що початкові капітальні інвестиції, пов'язані з придбанням дорогого гібридного обладнання, залишаються вагомим фактором, який може обмежувати широке впровадження технології у малих та середніх підприємствах.

### **5.3 Екологічні аспекти та сталість гібридного виробництва**

Дослідження дозволяють стверджувати [3], що гібридне виробництво демонструє значний потенціал для забезпечення сталості та екологічної ефективності. Основними перевагами з точки зору сталого розвитку є суттєве зменшення кількості відходів матеріалів порівняно із традиційними технологіями механічного оброблення. Крім того, адитивні методи сприяють скороченню споживання енергії через мінімізацію додаткових технологічних переходів та логістичних операцій. Водночас, автори зазначають необхідність подальших досліджень щодо визначення оптимальних умов інтеграції адитивних і субтрактивних технологій, зокрема, враховуючи рециркулювання відходів та вплив гібридних технологій на життєвий цикл виробу.

### **5.4 Складності створення програмного забезпечення та питання стандартизації**

Створення інтегрованих цифрових платформ для управління гібридними процесами є надзвичайно складним завданням через кардинальні відмінності між технологіями друку та обробки. Відсутність єдиних стандартів ускладнює розробку універсальних CAD/CAM/CAE-рішень, що створює додаткові труднощі для широкого застосування гібридних виробничих технологій [1].

### **5.5 Основні виклики та перспективи гібридних технологій**

Зважаючи на аналіз наукових джерел [1], ключовими викликами гібридних технологій є:

- Високі початкові інвестиції у спеціалізоване обладнання.
- Складність налаштування технологічних параметрів адитивного та субтрактивного процесів для забезпечення стабільної якості продукції.
- Недостатній рівень стандартизації й нормативної бази щодо використання гібридних технологій.
- Потреба у висококваліфікованих кадрах, здатних керувати інтегрованими технологічними комплексами.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка інтегрованих цифрових платформ, що дають змогу прогнозувати й оперативну керувати параметрами гібридних технологій, а також дослідження нових матеріалів із підвищеними експлуатаційними

характеристиками, включно з нанокompозитами й функціональними матеріалами.

Таким чином, викладені у статті результати аналізу свідчать, що гібридне виробництво має значний потенціал для оптимізації технологічних процесів машинобудування як у виробничому, так і в екологічному аспектах. Подальші наукові дослідження у цьому напрямку дозволять глибше розкрити потенціал інтегрованих адитивних і субтрактивних технологій та забезпечити їх ширше впровадження у промисловість.

## **6. Висновки та перспективи подальших досліджень**

Гібридне виробництво демонструє значні переваги у гнучкості, точності й економічності виготовлення складних деталей. Водночас залишається низка нерозв'язаних питань, серед яких висока вартість обладнання, відсутність стандартів, складність розробки програмного забезпечення та потреба у додаткових дослідженнях екологічних аспектів.

Перспективами подальших досліджень є:

- розробка міжнародних стандартів для гібридного виробництва;
- створення інтегрованих цифрових платформ;
- дослідження нових матеріалів;
- детальніше вивчення екологічних аспектів з метою сталого розвитку цієї технології.

Загалом, гібридне виробництво вже сьогодні підтверджує свою здатність змінити підходи до виготовлення деталей будь-якої складності, одночасно підвищуючи їхню функціональність і точність. Подальші дослідження та нові інженерні рішення сприятимуть більш широкому впровадженню цієї перспективної технології в машинобудівну галузь.

## **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1.Grzesik, Wit. (2018). *Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review*. *Journal of Machine Engineering*. 18. 5-24. 10.5604/01.3001.0012.7629.

2.Manogharan, G., Wysk, R., Harrysson, O. (2016). *Additive manufacturing-integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(5), 473–488. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067920>

3.Jayawardane, Heshan & Davies, Ian & Gamage, J.R. & John, Michele & Biswas, Wahidul. (2023). *Sustainability Perspectives – A Review of Additive and Subtractive Manufacturing*. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. 2. 100015. 10.1016/j.smse.2023.100015.

4.Rahman, M. & Bhuiyan, Md.Shahnewaz. (2023). *Review of Intelligence for Additive and Subtractive Manufacturing: Current Status and Future Prospects*. *Micromachines*. 14. 10.3390/mi14030508.

5.ISO/ASTM 52900:2021(en) *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary* <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>

Глеба О.М., Побережець В.Я., наук. кер. к.т.н., доц. Сухоруков С.І.  
(Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна)

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ У МАШИНОБУДУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНОГО НАВЧАННЯ

**Анотація:** Розглянуто використання машинного навчання на основі бібліотеки ML.Net для оптимізації виробничих процесів у машинобудуванні. Основну увагу приділено аналізу даних, прогнозуванню технічного обслуговування обладнання, автоматизації контролю якості та підвищенню ефективності роботи виробничих ліній. Продемонстровано значний потенціал для вдосконалення технологій у галузі машинобудування за рахунок поєднання машинного навчання та інженерних підходів.

**Ключові слова:** машинне навчання, ML.Net, оптимізація виробництва, машинобудування, прогнозування технічного обслуговування, автоматизація контролю якості, аналіз даних, ефективність виробничих процесів.

**Abstract:** The use of machine learning based on the ML.Net library for optimizing production processes in mechanical engineering is considered. The main attention is paid to data analysis, equipment maintenance forecasting, quality control automation, and increasing the efficiency of production lines. Significant potential for improving technologies in the field of mechanical engineering is demonstrated by combining machine learning and engineering approaches.

**Keywords:** machine learning, ML.Net, production optimization, mechanical engineering, maintenance prediction, quality control automation, data analysis, production process efficiency.

*Постановка проблеми в загальному вигляді.* Машинобудування є однією з провідних галузей промисловості, яка визначає технічний прогрес [1, 2] і економічну стабільність держави. У сучасних умовах глобалізації та високої конкуренції зростає необхідність підвищення ефективності виробничих процесів шляхом впровадження інноваційних технологій [3, 4]. Однією з таких технологій є машинне навчання, яке дозволяє аналізувати великі обсяги даних, автоматизувати процеси та приймати обґрунтовані управлінські рішення [5, 6].

Серед різноманітних інструментів машинного навчання ML.Net займає особливе місце завдяки своїй інтеграції з платформою C# [7, 8], що широко використовується в інженерії та промислових додатках. Використання ML.Net у машинобудуванні відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів, включаючи прогнозування технічного обслуговування обладнання, підвищення якості продукції та оптимальне розподілення ресурсів [9-11].

Метою дослідження є аналіз застосування бібліотеки ML.Net для вирішення практичних завдань у галузі машинобудування, а також демонстрація її потенціалу для вдосконалення виробничих процесів.

*Основний матеріал.* У ході дослідження проведено аналіз можливостей

бібліотеки ML.Net для вирішення завдань машинного навчання у сфері машинобудування. На основі запропонованих методів реалізовано кілька моделей, які демонструють ефективність технології у вирішенні типових завдань.

На основі даних про роботу обладнання розроблено модель прогнозування відмов, яка дозволяє заздалегідь визначати необхідність технічного обслуговування. Це сприяє зниженню простоїв виробництва на 15–20% (див. рис. 1) та зменшенню витрат на ремонти.

Завдяки аналізу даних про розподіл завдань між виробничими лініями вдалося скоротити час виконання замовлень на 10–12% (див. рис. 1). Модель машинного навчання рекомендує найбільш ефективні сценарії використання обладнання.

Модель, побудована на основі бібліотеки ML.Net, забезпечує автоматичне виявлення дефектів на етапі виробництва з точністю 94% (див. рис. 1), що дозволяє знизити кількість некондиційної продукції.

Результати дослідження підтвердили, що використання машинного навчання на основі ML.Net є перспективним напрямом для оптимізації виробничих процесів у машинобудуванні. Це дозволяє підвищити продуктивність, знизити витрати та покращити якість кінцевої продукції.

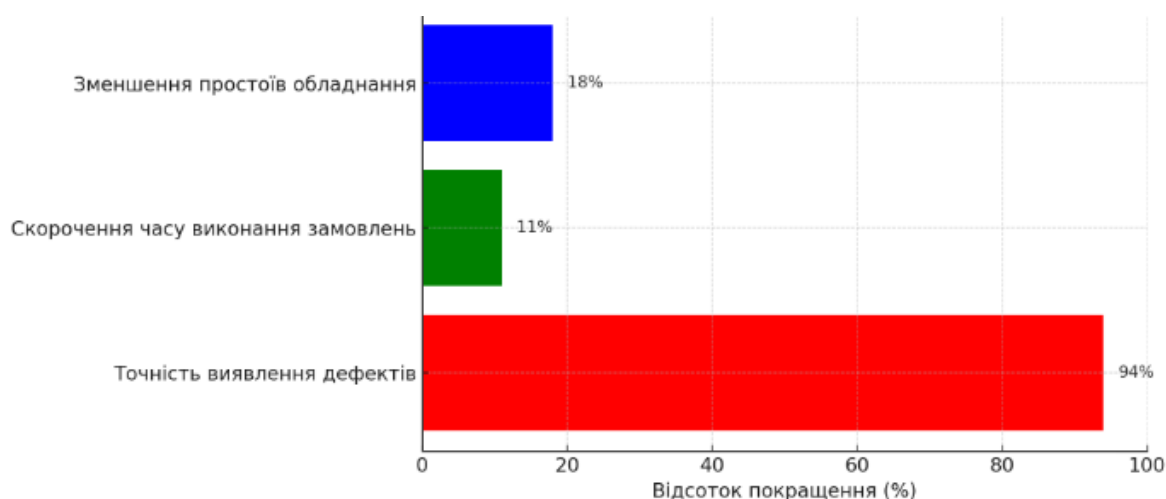


Рисунок 1. Результат оптимізації виробничих процесів за допомогою ML.Net

## ВИСНОВКИ

У результаті дослідження встановлено, що використання бібліотеки ML.Net для вирішення завдань машинного навчання в машинобудуванні має високий потенціал для оптимізації виробничих процесів. Розроблені моделі продемонстрували значні переваги: зменшення простоїв обладнання шляхом прогнозування технічного обслуговування; оптимізація розподілу ресурсів, що сприяє скороченню часу виконання виробничих завдань; підвищення якості продукції завдяки автоматизації контролю дефектів.

Використання машинного навчання дозволяє забезпечити ефективний аналіз даних, адаптацію виробничих процесів до змінних умов та зниження

витрат. Це підкреслює значення впровадження інструментів машинного навчання у сучасне машинобудування як інноваційного підходу до вирішення актуальних завдань галузі.

Отримані результати можуть стати основою для подальших досліджень і розробок у напрямі автоматизації та підвищення продуктивності промислового виробництва.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Березюк, О. В., Віштак, І. В., Лемешев, М. С. Динаміка обсягів утворення некондиційних машин та обладнання загальномашинобудівного призначення в Україні. *Наукові праці ВНТУ*, 2022. № 1. С. 6. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-1-13-18>

2. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Барановський А. Д., Віштак І. І., «Перспективи використання лазерних технологій в машинобудуванні», на Матеріали І науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 10-12 березня 2021 р. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2021/paper/view/12271>.

3. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Сердюк О. В., Домославський В. М. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця: ВНТУ, 2022. № 2. С. 96-100.

4. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.

5. Xu, Y., Kohtz, S., Boakye, J., Gardoni, P., Wang, P. Physics-informed machine learning for reliability and systems safety applications: State of the art and challenges. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 230. Art. 108900. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108900>.

6. Chen Zheyi, Xu Liuchang, Zheng Hongting, Chen Luyao, Tolba Amr, Zhao Liang, Yu Keping, Feng Hailin. Evolution and Prospects of Foundation Models: From Large Language Models to Large Multimodal Models. *Computers, Materials and Continua*. 2024. Vol. 80, Iss. 2. P. 1753–1808. ISSN 1546-2218. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.052618>.

7. Побережець В. Я., Яцук Д. А., Рижих О. В., Піонткевич О. В. Розробка прикладних програм мовою програмування С# для автоматизованого проектування металорізного інструменту. Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р. Електрон. текст. дані. 2024. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2024/paper/view/20531>

8. Побережець В. Я., Кузьменко П. А., Піонткевич О. В. Застосунок мовою програмування С# для автоматизованого розрахунку геометричних параметрів шпонкової фрези. Матеріали ІV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 23-27 березня 2025 р. Електрон. текст. дані. 2025. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2025/paper/view/24089>.

9. ML.NET | Машинне навчання для .NET. Microsoft. URL: <https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/ai/ml-dotnet> (date of access: 30.03.2025).

10. ML.NET documentation. Learn Microsoft. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/machine-learning/> (date of access: 30.03.2025).

11. ElRobrini F. Federated learning and non-federated learning based power forecasting of photovoltaic/wind power energy systems: A systematic review / Ferial ElRobrini, Syed Muhammad Salman Bukhari, Muhammad Hamza Zafar, Nedaa Al-Tawalbeh, Naureen Akhtar, Filippo Sanfilippo // *Energy and AI*. – 2024. – Vol. 18. – Article 100438. – ISSN 2666-5468. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100438>.

**Горбачов О.С., наук. кер. Руденко В.М.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ВВЕДЕННЯ АНАЛОГОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

**Анотація:** У статті розглянуто стан науково-практичних питань збільшення швидкості обробки аналогових сигналів, прискорення аналого-цифрового перетворення, оптимізацію обробки сигналів і зниження затримок в системах збору даних. Наведено структурні схеми, що дозволяють підвищити швидкодію введення аналогової інформації в цифрові системи.

**Ключові слова:** аналогово-цифрове перетворення, швидкодія, обробка аналогових сигналів, введення інформації, структурні схеми, рухома хвиля, мікроЕОМ, системи збору даних.

**Abstract:** The article examines the current state of scientific and practical issues related to increasing the speed of analog signal processing, accelerating analog-to-digital conversion, optimizing signal processing, and reducing delays in data acquisition systems. Structural diagrams are presented that enable improved speed of analog information input into digital systems.

**Keywords:** analog-to-digital conversion, processing speed, analog signal processing, data input, structural diagrams, traveling wave, microcontroller unit (MCU), data acquisition systems.

**Постановка проблеми.** Швидкодія введення аналогової інформації грає ключову роль в таких областях, як промислова автоматизація, телеметрія, медична діагностика і радіотехнічні системи. Сучасні технічні системи вимагають високої швидкості і точності перетворення аналогових сигналів в цифрові дані. Питання підвищення ефективності аналогово-цифрового перетворення (АЦП) активно досліджується в науковій літературі і практичних розробках, проте залишається ряд невирішених завдань, пов'язаних з оптимізацією швидкодії і зниженням втрат інформації. Наукові дослідження в області АЦП зосереджені на поліпшенні характеристик перетворювачів, розробці нових алгоритмів цифрової обробки сигналів і підвищенні пропускну здатності інтерфейсів передачі даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті «A high speed counter for analog-to-digital converters» пропонується високошвидкісний та енергоефективний синхронний лічильник із використанням тригера з перемиканням (TFF) на основі справжньої однофазної синхронізації (TSPC) із вбудованою комбінаційною логікою на основі розширеної справжньої однофазної синхронізації (E-TSPC). Обговорюється принцип реалізації як синхронного підйомного, так і зворотного лічильника як на позитивних, так і на негативних фронтах за допомогою цих тригерів. За таким же принципом працює і сірий лічильник. Результати моделювання показують, що восьмирозрядний синхронний лічильник може працювати на тактових частотах до 4,54 ГГц з розсіюваною потужністю 0,67 мВт, тоді як

восьмирозрядний асинхронний лічильник може працювати на тактових частотах до 5 ГГц з розсіюваною потужністю 0,5 мВт. Для аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) потрібен синхронний лічильник, здатний ефективно працювати в широкому діапазоні частот. Окрім необхідності в АЦП, він є основним блоком для різноманітних додатків у системах зв'язку та вимірювання. [1]

У статті «The architecture of delta sigma analog-to-digital converters using a voltage-controlled oscillator as a multibit quantizer» пропонується нова архітектура для аналого-цифрового перетворювача дельта-сигма з надлишковою дискретизацією ( $\Delta$ - $\Sigma$  АЦП), що використовує генератор, керований напругою (VCO). VCO, пов'язаний з лічильником імпульсів, працює як високошвидкісний квантувач. Цей квантувач VCO також має функцію формування шуму першого порядку, оскільки фаза вихідного імпульсу є інтегральною величиною вхідної напруги. Продуктивність запропонованого перетворювача оцінюється за допомогою функціонального моделювання. SNR 59 дБ при смузі пропускання 5 МГц отримано з  $f_{os} = 400$  МГц, навіть у випадку 1-бітового квантувача. Багатобітний квантувач, що використовує високочастотний VCO, значно покращує SNR і пропускну здатність сигналу. Він забезпечує широкосмуговий АЦП із надлишковою дискретизацією для відео та бездротових сигналів і низьковольтне рішення системи на кристалі для мультимедійних програм.[2]

*Формулювання раніше не вирішених частин загальної проблеми.* Необхідність підвищення швидкодії підсистем аналогового введення викликана великим часом перетворення в АЦП. Зменшення часу перетворення в АЦП можливо, але при цьому необхідно знижувати розрядність. Це можливо тільки до тих пір, поки похибка не стане більше за таку, що припускається для визначеного класу систем. Якщо прийняти рівномірним крок квантування по амплітуді, то дискретизація за часом матиме нерівномірний крок, а це призводить до серйозних ускладнень при технічній реалізації. Крім того, вид сигналу заздалегідь невідомий і крок дискретизації не може бути обраний оптимальним чином, за винятком тих випадків коли використовуються адаптивні пристрої. Використання адаптивних пристроїв ще більше ускладнює, і без того складну, технічну реалізацію.

*Формулювання цілей статті.* З урахуванням вищевикладеного, метою даної роботи є підвищення швидкодії підсистем аналогового введення, шляхом використання спеціальних схемних рішень.

*Виклад основного матеріалу.*

Аналогова інформація може бути введена двома методами: послідовним або паралельним.

Паралельний метод перетворення забезпечує високу швидкодію, проте відрізняється складністю в реалізації схеми. Паралельні АЦП дуже швидкі, але зазвичай мають розрядність не більше 8 бітів (256 компараторів), оскільки, мають велику і дорогу схему.[3]



АЦП цього типу мають дуже великий розмір кристала мікросхеми, високу вхідну ємність, і можуть видавати короточасні помилки на виході.[3]

Паралельна схема вводу інформації перетворює вхідну напругу в  $n$ -розрядний двійковий код. Відповідно, на виході формується  $m = 2^n$  різних кодових комбінацій, кожна з яких відповідає певному  $m$  під діапазону вхідного сигналу. Наприклад, якщо вхідний сигнал змінюється в діапазоні від 0 до 8 В при  $n = 3$ , то кожна з восьми можливих кодових комбінацій (000-111) буде представляти один з восьми під діапазонів з кроком 1 В.

До складу схеми паралельного перетворення входить дільник опорної напруги  $U_K$  (одночасно виробляючий всі  $m-1$  рівнів, які задають кордони відповідних під діапазонів) і  $m-1$  компараторів, що встановлюють співвідношення між перетвореною напругою  $U_{вх}$  і цими рівнями. У розглянутому прикладі ( $U_{вх}=0...8В$ ,  $n=3$ ,  $m=8$ ) дільник повинен подати на перші входи семи компараторів напругу 0,5В; 1,5В; ...7,5В. На другі входи цих компараторів подається напруга  $U_{вх}$ . Якщо в процесі перетворення по спрацьовуваннях компараторів з'ясується, наприклад, що  $0,5В < U_{вх} < 1,5В$ , це і означає, що вихідний код повинен дорівнювати 001. Сформований дешифратором сигнал запускає відповідний АЦП і після закінчення перетворення отримані коди підсумовуються.

Структурна схема, яка реалізує цей метод наведена на рисунку 1.

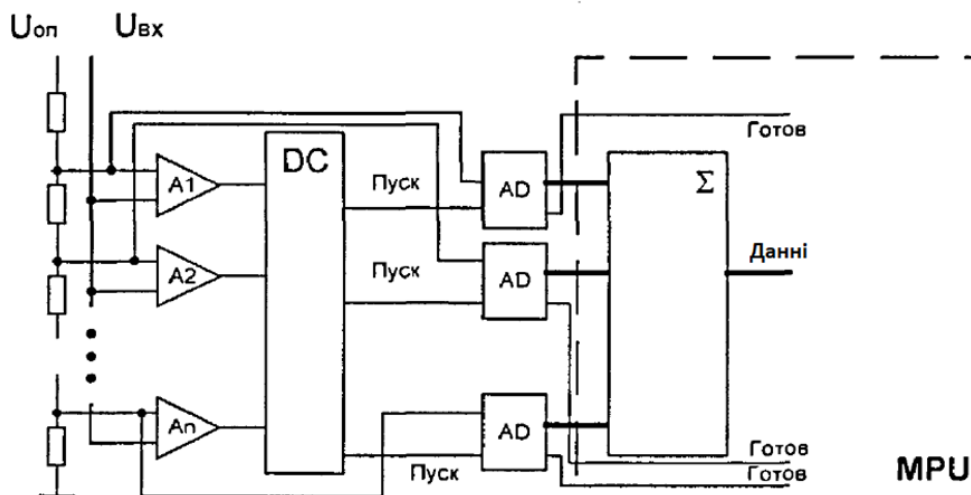


Рисунок 1 – Структурна схема паралельного введення інформації

Паралельні АЦП доволі часто використовуються для відео або інших високочастотних сигналів. При послідовному перетворенні, АЦП перетворить аналоговий сигнал в цифровий за  $N$  кроків, де  $N$  — розрядність АЦП [3].

Структурна схема, реалізує цей метод, наведена на рисунку 2. Але в даному випадку в схему додатково вводяться цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і суматор. Процес починається з запам'ятовування вхідного сигналу, після чого здійснюється його оцифрування. Отриманий цифровий код перетворюється назад в аналоговий сигнал за допомогою ЦАП і подається на вхід суматора, де обчислюється різниця сигналів.

Отримана різниця перетворюється в цифровий код за допомогою другого АЦП. Останньою операцією є підсумовування кодів обох АЦП. Розглянемо принцип роботи схеми АЦП.

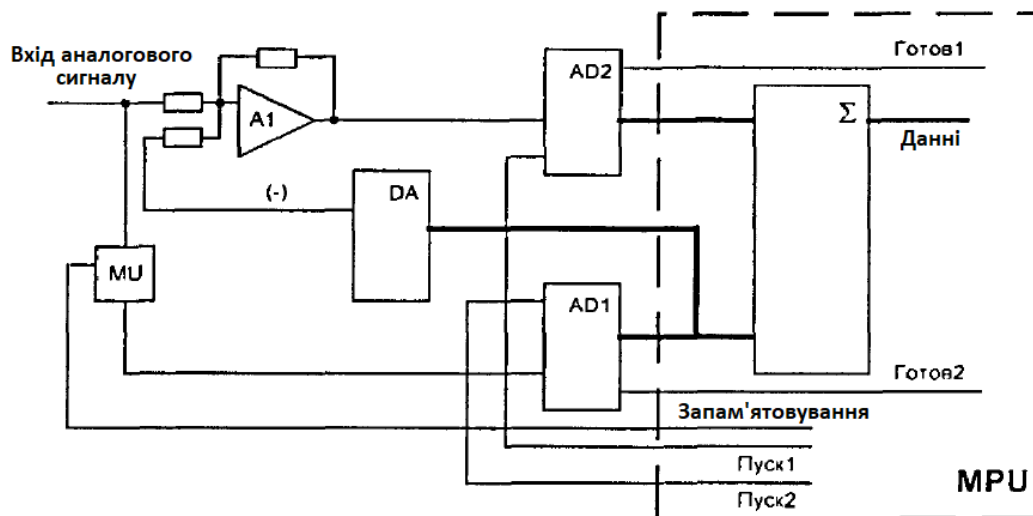


Рисунок 2 – Структурна схема послідовної обробки аналогового сигналу

Вхідний аналоговий сигнал через УВХ надходить на перший АЦП, з виходу якого в цифровому еквіваленті отримують шість старших розрядів перетворення. Кодова комбінація надходить на вхід ЦАП, число розрядів якого не менше 10-12. Вихідний сигнал ЦАП порівнюється в підсилювачі різниці з вхідним аналоговим сигналом, а результат порівняння перетворюється в іншому АЦП для отримання молодших розрядів коду. Цифрова інформація з шести старших і молодших розрядів коду надалі об'єднується на цифровому суматорі або на шині даних МП. Для забезпечення максимальної швидкодії 10-розрядного пристрою АЦП в ньому використовується ЦАП і підсилювач А1, сума часів встановлення яких не перевищує 100 нс. При сполученні мікросхем АЦП з реальними джерелами сигналів необхідно використовувати буферні підсилювачі, для забезпечення роботи великих інтегральних схем (ВІС) на велике ємнісне навантаження і малий повний опір, інвертори і пристрої узгодження рівнів вхідної напруги (позитивної полярності або в діапазоні  $\pm 1$  В). АЦП цього типу володіють одночасно високою швидкістю і хорошою розрядністю.[3]

Підвищення швидкодії можна досягти, якщо використовувати схему, наведену на рисунку 3. Робота схеми зводиться до комутації вхідного сигналу по черзі на всі АЦП, які використані в схемі. Це дозволяє, не чекаючи закінчення роботи попереднього АЦП підключити наступний. Тим самим, організовуючи режим рухомої хвилі, можна в значній мірі підвищити частоту вхідного сигналу. Вхідний сигнал через аналоговий комутатор надходить на вхід обраного АЦП і запам'ятовує в аналоговому запам'ятовуючому пристрої (АЗП). Параметри АЗП повинні забезпечувати час зберігання сигналу на період часу перетворення сигналу в АЦП. Потім проводиться перемикання демультиплектора і відбувається запам'ятовування наступного значення оцифрованого сигналу.

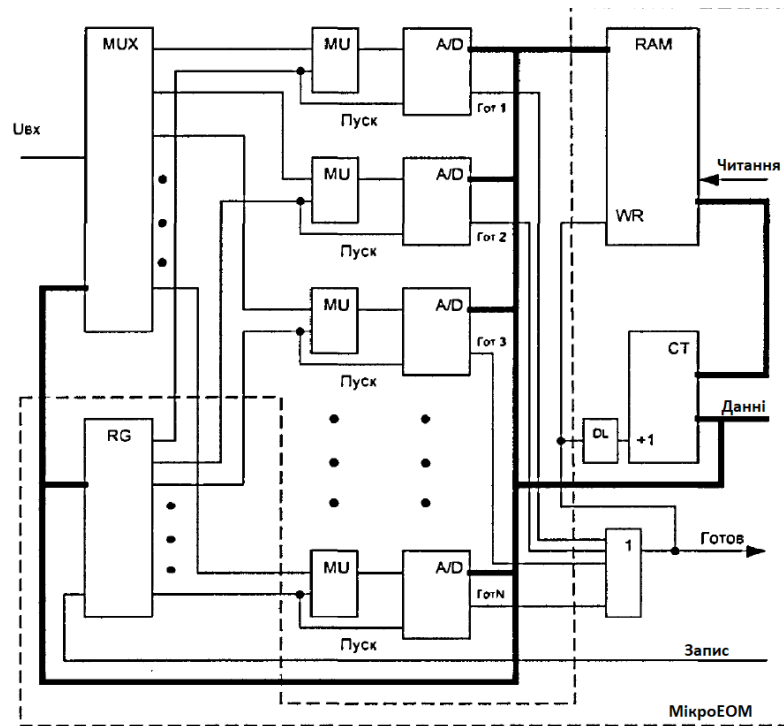


Рисунок 3 – Структурна схема введення інформації в режимі "рухома хвиля"

Процес триває безперервно, до тих пір, поки не буде вичерпано інтервал часу відповідного введення необхідного обсягу інформації, що забезпечує достовірну оцінку діагностичної інформації. Введена інформація заноситься в оперативну пам'ять. Адреса комірки пам'яті формується за сигналом готовності відповідного АЦП з використанням схеми інкременту побудованої на лічильнику. Управління роботою АЦП здійснюється з використанням регістра, вмістом якого є керуюче слово, що ініціює роботу необхідного числа АЦП і їх послідовність. Кількість АЦП, що беруть участь в перетворенні, вибирається виходячи з частоти вхідного сигналу, часу перетворення АЦП і числа дискрет, необхідних для якісного відновлення оброблюваного сигналу. В якості недоліку можна вказати порушення послідовності занесення даних в пам'ять, пов'язаної з різницею в часі перетворення, навіть для однотипних АЦП. Тому апаратна частина потребує схем синхронізації. При мікропроцесорній реалізації цей дефект легко усувається програмним шляхом. Варіант реалізації з використанням мікропроцесора наведено на рисунку 3 пунктирною лінією.

Розширення функціональних можливостей можна досягти, якщо на вході встановлювати не тільки демультимплексор, але і мультимплексор. Це дозволяє підключати не один канал отримання діагностичних даних, а декілька. Причому всі можливості попередньої схеми зберігаються. Однак введення окремого пристрою пам'яті для кожного АЦП дозволяє більш ефективно управляти як процесом занесення інформації, так і її вилучення для подальшої обробки. При такій конфігурації можна отримати подвійну «рухома хвилю», тобто перемикає спочатку мультимплексор, а потім демультимплексор. Таке рішення дозволяє більш ефективно формувати діагностичні дані, підвищуючи рівень інформативності про стан

діагностуємого об'єкту. Структурна схема, що реалізує цей принцип, наведена на рисунку 4.

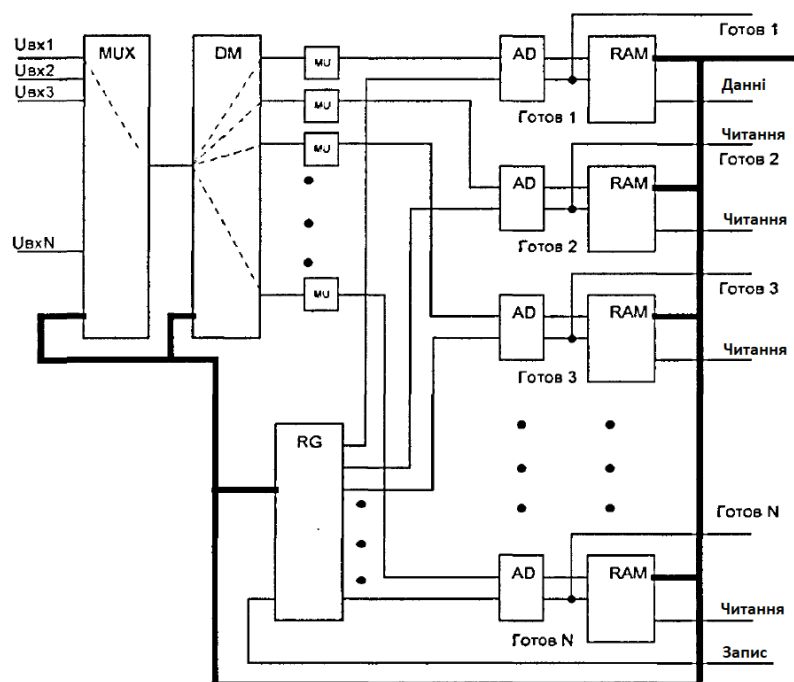


Рисунок 4 – Структурна схема введення інформації в режимі «подвійна рухома хвиля»

У наукових експериментах підсистеми введення інформації повинні відповідати функціональній повноті, гнучкості, здатності забезпечувати будь-який режим, за бажанням дослідника. При такому підході найбільш підходящою буде схема, наведена на рисунку 5.

Вона побудована як самостійний пристрій на базі однокристалної мікроЕОМ. Зв'язок з головним комп'ютером здійснюється по загальній шині, що дозволяє отримувати високі швидкості передачі діагностичної інформації. Гнучкість системи надає блок мікропрограмного управління, що забезпечує формування управляючих сигналів і прийом сигналів синхронізації і набір АЦП, здатних реалізувати послідовний і паралельний способи обробки сигналів. Блок мікропрограмного управління побудований на самостійній мікроЕОМ з меншими функціональними можливостями і вбудованою флеш - пам'яттю. Це дозволяє перепрограмувати режими роботи і послідовність викональних дій. Різні режими роботи задаються налаштуванням регістра режимів, а внутрішній стан схеми визначається станом регістра статусу. Цей регістр циклічно фіксує сигнали від внутрішніх пристроїв і передає цю інформацію в управляючу мікроЕОМ. Вся інформація, що надходить від об'єкта діагностики збирається в пристрої пам'яті. Інформація, яка зберігається в запам'ятовуючому пристрої (ЗП) передається в головний комп'ютер для обробки. При необхідності обсяг пам'яті розширюється за рахунок використання внутрішньої пам'яті мікроЕОМ.

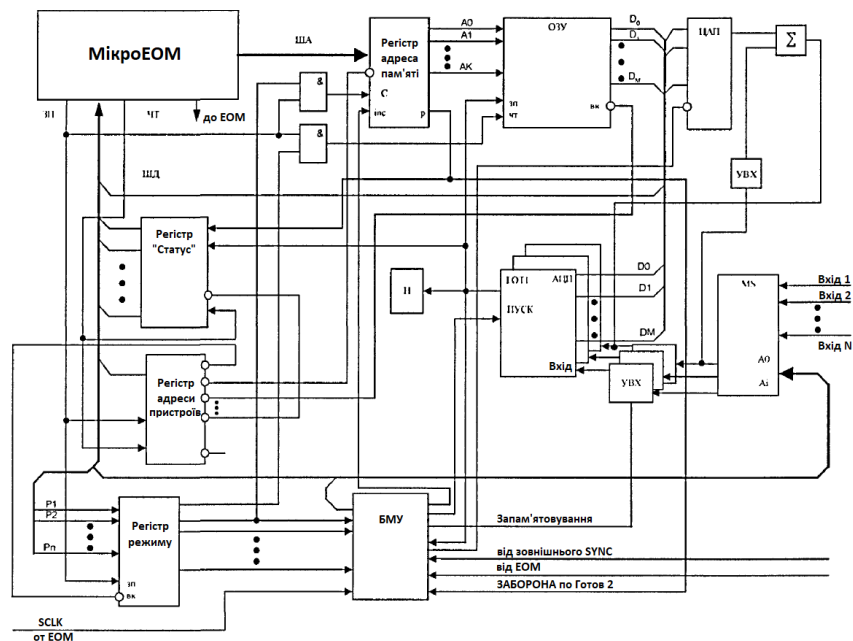


Рисунок 5 – Універсальна схема введення аналогової інформації

ЗП може працювати як автономно, за сигналами готовності АЦП, так і від сигналів мікроЕОМ. Це забезпечується застосуванням регістра адреси, який дозволяє модифікувати дані як при послідовному, так і при паралельному введенні.

*Висновки та перспективи подальших досліджень.* В ході роботи було розглянуто питання підвищення швидкодії підсистем аналогового введення. Для його вирішення запропоновано спеціальні схемні рішення, які дозволяють оптимізувати процес перетворення аналогових даних в цифрові. Застосування подібних рішень сприяє зниженню затримок і збільшенню ефективності обробки сигналів, що відіграє важливу роль у розвитку сучасних високошвидкісних систем збору і обробки інформації. Подальше вдосконалення цих методів, включаючи використання нейромережових алгоритмів і квантових технологій, відкриє нові можливості в різних сферах науки і техніки.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Prudhvi Raj Thota, Ashis Kumar Mal. A high speed counter for analog-to-digital converters. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7522592> (date of access: 24.03.2025).
2. The architecture of delta sigma analog-to-digital converters using a voltage-controlled oscillator as a multibit quantizer / A. Iwata et al. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/775391> (date of access: 24.03.2025).
3. Учасники проєктів Вікімедіа. Аналого-цифровий перетворювач – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналого-цифровий\\_перетворювач](https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналого-цифровий_перетворювач) (дата звернення: 25.03.2025).

Гринь О.Г., Жаріков С.В., Шахбазян О.Ф., Кеніч Д.І., Титаренко Д.В.  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна)

## ВАРІАНТИ ВИГОТОВЛЕННЯ САМОЗАХИСНОГО ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА МІДІ ЗІ СТАЛЮ

**Анотація:** При зварюванні міді і міді зі сталлю якість зварного з'єднання в значній мірі залежить від чистоти основного металу і складу електродного матеріалу. На даний час розроблена значна кількість електродних матеріалів і технологій зварювання міді і міді зі сталлю, але актуальним залишається розроблення самозахисних порошкових дротів для механізованого зварювання розглянутих з'єднань. В статті розглянуто результати дослідження вдосконалення складу самозахисного порошкового дроту з мідною і сталеву оболонками, раціональних технологічних режимів волочіння, впливу режимів зварювання і наплавлення на хімічний склад металу шва.

**Ключові слова:** самозахисний порошковий дріт, зварювання міді, зварювання міді зі сталлю, хімічний склад металу шва, мідна оболонка, сталева оболонка, волочіння дроту, оптимізація зварювального процесу.

**Abstract:** When welding copper and copper to steel, the quality of the welded joint largely depends on the purity of the base metal and the composition of the electrode material. Currently, a significant number of electrode materials and technologies for welding copper and copper to steel have been developed, but the development of self-shielding flux-cored wires for mechanized welding of the considered joints remains relevant. The article reviews the results of research into improving the composition of self-shielding flux-cored wires with copper and steel coatings, rational technological modes of drawing, and the influence of welding and surfacing modes on the chemical composition of the weld metal.

**Keywords:** self-shielded flux-cored wire, copper welding, copper-to-steel welding, weld metal chemical composition, copper sheath, steel sheath, wire drawing, welding process optimization.

Міді притаманні такі властивості, як теплопровідність, пластичність та корозійна стійкість, що дозволяє використовувати мідь та її сплави в галузях промисловості при виготовленні теплообмінників, кристалізаторів, доменних фурм, деталей хімічної апаратури. При виготовленні металевих конструкцій часто виникає необхідність з'єднання міді та її сплавів зі сталями і сплавами різних систем легування. Основна проблема при зварюванні міді зі сталлю виникає внаслідок істотної різниці у фізико-хімічних властивостях матеріалів, що зварюються, високої теплопровідності міді та її здатності поглинати гази. Останнє, при зварюванні, викликає появу в шві пір, окисних включень, тріщин, що робить практично неможливим використання таких з'єднань для роботи в умовах підвищеного тиску, вологості та температур [1, 2].

Дослідження щодо зварюваності міді та міді зі сталлю показують, що на якість зварювання впливає чистота основного металу та наявність в складі електродного матеріалу домішок, здатних розкислювати мідь.

При взаємодії рідкої міді зі сталлю, зокрема при зварюванні та наплавленні, утворюються тріщини, заповнені міддю. Подібні явища пов'язують із розкислювальною дією рідкої міді, а також з особливим енергетичним станом сплаву на межах зерен та підвищеною, внаслідок цього, дифузією атомів рідкої фази в кристалічні ґрати твердого металу. З урахуванням досить великих розбіжностей коефіцієнтів теплопровідності міді і сталі, необхідно підтримувати термічний стан деталей при зварюванні для зменшення переохолодження рідкого розплаву Cu – Fe при кристалізації [2].

Комплексна оцінка механічних властивостей, термоциклічної довговічності, характер руйнування зразків показали, що при експлуатації зварних з'єднань низьковуглецева сталь – мідь в умовах підвищених та змінних температур оптимальним є вміст 3...6 % заліза у металі шва [3]. За даними [12], починаючи з концентрації заліза 5 % підвищується міцність зварних швів, що обумовлено двофазною структурою міді з дрібними зернами, між якими розташовані частинки сплаву на залізній основі. При збільшенні концентрації заліза понад 42 % міцність і пластичність зварного шва знижуються, що обумовлено наявністю мікротріщин, які виникають під час кристалізації металу шва.

Науковці ІЕЗ ім.Є.О. Патона запропонували плавлений флюс для зварювання та наплавлення міді та її сплавів, в який з метою поліпшення механічних властивостей металу в зварних швів введений фтористий натрій у кількості 5-15 %, а інші компоненти взяті в наступному співвідношенні (в %):  $\text{SiO}_2 = 16-22$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25-35$ ;  $\text{MgO} = 5-10$ ;  $\text{CaO} = 5-15$ ;  $\text{CaF}_2 = 20-25$ ;  $\text{MnO} \leq 0,5$  [4].

Для ручного дугового зварювання міді та її сплавів, а також міді зі сталлю запропоновано низку марок покритих електродів фірм ESAB, BOHLER [5, 6, 7]. Найбільш широке застосування отримали електроди марок "Комсомолец 100" [8]. В результаті зварювання листової сталі ст.3 завтовшки 3 мм та міді марки МО завтовшки 14 мм у тавр електродами «Комсомолец 100», на постійному струмі зворотної полярності з попереднім підігрівом до 650-700 °С, встановлено, що зварний шов формується добре, тріщини та пори у зварних швах відсутні. Виконання зварювання з підігрівом металу нижче вказаної температури погіршує формування шва, утворюються напливи на міді та подрізи на сталі. З боку сталі виникає невелика пористість, що свідчить про недостатній рівень розкислення металу шва [9].

У роботі [10] розглянуто вдосконалення технології зварювання під флюсом АН-60 міді зі сталлю дротом марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2. Встановлено, що отримання якісних швів одним електродом з товщиною кромок, що зварюються, від 5 до 10 мм залежить від обробки кромок, режиму зварювання, довжини зміщення електрода від лінії стику на мідь.

Визначенню оптимального складу металу шва при зварюванні

плавленням міді з низьковуглецевою сталлю присвячені роботи [10, 12], показано, що співвідношення 52 % міді та 42 % заліза забезпечує двофазну структуру, що є подрібненими зернами сплаву на основі міді між якими розташовані зерна сплаву на основі заліза. Для зварювання міді зі сталлю відомі дроти з оболонкою з мідної і сталевієї смуги [13].

Для отримання бездефектного зварного шва, забезпечення необхідного рівня розкислення міді та оптимального співвідношення мідь/залізо в металі шва, перспективним є застосування самозахисних порошкових дротів трубчастої конструкції.

Виходячи з цього, розробка та застосування електродних матеріалів, що забезпечують необхідні властивості металу шва, що дозволяють застосовувати механізовані способи зварювання без додаткового захисту дуги є дуже актуальні.

Умови утворення дроту при проходженні через волокни будуть різними, виходячи з механічних властивостей металу оболонки [11].

Мета роботи – визначення раціональних технологічних режимів волочіння СПД з мідною і сталевією оболонками та вдосконалення складу самозахисного порошкового дроту (СПД), що забезпечує оптимальну кількість заліза і міді в зварному шві.

Вибір складу шихти порошкового дроту для зварювання міді зі сталлю здійснився з урахуванням перерахованих вище особливостей процесу. Попередніми дослідженнями було встановлено, що істотним недоліком СПД з мідною оболонкою та вмістом в осерді оксидів є підвищене розбризування, яке особливо проявляється при зварюванні міді. Тому було проведено розроблення дроту зі сталлю оболонкою, що забезпечило утворення якісних швів на міді при низькому значенні втрат на розбризування. Таким чином, встановлена необхідність застосування двох СПД для зварювання міді зі сталлю і міді з міддю. Це дає можливість в обох випадках отримати близькі за хімічним складом зварні шви. Для виготовлення дослідних порошкових дротів використовувалася мідна стрічка марки М1 розміром 0,5x15 мм і холоднокатана із сталі 08пс, такого ж перетину. Склад порошкових дротів наведено в таблиці 1. Склад осердя порошкових дротів складається з компонентів, що забезпечують легування, розкислення та захист рідкого металу від взаємодії з повітрям, чому сприяло застосування сполук фтору, а саме плавикового шпату ( $\text{CaF}_2$ ) та натрію кремнефтористого ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ). Як початковий критерій при виборі газошлакової основи осердя приймали зварювально-технологічні властивості порошкового дроту. Такому критерію найбільше відповідає шлакоутворююча система: плавиковий шпат – натрій кремнефтористий - цирконовий концентрат.

*Таблиця 1 - Склад експериментальних порошкових дротів*

№ ПП	Найменування компонентів	Склад шихти осердя, %	
		БрЖКМц-35-3-1	БрКМц-3-1
1	Плавиковий шпат	12	30



2	Цирконовий концентрат	5	5
3	Фероманган	1	5
4	Феросиліцій	5	10
5	Натр кремнефтористий	5	25
6	Графіт сребристий	-	25
7	Мідний порошок	30	
8	Феротитан	2	-
9	Алюмінієвий порошок	40	-
	Оболонка СПД	08пс	М1

Експериментальне дослідження процесу волочіння порошкових дротів проводили на спеціальному волочильному однобарабанному стані (рис. 1) наступним чином: холоднокатану металеву стрічку 1, подавали в профілеогинальний пристрій 2, з одночасним дозуванням шихти з дозатора 4 і подальшого формування стрічки в каліброваних роликах 5 у вихідну трубчасту заготовку 6 діаметром  $D_0$ . Потім у волокотримач 8 надходить заготовка порошкового дроту, що являє собою згорнуту металеву стрічку в трубку, порожнина якої заповнена сумішшю порошкоподібних матеріалів, певного складу. Надалі здійснювали перетяжку дроту до необхідного діаметра  $D_1$ . Перед кожною перетяжкою проводили вимірювання вихідних діаметрів порошкового дроту 9. Після закінчення експерименту заміряли абсолютне подовження порошкового дроту та абсолютне утончення оболонки. Зусилля волочіння порошкового дроту при кожному переході знімали за допомогою тензодатчиків зібраних за мостовою схемою на волочильній плиті, показання реєстрували за допомогою тензостанції підключеної через АЦП до волочильного стану [11].

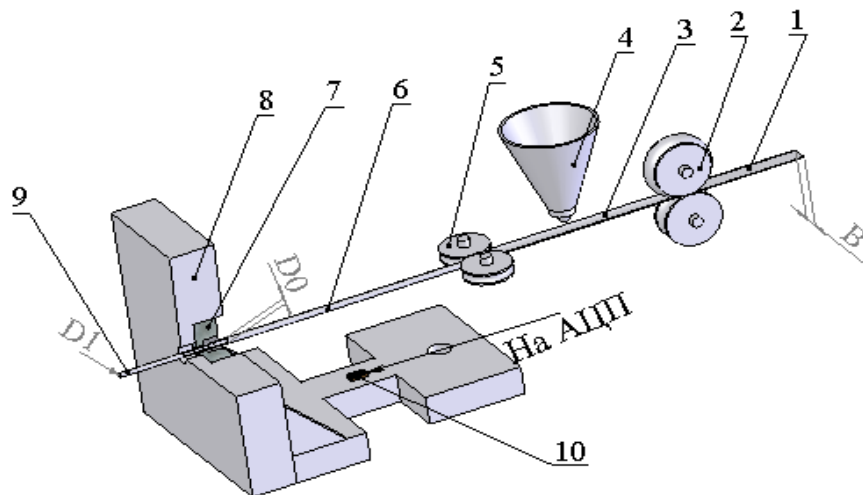


Рисунок 1 - Експериментальна установка: 1 – металева стрічка; 2 - профілеогинальний пристрій; 3 – сформований жолоб; 4 – автоматичний дозатор; 5 - калібруючі ролики; 6 – заготівля порошкового дроту; 7 – фільтр; 8 – волокотримач; 9 – порошковий дріт; 10 – система тензодатчиків для волочіння порошкового дроту

З метою якісного виготовлення порошкових дротів через першу фільтру волочіння здійснювали при витяжці  $\mu = 1,2-1,3$ . При такому коефіцієнті витяжки покращується умова змащення дроту в першій волоці, і запобігається надмірна напруга волочіння, що визначається для першої протяжки сумою сил опору протягування стрічки через холості формувальні ролики і деформації дроту в першій волоці. При витяжках можливий розрив оболонки. Важливою умовою нормального процесу волочіння порошкового дроту через першу фільтру, що забезпечує заданий її склад, є виконання наступного співвідношення:

$$\frac{S_0}{S_\phi} < 1 \quad (1)$$

де:  $S_0$  - площа поперечного перерізу порошкового дроту,  $\text{мм}^2$ ;  $S_\phi$  - площа поперечного перерізу фільтри конічної форми з кутом робочого конуса  $2\alpha = 12 - 18^\circ$ .

Співвідношення (1) є технологічним показником волочіння порошкового дроту, що дозволяє оцінити можливість виготовлення дроту заданого складу. Якщо це співвідношення більше 1, станеться кільцевий розрив оболонки. У цьому випадку слід збільшити діаметр першої фільтри.

У другому та третьому переході, де осердя ще недостатньо ущільнене, призначали максимальну деформацію, що перевищує величину разового середнього обтиснення. Величина разового обтиснення для дроту з оболонкою з міді М1 і м'яким осердям досягала 30 - 35%. У наступних переходах деформації поступово зменшували. При волочінні мідного дроту до діаметра 3,5мм зусилля протяжки практично не змінюються і тільки з ущільненням осердя зростає сила тертя на межі «осердя - внутрішня поверхня оболонки», що призводить до інтенсифікації процесу витончення оболонки.

У дроті зі сталеву оболонкою темп наростання деформацій вищий. Такий характер пластичності при волочінні дроту визначається відповідними властивостями порошоків та матеріалу оболонки. Загальна кількість переходів (n) за повний цикл волочіння дротів від діаметра першої фільтри ( $D_0$ ) до заданого кінцевого діаметра ( $D_1$ ) було визначено в залежності від необхідного запасу міцності, що забезпечує цілісність оболонки при деформації.

Надалі за відомими зусиллями волочіння розраховувалися напруження деформації, що виникають в осередку, при волочінні порошкових дротів за наступною залежністю:

$$\sigma = P_\epsilon / F_n, \quad (2)$$

де:  $P_v$  - зусилля волочіння при протяжці порошкового дроту, кН;  $F_n$  - площа поперечного перерізу порошкового дроту, мм<sup>2</sup>.

Щільність порошкового наповнювача осердя дроту з оболонки з міді 0,7, для сталеві оболонки 0,8, сила натягу при волочінні СПД не перевищила 3 кН. Цей рівень натягу забезпечує цілісність оболонки при деформації. Напруги, що виникають при волочінні дроту не перевищили межу міцності матеріалу оболонки.

Зварювання здійснювалося на зварювальному автоматі А-874 на постійному струмі зворотної полярності. В якості джерела живлення застосовувався зварювальний випрямляч ВС-1000.

Для встановлення впливу режимів наплавлення на хімічний склад металу шва здійснювалося зварювання дротом ПП-БрКМц-3-1 міді зі сталлю за схемою (рис. 2, а) та наплавлення валика дротом ПП-БрЖКМц-35-3-1 на мідну пластину (рис. 2, б).

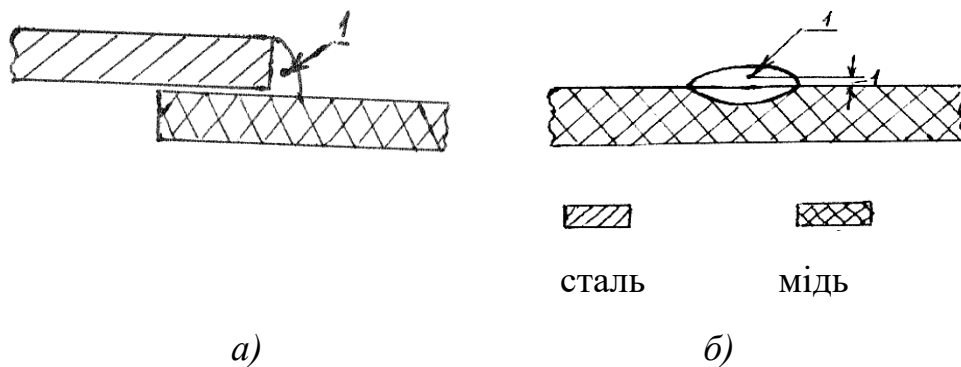


Рисунок 2 - Місця у зварних швах, у яких визначався хімічний склад

Для цього використовувалися порошкові дроти із внутрішнім захистом діаметром 2,5 мм. Зварювання виконувалася на постійному струмі зворотної полярності при різних значеннях сили зварювального струму і незмінній напрузі на дузі, що дорівнює 24 В, а також при варіюванні напруги на дузі і постійному струмі, що дорівнює 250 А при зварюванні дротом зі сталеві оболонкою і 300 А - при зварюванні дротом ПП-БрКМц-3-1. Режими зварювання: зварювальний струм становив 300-320 А, напруга на дузі 24-25 В; швидкість подачі дроту 210 м/год, діаметр дроту -2,5 мм, швидкість зварювання 19 м/год.

Зварні шви розрізалися на темплети і в поперечному їх перерізі (рис. 2) спектральним методом визначався вміст у них міді та заліза. Дані

зведені до табл. 2 і табл. 3. Швидкість зварювання залишалася постійною і дорівнювала 20 м/год.

Таблиця 2 - Вміст хімічних елементів при різних значення струму

Зварювальний струм $I_{зв}$ , А	Вміст хімічних елементів, %			
	у шві рис. 2, а		у шві рис. 2, б	
	Cu	Fe	Cu	Fe
200	58,7	36,4	52,4	42,1
225	60,2	34,8	54,4	40,3
250	61,4	33,8	57,0	37,8
275	62,6	32,6	60,3	34,6
300	61,9	30,2	63,9	32,1
325	66,4	28,6	65,9	30,2

Таблиця 3 - Вміст хімічних елементів при різних значення напруги

Напруга на дузі $U_d$ , В	Вміст хімічних елементів, %			
	у шві рис. 2, а		у шві рис. 2, б	
	Cu	Fe	Cu	Fe
24	64,9	30,2	57,0	37,8
26	63,0	32,1	57,3	37,2
28	61,2	33,9	57,9	36,5
30	59,8	35,2	58,6	36,0
32	59,3	36,8	59,1	35,4
34	57,1	38,1	59,5	34,9

Під час зварювання фіксували стабільність процесу, а після зварювання – здатність шлаку покривати зварний шов, та його відокремлення, формування швів, наявність дефектів. В результаті дослідження встановлено, що при підвищеному вмісті плавикового шпату (30 %) шлакова кірка повністю покриває поверхню наплавленого валика і порівняно легко відокремлюється від металу шва при його хорошому формуванні. Зовнішні дефекти на поверхні шва не виявлено.

Підвищення кількості цирконового концентрату до 10 % також викликає деяке погіршення криючої здатності шлаку. Однак відокремлення

шлакової кірки та формування валиків гарне. Дефектів на поверхні швів, крім кратерів, не спостерігається. У кратерах при наплавленні на сталеві пластини можливе утворення тріщин. На початку швів при наплавленні на мідні пластини мали місце пори, які надалі по всій довжині шва відсутні. Це викликано великою швидкістю охолодження та кристалізації зварювальної ванни на початку шва, внаслідок ще малого розігріву зразка.

При дуговому зварюванні міді зі сталлю, край сталеві деталі піддається впливу дуги. Глибина проплавлення сталеві кромки має бути мінімальною для обмеження вмісту заліза в металі шва, що дозволить забезпечити високі механічні властивості з'єднання та зменшити ймовірність утворення кристалізаційних тріщин. Стабілізація дуги графітом сприяла одночасному зниженню глибини провару на сталі до 1,4-1,6 мм.

## ВИСНОВКИ

1. При наявності значної кількості електродних матеріалів і технологій зварювання міді і міді зі сталлю, є актуальним розроблення СПД для механізованого зварювання розглянутих з'єднань.

2. Встановлено, що збільшення величини зварювального струму до 320 А, при зварюванні експериментальними дротами, впливає на зменшення вмісту заліза і збільшенню міді в металі шва, що пов'язано зі збільшенням теплової потужності дуги, наслідком чого є збільшення в об'ємі зварювальної ванни металу з меншою температурою плавлення.

3. При збільшенні величини напруги на дузі з 24 В до 34 В збільшується вміст заліза в зварному шві при зварюванні міді зі сталлю, що пояснюється збільшенням анодного п'ятна і відхиленням дуги в сторону сталеві деталі.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Гуревич С. М. Довідник із зварювання кольорових металів / С. М. Гуревич – Київ.: - Наукова думка, 1990. – 510 с.

2. Бабінець А.А. Проблеми та перспективи наплавлення зносостійких шарів на мідь та мідні деталі / А. А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов // Автоматичне зварювання.- 2020. - №5. - С. 16-24.

3. Коледа В. Н. Удосконалення технології зварювання під флюсом міді зі сталлю / В. Н. Коледа // Автоматичне зварювання. - 2012. - № 3. - С. 50-54. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/as\\_2012\\_3\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2012_3_10).

4. Ілюшенко В. М. Механізоване зварювання фурм кисневого дуття мартенівських печей / В. М. Ілюшенко, В. М. Кулик, Г. С. Артеменко // Автоматичне зварювання. - 1970. - № 8. - С. 72-75.

5. Електроди для зварювання бронзи / Торговий ДІМ Експловелд-Б. – Режим доступу: <https://eksploveld.uaprom.net/ua/p949171514-elektrody-dlya-svarki.html>

6. Електроди зварювальні для зварювання міді / Eweld. – Режим доступу: [https://eweld.com.ua/ua/ehlektrody-svarochnye/ehlektrody-dlya-svarki-medi-esab-ok\\_9425](https://eweld.com.ua/ua/ehlektrody-svarochnye/ehlektrody-dlya-svarki-medi-esab-ok_9425)

7. *Електроди для міді / Eweld. – Режим доступу: <https://eweld.com.ua/ua/ehlektrody-svarochnye/ehlektrody-dlya-medi/ehlektrody-dlya-medi-b%C3%B6hler-utp-320-32-50>*

8. *Електроди для зварювання міді Комсомолец-100 / Prom. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p546309406-elektrody-dlya-svarki.html>*

9. *Шехтер С. Я. Зварювання міді зі сталлю при виготовленні фурм доменних печей / С.Я. Шехтер, А.М. Резницький, В.В. Пянков // Автоматичне зварювання. - 1973. - №11. - С. 55-57.*

10. *Коледа В. М. Удосконалення технології зварювання під флюсом міді со сталлю / В. М. Коледа // Автоматичне зварювання. - 2012. - №3. - С. 50-54.*

9. *Шлепаков В.Н. Порошкові дроти з металевим осердям для зварювання в середовищі захисних газів / В.Н. Шлепаков., А.В. Біленец // Автоматичне зварювання. - 2003. - №3. - С. 53 - 54.*

10. *Рак П.І. Порошкові дроти нового покоління для зварювання в середовищі захисних газів / П.І. Рак, П.А. Косенко // Зб. доповідей 2 Між. конф. зварювальних матеріалів країн СНД. // Дугове зварювання. Матеріали та якість на рубежі 21 в. - 2001. – С. 57 - 59.*

11. *Гринь О. Г. Дослідження процесу волочіння порошкових дротів / О. Г. Гринь, О. В. Свиридов, І.О. Бойко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2011. – № 1 (22). – С. 62–66.*

12. *Чигарьов В.В. Визначення чинника, що сприяє утворенню тріщин в процесі зварювання фурм доменної печі / В.В. Чигарьов, П.А. Гавриш, І.В. Серов // Вісник ВПІ. - 2005.- №5. - С. 95-96.*

13. *Гавриш П.А. Чинники, які впливають на утворення дефектів зварювання міді зі сталлю / П.А. Гавриш // Вісник ДДМА. – 2018. - №2 (44) - С. 30-34.*

**Камінський Д., Кіяновський М.В., Цивінда Н.І., Кіяновська Н.М.**  
(Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна)

## **ПОЄДНАННЯ МОТИВАЦІЙНИХ ЗАСАД ЗДОБУВАЧА ОСВІТИ З ПОТЕНЦІАЛОМ ОСВІТНЬОЇ СИСТЕМИ**

**Анотація:** Головною метою проведеного дослідження є знаходження шляхів активізації ролі здобувача освіти на всіх етапах освітнього процесу для гарантії сучасного освітнього результату та створення методичних засад алгоритму вибору індивідуальних траєкторій навчання (ІТН) за умови мінімальних власних знань та досвіду здобувачів вищої освіти.

**Ключові слова:** індивідуальна траєкторія навчання (ІТН); здобувач освіти; мотивація; освітній процес; професійна компетентність; машинобудування; освітній результат; алгоритм вибору; фахове середовище; адаптація до інновацій.

**Abstract:** The primary objective of the conducted research is to identify ways of enhancing the role of the learner at all stages of the educational process in order to ensure modern educational outcomes and to develop methodological foundations for an algorithm to select individual learning trajectories (ILT) under conditions of minimal prior knowledge and experience of higher education learners.

**Keywords:** individual learning trajectory (ILT); learner; motivation; educational process; professional competence; mechanical engineering; educational outcome; selection algorithm; professional environment; innovation adaptation.

**Методи дослідження.** Для вирішення цього завдання використано методи: дослідження умов задоволення соціального та когнітивного попиту в сучасній освіті; дослідження наявних закономірностей змін сучасного машинобудування у відповідності до задач інноваційного розвитку держави та світових трендів; розвитку організаційних, змістовних, структурних засад машинобудування в умовах використання прогресивних інформаційних технологій, автоматизованих засобів інжинірингу, ресурсів новітніх інформаційних середовищ.

**Наукова новизна.** Встановлені ефективні форми використання нормативних та новітніх засобів для створення та розвитку фахових середовищ з різним складом професійних компетенцій, які змінюють логіку та алгоритм прийняття рішення щодо вибору ІТН.

**Практична значимість.** Мета дослідження досягається шляхом динамічного впливу здобувача освіти до рівня і змісту вищої освіти з врахуванням особливостей новітніх форм фахових середовищ сучасного машинобудування для працевлаштування і прискореної адаптації фахівців спеціальності «Прикладна механіка».

**Результати.** Розроблено алгоритм досягнення найкращого освітнього результату з позицій здобувача освіти. Виконана класифікація видів і структури фахових середовищ сучасного машинобудування. Встановлено склад професійних компетенцій, що забезпечують підготовку фахівців для кожної структурної частини фахового середовища. Запропонована логіка та алгоритм прийняття рішення щодо вибору ІТН, які полягають у поєднання регламентних вимог до рівня і змісту освіти з закономірностями зміни об'єкту навчання.

*Проблема та її зв'язок з науковими та практичними роботами.*

Спеціальність «Прикладна механіка» –єдиний засіб збільшення рівня техносфери, як фундаменту економічного розвитку світу, держави, тощо. Успіх інших спеціальностей є похідним від стану техносфери та економічного розвитку. Спеціальність «Прикладна механіка» інтегрує фахові напрямки, які є найбільш актуальними для сучасного машинобудування у форматах сучасних технологій і програмних задачах вищої освіти, послідовно забезпечуючи отримання потрібних компетенцій. Нормативні компоненти мають певні недоліки, тому що вони є статичними документом, який не відображає динаміку змін вимог у сучасному машинобудуванні, не враховують вимоги Закону про інноваційний розвиток України, що є суттєвим для здобувача.

Ресурси у підвищенні якості підготовки фахівця, як ключового елемента машинобудування, полягають у розробці алгоритмів дій і форм активізації позиції здобувача освіти для досягнення освітнього результату з потенціалом рішення інноваційних задач.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.*

Сучасні публікації, щодо рівня і змісту освітньої задачі для здобувача вищої освіти фіксують зміни їх повноважень, як активного суб'єкта освітнього процесу, особливо підкреслюючи право визначати ІТН для створення умов успішної професійної перспективи. В розроблених нормативних документах, що забезпечують ці повноваження, не враховано, що вибір ІТН повинен відповідати закономірностям розвитку машинобудування, що вимагає осмислення нової логіки і алгоритмів прийняття рішень.

Право здобувача вищої освіти, щодо ІТН, визначення змісту, об'єкту, професійних компетенцій та результатів навчання не є довільним, а реалізується при умові, що будь-яка вибрана освітня траєкторія узгоджується при виконанні обов'язкової освітньої норми виконання вимог стандартів, відповідності визначень національної рамки кваліфікацій.

Ці нормативні вимоги можуть дати належний результат лише при їх поєднанні зі встановленими закономірностями змін сучасного машинобудування.

*Формулювання невирішених частин загальної проблеми.*

Для підготовки фахівців з потенціалом рішення інноваційних задач, потрібно встановити і використати закономірності активного творчого впливу здобувача на зміст і інструменти освітнього процесу на всіх його етапах та інформаційне забезпечення можливості вибору ІТН.

Здобувач вищої освіти повинен мати певний, логічно обґрунтований алгоритм прийняття рішення на етапі мінімального власного досвіду;

*Цілі статті та постановка задачі.* Вирішення задач отримання якісних результатів для всіх суб'єктів освітнього процесу може досягатись шляхом поєднання мотивації здобувачів освіти на всіх етапах: вибір спеціальності, етап отримання загальнотеоретичної та практичної підготовки, надання інструментів вибору ІТН на підставі наявних закономірностей змін сучасного машинобудування.

*Виклад основного матеріалу дослідження.*



Дослідження поведінки здобувачів освіти, що свідомо прагнуть до сучасних освітніх результатів, дозволяє розділити тактику дій на декілька етапів.

*Перший етап. Вибір спеціальності.*

*1.1 З позиції здобувача знань.* Здобувач вищої освіти реалізує своє право опираючись на наявні інформаційні та нормативні джерела для свідомого прийняття рішення щодо вибору спеціальності, де має значення:

- ✓ стан особистості (готовності до свідомого вибору спеціальності, розуміння значення вищої технічної освіти) і дослідження впливу факторів на рішення щодо вибору спеціальності;

- ✓ знання Закону про вищу освіту, змісту спеціальності, стандарту освіти, Класифікатора професій;

- ✓ власного досвіду, порад фахівців, систематизації досвіду та вимог роботодавців зі сфери машинобудування до змісту, якості, переліку професійних компетенцій до фахівців спеціальності «Прикладна механіка»;

- ✓ відомостей переліку професійних середовищ, де реалізується потенціал фахівця;

- ✓ стану та прогнозу ринку праці (державного та міжнародного);

- ✓ уявлення масштабу власної особистості (у професійному вимірі);

- ✓ аналітичний огляд ринку праці у секторі машинобудування;

- ✓ наявних трендів сучасного машинобудування;

- ✓ впливу координації та співпраці між транснаціональними корпораціями (ТНК) та країнами, в яких здійснюється їхня діяльність, на пріоритетність ринку товарів та послуг у сфері машинобудування;

*1.2. Дослідження інформації надавача освітніх послуг:*

- ✓ освітніх пропозицій від надавача освітніх послуг (бюджет, гранти, рейтинг ЗВО – регіональний, державний, міжнародний);

- ✓ прозорість схеми відносин ЗВО і здобувача освітніх послуг;

- ✓ якості освітнього середовища (де буде жити і формуватись фахівець з врахуванням гуманітарних, соціальних та професійних цінностей освітнього середовища);

- ✓ технологій та засобів досягнення освітньої мети (види освіти відповідно Закону про вищу освіту : формальна, неформальна, дуальна освіта, форми освітнього процесу: онлайн, офлайн, змішана);

- ✓ • гарантій можливостей правового забезпечення запиту здобувача освіти (відповідно Закону про вищу освіту, стандарту освіти) через процедуру акредитації та ліцензування ОПП;

- ✓ свідоцтва адаптації ЗВО до динамічних змін у техносфері, суспільстві, інноваційних програмах .

*Другий етап. Етап отримання загальнотеоретичної та практичної підготовки).*

На цьому етапі право здобувача освіти на отримання потрібного освітнього результату реалізується через механізми вибору компонентів освіти, активного впливу на перелік компонентів освіти у складі ОПП, посилення власного досвіду через вибір тематики та участі в НДРС, наукових конференціях, участі в обговореннях наукових результатів,

власної аналітики з питань розуміння закономірності динаміки зміни меж освітнього поля. Студентоцентрирована тактика і технології вищої школи дають можливість контролювати якість освіти, готувати пропозиції щодо корекції змісту освіти.

*Третій етап. Завершальний етап фахової підготовки.*

На цьому етапі ефективність сучасних технологій освіти, а саме прийняття рішення щодо вибору ІТН полягають у розумінні закономірностей зміни об'єкту навчання, а особливо закономірностей зміни та розвитку фахових середовищ спеціальності «Прикладна механіка». Сучасні форми фахових середовищ умовно можна поділити на декілька груп, які змінюють логіку та алгоритм прийняття рішення щодо вибору індивідуальної траєкторії навчання з врахуванням мотиваційних засад здобувача освіти, а саме:

- ✓ виробнича сфера машинобудування та ремонтного відновлення машин;
- ✓ заклади інжинірингової діяльності офісного або онлайн типу;
- ✓ сфера технічного сервісу (в т.ч. її інноваційне реформування) по забезпеченню експлуатаційної надійності і відновлення працездатності технічних систем;
- ✓ наукове обслуговування інноваційного розвитку машинобудування.

Успішна діяльність фахівців спеціальності «Прикладна механіка» в названих сферах, які відповідають новітнім трендам розвитку сучасного машинобудування досягається при спрямування освітніх зусиль на отримання відповідних компетенцій в кожній сфері, як то:

1. Виробнича сфера машинобудування та ремонтного відновлення машин, яка потребує наступних фахівців:

✓ *Інженерів-конструкторів* підготовлених на базі найбільш досконалих світових CAD, CAE, PLM інструментів, інтеграції модулів комп'ютерних технологій в єдиному інформаційному просторі підприємства. Проведенням на етапі навчання сертифікації та отримання індивідуальних ліцензій користувача програмного забезпечення автоматизації інженерних задач, які за рівнем оснащення відповідає кращим світовим зразкам;

✓ Інженерів-технологів на базі найбільш досконалих світових CAM, CALS, PLM інструментів;

✓ *Інженерів-технологів-програмістів* на базі найбільш досконалих світових систем моделювання та програмування процесів механічної обробки до систем ЧПК та верстатів для отримання студентом кінцевого матеріального продукту всіх етапів проекту – деталі;

✓ *Інженерів-інструментального підготовки виробництва* на базі угод з провідними світовими виробниками і постачальниками інструментальних систем;

✓ *Інженерів підготовки заготівельного виробництва* на базі найбільш досконалих світових програмних продуктів моделювання процесів заготівельного виробництва та 3-D друку для отримання студентом кінцевого матеріального продукту всіх етапів проекту – заготовки;

✓ *Інженерів промислового дизайну* на базі найбільш досконалих світових ArtCAM технологій з можливістю отримання студентом кінцевого матеріального продукту всіх етапів проекту –3D просторових промислових зразків, товарних знаків тощо;

✓ *Інженерів-механіків* для виконання обов'язків по організації і виконання ТОiP виробничих систем з використанням програм управління виробничими запасами систем ТОiP та виробничих процесів ремонтного відновлення, реінжинірингу об'єктів експлуатації, посиленням вивчення ремонтних технологій;

✓ *Інженерів організаторів (керівників)* виробничих процесів та діяльності машинобудівних та ремонтно-відновлювальних підприємств з використанням програмних засобів моделювання виробничих процесів;

✓ *Інженерів* з реєстрації та правового забезпечення авторського права, патентних досліджень, патентної чистоти продукції виробництва, патентної чистоти ділових комунікацій, прав та комерційного використання об'єктів інтелектуальної власності;

✓ *Експерт інноваційного розвитку* світового, державного, регіонального машинобудування для обґрунтування трендів розвитку власного виробництва, рішень по організації, переобладнанню виробничих систем, вибору виробничих програм, визначення змісту і партнерів для ділових комунікацій;

✓ *Менеджер кадрового забезпечення виробництва* на умовах функціонального аутстафінгу або аутсорсингу.

2.Заклади інжинірингової діяльності офісного або онлайн типу (довільної форми власності), в т.ч. з варіантами дистанційної, інформаційно-комунікативної співпраці з замовником на підставі власних, або отриманих на кафедрі технології машинобудування Криворізького національного університету, ліцензій і сертифікатів на право використання прикладного програмного забезпечення провідних розробників для рішення наступних задач:

✓ проектна діяльність, в т.ч. інформаційні технології, інформаційне забезпечення через хмарні сервіси;

✓ оптимізація виробничих процесів на основі наукових досліджень;

✓ консалтинг та експертна діяльність;

✓ аналіз інноваційних технологій, розробка технічних регламентів;

✓ оцінка науково-технічного потенціалу підприємств, стартапи та підприємницька діяльність;

✓ створення інноваційних підприємств у сфері машинобудування;

✓ впровадження передових технологій у виробництво;

✓ програми та бізнес-проекти інженерної (технічної та конструкторсько-технологічного підготовки виробництва);

✓ обґрунтування параметрів інструментального забезпечення виробництва;

✓ вибір, випробування, обґрунтування, впровадження (підготовка користувачів) систем (параметри, комплектність) автоматизованого

проектування, моделювання, програмування, інжинірингу об'єктів і процесів відповідно до задач підприємства замовника, комунікації з ліцензіатами, технічна підтримка програмних продуктів;

✓ інтеграція модулів комп'ютерних технологій в єдиному інформаційному просторі підприємства.

3. В сфері технічного сервісу (в т.ч. її інноваційне реформування) по забезпеченню експлуатаційної надійності і відновлення працездатності технічних систем ІТН повинні бути орієнтовані на отримання надзвичайно актуальних компетенцій, а саме:

✓ формування активів ремонтного сервісу (стаціонарні, мобільні, довільної форми власності). Створення і поєднання ЕКБ (електрона конструкторська база) конструкторських документів з ЕКБ ремонтної документації та правила їх використання у процесах КТПВ виробничих процесів ремонтного відновлення;

✓ прискорена підготовка ЕКБ ремонтної документації при відсутності КД об'єктів ремонтного відновлення з використанням технологій та засобів (3-D сканери, трекери) для прототипування поверхонь, просторових форм обладнання. Вибір та підготовка програмного забезпечення для автоматизації всіх етапів інжинірингу виробничих процесів ремонтного відновлення, Забезпечення інтеграції модулів комп'ютерних технологій в єдиному інформаційному просторі підприємства;

✓ систематизація ремонтних технологій, технологій реінжинірингу поверхонь з орієнтацією на специфіку конструктивних форм, розмірно-габаритних параметрів, конструктивних матеріалів об'єктів ремонтного відновлення, Зворотній інжиніринг як засіб автоматизації проектування та контролю складнопрофільних виробів;

✓ впровадження тактики прискореної КТПВ виробничих процесів ремонтного відновлення на основі використання логістичного ланцюжка від дерева моделювання проєктної 3-D моделі будови об'єктів гірничо-металургійного обладнання (проєктний етап) до (на етапі експлуатації), автоматичному генезису ремонтних супроводів об'єктів гірничо-металургійного обладнання як об'єктів ремонтного відновлення ( на підставі дерева будови наявно проєктної 3-D моделі);

✓ автоматизація життєвого циклу виробу за рахунок впровадження PLM/PDM-систем та моделювання (у т.ч. автоматичне) виробничих процесів ремонтного відновлення на принципах PLM технологій;

✓ поєднання задач дослідження експлуатаційних властивостей (надійності) об'єктів гірничо-металургійного обладнання з коригуванням технологій їх ремонтного відновлення .

4. При науковому обслуговуванні інноваційного розвитку машинобудування велике значення мають фахівці для науково-дослідних центрів, установ, лабораторій, що існують і створюються рішення найбільш актуальних задач машинобудування, як на державному так і на приватному рівнях.

Модель професійної траєкторії науковця в машинобудуванні передбачає роботу в науковій або науково-проектній установі машинобудівного спрямування зі здійсненням кількох ключових етапів:

- ✓ навчання в аспірантурі або докторантурі наукової установи машинобудівного спрямування з наступним розвитком кар'єри, призначення на керівні посади. Участь у науково-дослідних проєктах, державних грантах;

- ✓ проведення фундаментальних або прикладних наукових досліджень;
- ✓ розробка нових матеріалів, технологій, машин та механізмів;
- ✓ координація науково-дослідних робіт, взаємодія з виробничими підприємствами;

- ✓ комерціалізація наукових розробок;

- ✓ патентування, передача технологій у виробництво;

- ✓ співпраця з підприємствами машинобудівної галузі.

Закон України "Про науково-технічну діяльність" забезпечує правовий статус науковця, гарантує соціальний захист, створює умови для наукового зростання та міжнародної співпраці. ІТН для підготовки фахівців цієї сфери повинні передбачати отримання компетенцій працівника наукової установи (Стаття 5, Стаття 31. Посади наукових працівників Закону України про науково-технічну діяльність).

*Висновки та напрямки подальших досліджень:*

Наведена інформація про класифікацію і закономірності розвитку фахових середовищ створює інформаційні засади здобувачу освіти для використання сучасних технологій і інструментів освіти.

Для подальших досліджень потрібно врахувати фактор впливу позицій роботодавців на зміст і технології освіти. Світовий досвід показує, що у багатьох провідних державах збільшують роль спілки (Асоціації) роботодавців, які отримують у національних законодавствах (у США навіть в окремих штатах) повноваження визначення змісту освітньо-професійних програм, з правом проведення процедур акредитації і надання ліцензій на освітню діяльність закладам вищої освіти. Так досягається законодавче поєднання розуміння ЗВО закономірностей динамічних змін у машинобудуванні з ринковими вимогами до рекрутингу, що відображено у позиції стейкхолдера (машинобудівного профіля) до прогнозованого кадрового забезпечення фахових середовищ у машинобудуванні.

**Карявкіна Н.С.,** (ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНФЕСТПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна), **Цимбал Б.М.,** (Національний університет цивільного захисту України м. Черкаси, Україна)

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРОМИСЛОВИМИ РОБОТАМИ ТА МАНІПУЛЯТОРАМИ

**Анотація:** У статті розглядається автоматизація та роботизація ливарного виробництва як ключові чинники підвищення ефективності, продуктивності та безпеки виробничих процесів. Проаналізовано сучасні технології промислових роботів і маніпуляторів, їх вплив на якість лиття та економічні показники підприємств. Особливу увагу приділено інтеграції цифрових технологій, таких як моделювання та 3D-друк, що сприяють оптимізації виробничих процесів.

**Ключові слова:** автоматизація, роботизація, ливарне виробництво, промислові роботи, маніпулятори, ефективність виробництва, продуктивність, безпека праці

**Abstract:** The article examines the automation and robotization of foundry production as key factors in improving the efficiency, productivity, and safety of manufacturing processes. Modern technologies of industrial robots and manipulators, as well as their impact on casting quality and the economic performance of enterprises, are analyzed. Special attention is given to the integration of digital technologies, such as modeling and 3D printing, which contribute to the optimization of production processes.

**Keywords:** automation, robotization, foundry production, industrial robots, manipulators, production efficiency, productivity, occupational safety

Ливарне виробництво є одним із прикладів ефективного використання ресурсів, адже виливки майже повністю придатні для повторної переробки. Після завершення свого «життєвого» циклу вони підлягають переплавленню для створення нових виробів, щороку використовуючи мільйони тонн металобрухту. Окрім цього, сучасні технології дають змогу відновлювати до 95% піщаної суміші для виготовлення різних ливарних форм, що позитивно впливає на екологію [5]. Тому ливарне виробництво відіграє важливу роль у сфері переробки. Багато ливарних підприємств інвестують у новітні технології, автоматизацію та енергоефективність, постійно зменшуючи споживання ресурсів. Ключову роль у цьому процесі відіграє цифровізація під час проектування, моделювання та 3D-друку, що дає змогу не лише створювати складні виливки, а й усунути метод проб і помилок, підвищуючи конкурентоспроможність ливарних підприємств і сприяючи впровадженню сталих стратегій [11]. Одним із важливих напрямів автоматизації та покращення енергоефективності є впровадження роботизації [19].

Ливарна промисловість зазнає значних трансформацій завдяки появі автоматизації та роботизації. Ця революція не лише підвищує ефективність

та продуктивність, але й покращує безпеку та якість у секторі. Інтеграція автоматизації та робототехніки в ливарні процеси кардинально змінює ситуацію.

Традиційно ливарні процеси були є трудомісткими, включають високий рівень ручної роботи. Робітники повинні виконувати такі роботи, як формування та лиття, часто в суворих і небезпечних умовах. Однак запровадження автоматизації та роботизації змінює цей процес. Роботи беруть на себе завдання, які колись виконували люди, зменшуючи ризик нещасних випадків та травм, а також забезпечуючи безпечніше робоче середовище. Автоматизація в ливарній промисловості – це не лише заміна ручної праці, але й підвищення точності та узгодженості виробничого процесу. Роботи запрограмовані на виконання завдань із високим ступенем точності, зменшують помилки та відходи. Ця точність призводить до покращення якості продукту, що, у свою чергу, підвищує задоволеність клієнтів та покращує ефективність бізнесу. Однак перехід до автоматизації та роботизації має свої труднощі. Є занепокоєння щодо переміщення робочих місць, оскільки роботи беруть на себе завдання, які раніше виконували люди.

Запровадження автоматизації та роботизації в ливарній промисловості є чітким свідченням прихильності галузі до інновацій та прогресу. Це є свідченням стійкості та адаптивності галузі перед обличчям мінливої ринкової динаміки та технологічного прогресу [9].

Метою дослідження є дослідження модернізації ливарного виробництва шляхом інтеграції промислових роботів і маніпуляторів для підвищення ефективності, продуктивності та безпеки виробничих процесів.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні завдання:

1. Дослідити передумови автоматизації ливарного виробництва.
2. Проаналізувати сучасні технології роботизації в ливарних процесах.
3. Визначити основні переваги та виклики автоматизації ливарних виробництв.

Об'єктом дослідження є процеси ливарного виробництва та їх модернізація за допомогою промислових роботів і маніпуляторів.

Предмет дослідження є методи та засоби автоматизації та роботизації технологічних процесів у ливарному виробництві.

Ливарні виробництва, історично трудомісткі та небезпечні, розвивалися паралельно з технологічним прогресом. У перші дні робітники вручну обробляли високотемпературний розплавлений метал і виконували фізично важкі завдання. Це призвело до значної загрози безпеці та потенційної невідповідності якості лиття. Однак у міру розвитку промислової революції почали формуватися механізація та автоматизація.

Технологічні досягнення в автоматизації ливарного виробництва відбуваються з 1950-х років [7]. Ці ранні автоматизовані системи здебільшого передбачали механізоване оброблення, переміщення матеріалу

та операції формування, що зменшувало потребу в ручній праці та пом'якшувало деякі ризики безпеки. Останніми роками «Промисловість 4.0», яка головним чином характеризується інтеграцією кіберфізичних систем, інтернету речей та штучного інтелекту, привела до нової ери автоматизації ливарних виробництв. Сучасні системи розроблені для автономного виконання повторюваних завдань, таких як заливка, різання та подрібнення, з мінімальним втручанням людини [7].

Серед різних типів роботів найбільший попит мають автоматизовані промислові роботи. Роботизовані системи найближчого майбутнього дозволять замінити людину на більшості основних і допоміжних виробничих операцій, сприяючи автоматизації технологічних процесів у різних промислових галузях. Особливо це актуально для ливарно-металургійної промисловості, де існують небезпечні та шкідливі умови праці, зокрема в гарячих цехах [20].

Серед різновидів роботів найбільш затребуваними є маніпуляційні автоматизовані промислові системи. Маніпулятор компанії АВВ розташований поруч із роторним барабаном і здійснює нанесення сухого компонента на модельні кластери, обертаючи модельні куці всередині барабана. Ліворуч від нього розташовані два конвеєри-сушила (верхній та нижній), куди робот підвішує куці для подальшого сушіння [15].

Технологія лиття за газифікованими моделями (ЛГМ) із застосуванням роботизованих систем [21] включає використання термічної печі з обертовим подом виробництва CAN-ENG Furnaces International Limited (США). Робот завантажує піч виливками в три ряди, що оптимізує термообробку алюмінієвих виробів при температурі 500-550 °С [18].

Залежно від методу лиття ливарні роботи класифікуються на чотири основні категорії: лиття в піщані форми, лиття під тиском, гравітаційне лиття та ЛГМ-процес. За галузевим застосуванням роботизовані системи можна поділити на п'ять основних сегментів: автомобільна промисловість, металургія, виробництво напівпровідників, телекомунікації, аерокосмічна та оборонна промисловість [12].

Існує роботизована системи перенесення пластин, яка відноситься до інноваційного обладнання для ливарного виробництва. Ця система містить роботизовану руку з 4 DOF для передачі пластин між касетою та камерами обробки. Вона має інтелектуальну автоматизацію для виготовлення пластин, у якій потрібно обробляти кілька пластин та камер одночасно. Враховується стан кожної пластини та камери для планування завершення виготовлення ефективним та гнучким способом. Роботизована система витрачає 9 хвилин на виконання поставленої місії переміщення 6 пластин між кількома камерами та 2 касетами та досягає 93,4% рівня виявлення дефектів [16].

Серед різних типів роботів найбільшим попитом користуються автоматизовані маніпуляційні системи, особливо промислові роботи, які нині є практично єдиним засобом автоматизації дрібносерійного



виробництва. Вони поєднують у єдиному циклі транспортні та основні технологічні операції, що сприяє створенню ефективних виробничих процесів на основі роботизованих систем [22].

Сучасні ливарні підприємства постійно шукають способи підвищення ефективності, гнучкості та безпеки робочого середовища, орієнтуючись на створення енергоефективних процесів із мінімальним впливом на довкілля. Використання роботизованих систем суттєво спрощує досягнення необхідної продуктивності у галузі та підтримує конкурентні переваги [4].

Збільшення корисного навантаження на роботизовані системи для ливарних операцій сприяє оптимізації виробничих циклів порівняно з традиційними методами лиття, що є основним фактором зростання ринку ливарної роботизації. Крім того, очікується, що автоматизація операцій, пов'язаних із високими температурами, газовиділенням та іншими шкідливими чинниками (наприклад, дегазація розплаву, видалення шлаку, заливка розплаву у форми, вибивка виливків), значно підвищить потребу в роботизованих системах у ливарних цехах у найближчі роки [23].

Значне зростання витрат на впровадження роботизованих систем у металургійному виробництві таких країн, як Китай, Японія та Індія, стимулює подальший розвиток ринку. Серед основних переваг використання роботів можна відзначити збільшення терміну їхньої експлуатації та високу якість виконуваних операцій. Крім того, інтеграція роботизованих технологій сприяє створенню екологічно безпечних ливарних процесів.

Розглянемо приклади новітніх технічних рішень, що демонструють взаємодію людей і коботів, як це реалізовано у випадку роботизованих систем Кука та АВВ [10]. У ливарному виробництві подібне впровадження найбільш доцільне для операцій точного, великосерійного та масового лиття.

Лиття в пісок застосовують для виготовлення таких елементів, як опори двигуна та корпуси диференціалів. Потім ці компоненти розрізають та подрібнюють за допомогою промислового робота типу IRB 6660 АВВ у виробничій камері виробництва Automations Robotic GmbH. У цьому процесі робітник затискає сировину деталі в позиціонері заготовки, який транспортує деталі в комірку робота для обробки. Після роботизованої обробки частина передається в наступну робочу станцію. IRB 6660 є найбільш жорстким з них є шарнірні роботи АВВ. Обробка алюмінієвих деталей включає високі робочі сили та утворює багато бруду та стружки». Датчик, розташований між зап'ястям робота та електроінструменту, є частиною пакета функцій Integrated Force Control, що забезпечує адаптивний рух у реальному часі. Force Control дозволяє роботу реагувати на навколишнє середовище та змінити запрограмований шлях або попередні налаштування швидкості на основі зворотного зв'язку з датчиком сили [1].

Зменшивши швидкість робота при високих силах, контролюючи сили зменшують ризик пошкодження або неправильно оброблені деталі та

дбайливо ставиться до інструментів. Це продовжує термін їх служби. Технологія контролю не тільки позитивно впливає на довговічність інструментів, а й життєвий цикл шпинделя та точність осей робота. Крім того, за допомогою цієї технології зменшується час циклу на 20 відсотків [1, 2].

Працівники, які займаються литтям у пісок, стикаються з суворими умовами, а безпека їх роботи є низькою. Існуючі заливні роботи мають недостатню стабільність та несучу здатність і не можуть виконувати інтелектуальну заливку відповідно до вимог процесу заливки. Існує гібридний розливний робот, який вирішує ці обмежень, а технологія апаратного керування на основі бачення (NIL) вирішує проблеми з керуванням в режимі реального часу моделюванням розливу та процесу розливу. На основі розливного механізму та потреби в русі ковша існує гібридний розливний робот із паралельним механізмом 2UPR-2RPU як основним корпусом [8].

Ливарні підприємства постійно шукають нові способи підвищення продуктивності, скорочення витрат підвищення якості. Високоєфективні технології роботів АББ дозволяють зменшити виробничі витрати та відсотки браку, збільшений час безвідмовної роботи та стабільна найвища якість є перевагою роботів АББ [3].

Промисловий роботизований процес виробництва литва передбачає формування, додаткову обробку та холодну обробку. За допомогою роботів спочатку на стадії формування здійснюється інтелектуальна обробка піщаного сердечника. Потім на етапі післяобробки реалізується інтелектуальне чорнове лиття. Етап холодної обробки реалізує інтелектуальне видалення задирок, зняття фаски, очищення та видування роботами. Багатий досвід успішне застосування свідчать про багатообіцяюче майбутнє для ливарної промисловості з повним поєднанням робототехніки, автоматизації та інформаційних технологій [17].

Існує робот, який допомагає виготовляти швидкі прототипи форм та зразків. Шестиосьовий робот KUKA RMC90 допомагає прискорити виробництво лиття з більш економічними та точними результатами. Роботизована фабрика для візерунків KUKA включає системи обробки цвілі та збору пилу, які сприяють безпечній та екологічній обробці. Ще одна економія часу за допомогою робота пов'язана з фрезеруванням блоків у формі піску. Робот може створювати більшість геометрій прес-форми, які зазвичай включають кілька сердечників або структурних деталей, і тому роботизовані піщані форми можуть виготовляти більш точні за розмірами виливки. Оскільки не потрібно витягувати візерунок з піщаної форми, нам не потрібно розглядати можливість додавання чернетки до деталі. Робот може рухатися по шести осях, тому такі елементи, як кишені та підрізи, які зазвичай вимагають серцевин, можна вирізати безпосередньо в піску. Результатом є точне за розмірами лиття за менший час [14].

Серія ливарних роботів KUKA була розроблена для конкретних вимог ливарного виробництва. Завдяки термостійким зап'ясткам роботів, виготовленим зі спеціальної сталі, вони функціонують при екстремальних температурах. Крім того, KUKA має додаткові компоненти для виробничої лінії: від преса для швидкого обрізки до охолоджувальної чаші та повністю розробленої концепції. Інтелектуальне ливарне виробництво можливе завдяки обміну даними через OPC UA. KUKA має хмарну програмну платформу KUKA Connect для збору цифрових даних у виробництві. Цикл робота та цикл натискання в комірці автоматично оптимізуються за часом як загальна операція. Таким чином, робот не завжди рухається з однаковою швидкістю, а діє відповідно до виробничого процесу. Це призводить до скорочення часу очікування, а також знос машини зменшується завдяки більш рівномірному потоку. Крім того, на заводі майбутнього параметри робота та преса обробляються одним контролером, що дозволяє здійснювати повний огляд даних системи [3].

Вибір роботів TIE Industrial для ливарного виробництва включає моделі, відомі своєю довговічністю та продуктивністю: Fanuc M- 2000 iA відомий своєю винятковою вантажопідйомністю та радіусом дії, що робить його ідеальним для роботи з великими виливками та виконання складних завдань; ABB IRB 7600 забезпечує надійну конструкцію та універсальну продуктивність, підходить для різноманітних ливарних застосувань, від лиття до обробки [6].

#### Висновки

Проведено аналіз передумов автоматизації ливарного виробництва та вивчено сучасні тенденції впровадження промислових роботів і маніпуляторів. Дослідження показало, що автоматизація ливарних процесів є необхідною умовою підвищення продуктивності, покращення якості лиття та забезпечення безпеки праці. Разом з тим, розглянуто виклики, пов'язані із впровадженням роботизованих технологій, такі як висока вартість обладнання, потреба у кваліфікованому персоналі та необхідність адаптації виробничих процесів до нових технологічних рішень.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *ABB Robotics magazine. International customer magazine from ABB Robotics. 2015. № 2. Publisher: ABB Robotics AB. URL: [https://library.e.abb.com/public/1e526ce4610d469ebefc42938574d182/ABB\\_Robotics\\_magazine\\_2.15\\_low-res.pdf](https://library.e.abb.com/public/1e526ce4610d469ebefc42938574d182/ABB_Robotics_magazine_2.15_low-res.pdf)*
2. *ABB robots improve foundry productivity and quality. Industrial robot: an international journal. 2001. Vol. 28. № 2. URL: <https://doi.org/10.1108/ir.2001.04928baf.006>*
3. *Automation in foundry and forging industry | KUKA AG. KUKA AG. URL: <https://www.kuka.com/en-de/industries/metal-industry/foundry-and-forging-industry>*
4. *Cobot und kollaborative Roboter: Wissenswertes zur MRK. Automationspraxis. URL: <https://automationspraxis.industrie.de/cobot/cobot-symbiose-von-mensch-und-roboter/>*
5. *Doroshenko V., Yanchenko O. Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots. Modern Technology, Materials and Design in Construction. 2020. Vol. 27. № 2. P. 179–186. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-179-186>*
6. *Enhancing foundry operations with robotic automation. Foundry Robots. URL: <https://www.robots.com/applications/foundry>*

7. Foundry automation: the evolution and future. OFML | Foundry Machinery. URL: <https://www.ofml.net/news-media/omega-sinto-news/foundry-automation-the-evolution-and-future>
8. Foundry, LR // International customer magazine from ABB Robotics. – 2005. – № FO10002EN\_R0. – Publisher: ABB. – Available at: <https://library.e.abb.com/public/69dabf67ec8bf933c125717800462b57/Foundry,LR.pdf>
9. How automation is transforming the foundry and forging processes with robotics. foundry-planet.com - The platform for the ENTIRE CASTING INDUSTRY. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/how-automation-is-transforming-the-foundry-and-forging-processes-with-robotics/>
10. Kaliuzhnyi P., Doroshenko V., Neima O. Casting of combined polymer patterns that are gasified. Casting processes. 2023. Vol. 152. № 2. P. 49–55. URL: <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>
11. Matthews K. 6 robotics trends taking over manufacturing. Home | American Machinist. URL: <https://www.americanmachinist.com/automation-and-robotics/media-gallery/21903020/6-robotics-trends-taking-over-manufacturing>
12. Metal casting robots market: Global industry analysis and forecast (2022-2029). Maximize market research. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-metal-casting-robots-market/109387/>
13. Optimising production time in die casting: reducing cycles and increasing productivity. foundry-planet.com - The platform for the ENTIRE CASTING INDUSTRY. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/optimising-production-time-in-die-casting-reducing-cycles-and-increasing-productivity/>
14. Robot milling speeds pattern, mold production. Home | Foundry Management & Technology. URL: <https://www.foundrymag.com/molds-cores/article/21249200/robot-milling-speeds-pattern-mold-production-process-qesc-llc>
15. Shell-O-Matic automates Franklin Bronze foundry - Shell-O-Matic. (n.d.). Shell-O-Matic. URL: <https://www.shellomatic.com/automates-franklin-bronze-foundry/>
16. Song K.-T., Ou S.-Q., Yang C.-A., Sun Y.-X., Kang L.-R., Wang Z.-Y., Wang Y.-S., Lu P.-C., Ko C.-L., Chen Y. H. Scheduling and control of a wafer transfer robot for foundry equipment innovation competition. IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52. № 15. P. 627–632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.654>
17. Yang, Y., Zheng, Y., Xu, Y., Yang, M., Boyang, B., & Liu, F. Robotic applications of foundry industry in china. V Proceedings of the 72nd world foundry congress. 21-25th May 2016. Nagoya. URL: <https://www.senkyo.co.jp/shishido/wfc2016/pdf/O-153.pdf>
18. Дорошенко В. С. Концепція роторно-конвейерного комплексу для літа по газифікованим моделям і термообробки відливок. Металл и литье Украины. 2019. № 1-2. С. 31-40. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001001769>
19. Дорошенко В. С. Метод нейтралізації газів, що виділяються з ливарної форми при литві за газифікованими моделями. 2021. № 9. С. 8-14.
20. Дорошенко В.С. Комплектація роботами конвеєрних та роторно-конвеєрних ліній ливарного виробництва. Лиття України. 2019. № 6. С. 21-23.
21. Дорошенко, В.С. Лиття по газифікованих моделям з кристалізацією металу під тиском. Ливарне виробництво. 2016. № 1. С. 25-28.
22. Калюжний П. Б., Бродовий О. В., Дорошенко В. С., Нейма О. В. 3d-генерація пористих структур для друку ливарних моделей, що газифікуються в ливарній формі. Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції). 2024. № 5. URL: <https://doi.org/10.20535/2519-450x.5.2024.319032>
23. Калюжний П.Б., Шинський О.Й., Дорошенко В.С. Удосконалення ступінчастої ливникової системи для лиття за моделями, що газифікуються. Литво. Металургія. 2024 : Матеріали XX Ювіл. Міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 30 трав. 2024 р. Харків. 2024. С. 123–126. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79750>

**Катріч С.Г., Дмитрієв Д.О.** (Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна)

## **РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ 3D ДРУКУ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

***Анотація.** У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності технологій 3D-друку шляхом автоматизації та впровадження систем керування адитивними процесами. Відзначено, що більшість виробництв залишаються в режимі відкритого циклу без онлайн-контролю якості, що стримує їх масштабування, особливо в умовах обмеженої доступності високоякісних принтерів і матеріалів в Україні. Проаналізовано сучасні рішення: сенсорний моніторинг, алгоритми зворотного зв'язку, системи керування парком принтерів, приклади автоматизації у FDM, SLA та SLS технологіях. Наведено приклади успішного безперервного друку та автоматизації SLA-принтерів. Показано, що автоматизація підвищує точність, повторюваність виробів і знижує участь оператора. Окреслено перспективи створення в Україні власних автоматизованих рішень із використанням штучного інтелекту.*

***Ключові слова:** адитивні технології; 3D-друк; автоматизоване управління; Industry 4.0; FDM; SLA; SLS; датчики; зворотний зв'язок; контроль якості.*

***Abstract.** The article examines ways to improve the efficiency of 3D printing technologies through automation and the implementation of control systems for additive processes. It is noted that most production facilities still operate in open-loop mode without online quality control, which limits their scalability, especially under the conditions of limited access to high-quality printers and materials in Ukraine. Current solutions are analyzed, including sensor monitoring, feedback algorithms, printer fleet management systems, and examples of automation in FDM, SLA, and SLS technologies. Successful cases of continuous printing and automated SLA printer operation are presented. It is shown that automation improves product accuracy and repeatability while reducing operator involvement. The prospects for developing domestic automated solutions in Ukraine using artificial intelligence are outlined.*

***Keywords:** additive manufacturing; 3D printing; automated control; Industry 4.0; FDM; SLA; SLS; sensors; feedback; quality control.*

3D-друк (адитивне виробництво) кардинально розширив можливості виготовлення виробів складної форми, проте залишається низка проблем, які обмежують його ефективність у промислових масштабах. По-перше, більшість настільних і навіть промислових 3D-принтерів працюють у відкритому циклі без автоматичного контролю процесу та якості в режимі реального часу. Відсутність датчиків зворотного зв'язку та онлайн-моніторингу означає, що дефекти (наприклад, деформації, відшарування шарів, брак матеріалу) виявляються запізно – часто лише після завершення друку, що знижує вихід придатних деталей. По-друге, продуктивність адитивних технологій традиційно поступається конвеєрним методам: друк великої партії деталей потребує багато годин і участі оператора в підготовці кожного завдання. Це стримує масове впровадження 3D-друку у виробництво серійних виробів. По-третє, процес 3D-друку включає чимало ручних операцій – від підготовки цифрових моделей і налаштування G-коду

до постобробки надрукованих деталей (очищення, видалення підтримок, шліфування тощо). Людський фактор тут може призводити до похибок і нерівномірної якості. Автоматизація на кожному з цих етапів здатна мінімізувати помилки і підвищити ефективність виготовлення продукції [2].

Проблематика автоматизації 3D-друку знаходиться на перетині кількох наукових напрямів – теорії керування, інформаційних технологій та матеріалознавства. Останні роки характеризуються зростанням кількості досліджень і публікацій, присвячених інтеграції адитивних технологій у концепцію «розумного» виробництва. Експерти відзначають, що наступний етап розвитку адитивного виробництва менш залежатиме від поліпшення обладнання і більше – від програмного забезпечення та систем управління, які дозволять організувати роботу цілих парків 3D-принтерів і роботизованих комплексів у єдиному робочому процесі. Дійсно, паралельно з удосконаленням самих принтерів (точність, швидкість, нові матеріали) набувають розвитку засоби автоматизації підготовчих і завершальних стадій. З'являються програмні платформи, що дозволяють централізовано керувати десятками принтерів, розподіляти завдання між ними та відстежувати статус кожного пристрою в режимі реального часу. Це особливо актуально для сервісних бюро, що надають послуги 3D-друку, де одночасно виконується багато різнорідних замовлень – саме тут програмна автоматизація здатна різко підвищити ефективність роботи [5].

На рівні промислових розробок провідні виробники 3D-принтерів також зосередилися на автоматизації. Компанія Formlabs у 2022–2023 роках представила так звану екосистему автоматизації для своїх SLA-принтерів, що включає апаратний модуль Form Auto для автоматичного зняття готових виробів з платформи та запуску наступного завдання, а також програмне забезпечення Fleet Control для централізованого керування парком принтерів. Таке рішення дає змогу організувати безперервний цикл друку без участі людини: за оцінками, один принтер з цією системою може виготовляти до 170 моделей на добу при мінімальній участі персоналу, значно знижуючи собівартість одиниці продукції. Інша компанія – 3DQue – запропонувала рішення для FDM-принтерів під назвою Quinly, яке являє собою поєднання спеціального програмного забезпечення та модифікованої поверхні столу, що автоматично відокремлює надруковані деталі. Огляди цього рішення відзначають, що система Quinly фактично реалізує концепцію безперервного друку: після завершення виготовлення деталей автоматично зміщується, звільняючи платформу для наступного виробу, а від оператора не вимагається жодних дій, окрім завантаження черги завдань [1 с. 1].

Попри значні досягнення, ряд аспектів автоматизації адитивного виробництва залишаються відкритими для подальших досліджень. Передусім, недостатньо вирішеною є задача повністю замкнутого циклу керування процесом друку для різних технологій. Якщо перші кроки в цьому напрямі вже зроблені (датчики контролю нитки, камери для виявлення дефектів поверхні, системи регулювання температури тощо), то узгоджена робота всіх цих компонентів як єдиної системи ще потребує відпрацювання. Наприклад, у випадку FDM-друку поки що поодинокі

реалізації мають адаптивне керування подачею матеріалу або корекцію траєкторії на льоту; відсутні універсальні рішення, що дозволяли б принтеру самостійно виправляти широкий спектр помилок друку. Аналогічно, для SLA- і SLS-технологій досі актуальними є проблеми контролю якості кожного шару: хоча існують лабораторні установки з оптичними системами спостереження за процесом (лазерні сканери, інфрачервоні камери тощо), інтеграція таких засобів у комерційні машини відбувається повільно через їхню вартість та складність обробки даних в реальному часі [8].

В українському вимірі додатково постають питання адаптації світового досвіду автоматизації до наявної бази обладнання і компетенцій. Більшість сучасних рішень розробляється за кордоном і може бути фінансово та технічно недоступною для широкого впровадження в Україні. Нерозв'язаною лишається проблема підготовки кадрів, здатних не тільки експлуатувати, а й розробляти системи автоматизованого керування адитивними технологіями. Це визначає потребу у посиленій науковій роботі вітчизняних закладів і тіснішій співпраці з промисловістю для спільного вирішення окреслених завдань.

Метою даної статті є дослідження та узагальнення підходів до розширення можливостей 3D-друку шляхом впровадження автоматизованих систем управління адитивними технологіями. Для досягнення цієї мети сформульовано такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан розвитку автоматизації у сфері адитивного виробництва, виявити основні досягнення та обмеження на основі огляду останніх досліджень і публікацій;
- розглянути приклади реалізації автоматизації на різних типах 3D-друку (FDM, SLA, SLS) та в різних компонентах процесу (програмне забезпечення, сенсорні системи, контроль якості, зворотний зв'язок тощо);
- показати, як автоматизація впливає на ключові показники процесу 3D-друку – точність виготовлення, стабільність якості, швидкість випуску продукції, трудомісткість тощо;
- оцінити перспективи застосування автоматизованого 3D-друку в Україні, враховуючи наявні виклики та потенційні переваги, а також окреслити напрямки подальших досліджень для вирішення невирішених проблем.

Таким чином, стаття покликана систематизувати знання про автоматизацію адитивних технологій і дати практичним фахівцям уявлення про те, які інструменти вже доступні для впровадження, а науковцям – вказати напрями, що потребують додаткової уваги.

Автоматизація FDM-друку. Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) є найбільш поширеною завдяки відносній простоті та доступності обладнання. Типовий FDM-принтер здійснює пошарове наплавлення розплавленого полімеру через екструдер, рухаючись по заданих координатах. Традиційно керування такими принтерами було відкритим циклом: контролер просто слідує G-коду, не маючи зворотного зв'язку про те, що відбувається насправді на робочій платформі. Останніми роками з'явилися рішення, які додають необхідні сенсори для закриття циклу. Так, сучасні моделі оснащуються датчиками кінця філаменту, датчиками рівня

платформи, іноді – камерами для спостереження за ходом друку. Проте найбільш просунуті приклади демонструють можливість активного втручання в процес друку на основі показників датчиків [6].

Автоматизація SLA-друку. Технологія стереолітографії (SLA) та споріднені методи фотополімерного 3D-друку (DLP, LCD) відрізняються високою точністю і широко застосовуються для виготовлення прототипів, ювелірних виробів, медичних моделей. Особливістю SLA є те, що процес протікає у ванні з рідкою фотополімерною смолою, де шар матеріалу твердне під дією лазера або проектованого зображення, після чого платформа підіймається для формування наступного шару. Автоматизація в SLA-друці історично була вищою, ніж у FDM, – багато установок оснащені закритими камерами, системами подачі смоли, автоматичною калибровкою тощо. Проте і тут є куди розширювати можливості. Найсвіжіший приклад – Automation Ecosystem від Formlabs, до складу якого входить апаратний модуль Form Auto. Цей пристрій встановлюється на принтери Form 3/3+ і автоматично знімає готову деталь разом з гнучкою платформою Build Platform 2 після друку, прибирає її у контейнер, після чого ставить чисту платформу і запускає наступний друк. Паралельно система подає смолу із зовнішнього резервуара (так званий High Volume Resin System), а програмний модуль Fleet Control розподіляє завдання між кількома принтерами та контролює їх стан. Сукупно такі вдосконалення дозволяють значно наростити продуктивність: за даними виробника, один SLA-принтер у автоматизованій конфігурації здатен виготовляти понад 170 типових моделей на добу без втручання оператора. Для порівняння, в традиційному режимі той самий принтер вимагав би ручного зняття кожної деталі і запуску нового завдання, що суттєво збільшує простой. Таким чином, автоматизація перетворює SLA-принтер на фактично безперервну виробничу одиницю [7].

Автоматизація SLS-друку. Вибіркове лазерне спікання (SLS) та споріднені методи порошкового друку (SLM – селективне лазерне плавлення металів, EBM – електронно-променеве плавлення тощо) являють собою напрям адитивних технологій, де автоматизація є надзвичайно актуальною з огляду на складність процесів. SLS-друк відбувається в замкнутій камері, заповненій дрібним порошком (полімерним або металевим) – шар порошку розподіляється по платформі і спікається лазером згідно з профілем шару. Тут автоматизація необхідна для точного підтримання умов процесу: системи контролю температури камери, дозування та рівномірного розподілу порошку, подачі інертного газу (для металевих порошків) є інтегральною частиною сучасних SLS/SLM машин. Компанія Festo, світовий лідер у галузі автоматизації, відзначає, що для забезпечення стабільно високої якості в адитивному виробництві критично важливими є точні та повторювані рухи виконавчих механізмів, а також автоматизація процесів завантаження і розвантаження матеріалів. У випадку SLS це означає, що подача свіжого порошку для кожного шару і видалення надлишків після друку мають виконуватися автоматично і з високою точністю [4]. Вже існують промислові рішення, коли до SLS-принтера додаються модулі автоматичного подавання порошку з бункерів,



системи просіювання і рециркуляції невикористаного матеріалу, а також роботи-маніпулятори, що вилучають виготовлені деталі з камери і переносять у камеру очищення. Весь цей комплекс може працювати без втручання людини, забезпечуючи безперервний цикл “друк – очищення – повторний друк”, особливо у виробництві серій пластмасових деталей [3].

Отже, автоматизація управління адитивними технологіями є ключем до розкриття повного потенціалу 3D-друку в промисловості. Проведене дослідження показало, що впровадження автоматизованих рішень на всіх етапах – від підготовки завдання до постобробки – дозволяє суттєво розширити можливості 3D-принтерів. По-перше, завдяки датчикам і системам зворотного зв'язку вдається досягти стабільно високої якості друку: принтер сам виявляє та коригує відхилення, мінімізуючи брак. По-друге, автоматизація рутинних операцій (завантаження матеріалу, зняття готових деталей, очищення платформи) переводить друк у безперервний режим, підвищуючи продуктивність і знижуючи потребу в ручній праці. По-третє, інтегроване програмне забезпечення дає змогу ефективно керувати парком обладнання, що особливо важливо для масштабного виробництва і дозволяє адитивним технологіям конкурувати з традиційними на рівні серійного випуску продукції. Всі ці фактори разом значно розширюють сфери застосування 3D-друку – від виготовлення великих партій однотипних деталей до масового кастомізованого виробництва, коли кожен виріб може бути унікальним без збільшення витрат.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ткачук В. О., Кулик Я. А. Застосування 3D принтера в Україні. Матеріали конференції ВНТУ. 2019. С. 1.
2. Lekas S Controlled 3D Printing. Oxford Engineering Science Department News. : веб-сайт. URL: [eng.ox.ac.uk/control/news/feedback-control-of-3d-printing/](http://eng.ox.ac.uk/control/news/feedback-control-of-3d-printing/) (дата звернення: 07.04.2025).
3. Molitch-Hou M. 2023 3D Printing Predictions: Software and Automation. 3DPrint.com. : веб-сайт. URL: [3dprint.com/296552/2023-3d-printing-predictions-software-and-automation/](http://3dprint.com/296552/2023-3d-printing-predictions-software-and-automation/) (дата звернення: 07.04.2025).
4. Festo. Адитивне виробництво та промисловий 3D-друк. Festo Ukraine : веб-сайт. URL: [festo.com/ua/uk/e/rishiennia/galuzi-promislovosti/aditivnie-virobnitstvo-ta-3d-druk/](http://festo.com/ua/uk/e/rishiennia/galuzi-promislovosti/aditivnie-virobnitstvo-ta-3d-druk/) (дата звернення: 07.04.2025).
5. Блог Artline. Огляд 3DQue Quinly: автоматизований 3D-друк (Частина 2) : веб-сайт. URL: [artline.ua/uk/blogs/obzor-3dque-quinly-avtomatizirovannaya-3d-pechat-chast-2](http://artline.ua/uk/blogs/obzor-3dque-quinly-avtomatizirovannaya-3d-pechat-chast-2) (дата звернення: 07.04.2025).
6. Formlabs. Introducing the Future of Automation in Digital Dentistry: веб-сайт. URL: [formlabs.com/automation-ecosystem-dental](http://formlabs.com/automation-ecosystem-dental) (дата звернення: 07.04.2025).
7. Коцан К. Українці створили унікальний 3D-принтер. ШоТам : веб-сайт. URL: [shotam.info/ukraintsi-stvoryly-unikal-nyu-3d-ptynter/](http://shotam.info/ukraintsi-stvoryly-unikal-nyu-3d-ptynter/) (дата звернення: 07.04.2025).
8. Dehghan S., Karganroudi S. S., Echchakoui S., Barka N. The Integration of Additive Manufacturing into Industry 4.0 and Industry 5.0: A Bibliometric Analysis. *Machines*. 2025. Vol.13, No.1. P.6. DOI:10.3390/machines13010062.

Кінденко М. І., Бобрик О.С., Шистка І.В., Бадюкова М.Г. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ЗБІЛЬШЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

**Анотація:** Надана робота присвячена дослідженню питань пов'язаних з підвищенням експлуатаційних властивостей інструментів з швидкорізальних сталей шляхом оптимізації режимів магнітно-імпульсної обробки конкретного виробу, використовуючи поточну інформацію за параметрами, що визначають умови і якість процесу магнітно-імпульсної обробки. Розглянуто інтелектуальну систему управління, показано доцільність застосування генетичних алгоритмів та нечіткої нейромережі в системі управління під час оптимізації режимів магнітно-імпульсної обробки.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка; інструмент з швидкорізальної сталі; експлуатаційні властивості; оптимізація режимів; інтелектуальна система управління.

**Abstract:** The presented work is dedicated to the investigation of issues related to improving the performance properties of high-speed steel tools through the optimization of magnetic-impulse treatment modes for a specific product. The optimization process is based on real-time information about parameters that determine the conditions and quality of the magnetic-impulse treatment process. An intelligent control system is considered, and the feasibility of using genetic algorithms and a fuzzy neural network in the control system for optimizing the magnetic-impulse treatment modes is demonstrated.

**Keywords:** magnetic-impulse treatment; high-speed steel tool; performance properties; mode optimization; intelligent control system.

Актуальність підвищення зносостійкості і довговічності металообробного інструменту в машинобудуванні зростає в сучасних умовах ринкової економіки, коли в машинобудуванні особливу роль має відігравати якість інструментів, в першу чергу ріжучих, що визначають багато в чому продуктивність верстатів і собівартість обробки в цілому.

Відмови інструментів найчастіше пов'язані не з їх поломкою, а з втратою ними своєї первісної поверхневої конфігурації внаслідок зносу, відколів, змінання, розтріскування, тобто в зв'язку з руйнуванням або деформацією тонких поверхневих шарів металу.

Саме цими обставинами пояснюється інтенсивний розвиток чисельних методів і розробок в області поверхневого зміцнення інструментів. Одним з основних напрямків фізичної технології є магнітна обробка матеріалів. В цілому результат магнітної обробки розглядається як прояв ефектів післядії в матеріалах, що знаходяться на межах стабільності їх властивостей і піддаються впливу зовнішнього силового поля.

Поліпшення властивостей у феромагнітних деталей, які пройшли магнітно-імпульсну обробку досягається за рахунок спрямованої орієнтації вільних електронів речовини зовнішнім полем, внаслідок чого збільшується тепло- і електропровідність матеріалу. Взаємодія імпульсного магнітного поля з деталлю з струмопровідного матеріалу відбувається тим інтенсивніше, чим вище структурна і енергетична неоднорідність речовини.

Застосовуючи МІО, можна значно зменшити надлишкову енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напружень в конкретній деталі, і знизити до мінімуму ймовірність її поломки [1].

Магнітне зміцнення на основі методу магнітно-імпульсної обробки (МІО) має низку переваг, зокрема: низька собівартість оброблення, збереження геометрії оброблених деталей, відсутність витратних матеріалів, простота технологічного оснащення та екологічна чистота.

Водночас слід зазначити, що ключовим моментом забезпечення ефективності МІО є правильний вибір режимів обробки. Вибір режимів є складним технічним завданням, що потребує індивідуального підходу до вирішення для кожної конкретної галузі застосування. Успішне розв'язання задачі вибору режимів МІО може бути досягнуто шляхом створення інтелектуальних систем керування цим процесом.

Мета роботи: збільшення стійкості інструменту шляхом створення інтелектуальної системи управління магнітно-імпульсної обробки для розв'язання задачі оптимального керування режимами МІО.

Нині триває інтенсивний розвиток методів і засобів МІО, у зв'язку з чим особливого інтересу набуває проблема математичного моделювання МІО з метою оптимального керування її основними параметрами. Складність керування процесом МІО полягає в тому, що необхідно одночасно здійснювати керування кількома параметрами (напруженістю магнітного поля, числом імпульсів у серії, частотою проходження імпульсів, часом імпульсу в серії, інтервалами між імпульсом у серії, числом серій імпульсів).

Керування МІО доводиться здійснювати на підставі емпіричних залежностей і дослідних даних, на які істотно впливають матеріал і форма виробу.

У ситуації, що склалася, виникає необхідність створення інтелектуальної системи управління МІО, що дає змогу оптимізувати режими оброблення для конкретних типів і матеріалів оброблюваних виробів.

Наявність апріорно заданих режимів МІО часто призводить до зниження якості обробки, оскільки під час програмування не можуть бути враховані особливості МІО конкретної деталі і розрахунок ведеться за

усередненими середньостатистичними даними. Разом з тим, у багатьох випадках оптимальні режими МІО є унікальними для конкретного зразка виробу.

Оскільки ефективність процесу МІО безпосередньо залежить від точності вибору режимів, виникає необхідність розв'язання задачі оптимального управління режимами - сукупності числових значень кількох параметрів, основними з яких є: напруженість магнітного поля, час імпульсу в серії, частота проходження імпульсів, кількість імпульсів у серії, інтервал між імпульсами в серії, кількість серій імпульсів.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що для подолання зазначених недоліків необхідна наявність інтелектуальної системи управління, що дає змогу оптимізувати процес оброблення кожної деталі, що визначає умови та якість процесу МІО. Управління процесами МІО в інтелектуальній системі управління МІО може бути здійснено за допомогою методів адаптивного управління.

Відповідно до принципів адаптивного керування, вплив на керований процес ведеться згідно з цільовою функцією - законом керування, спрямованим на досягнення і підтримання найефективнішого значення будь-якого параметра. Використання класичних методів адаптивного керування для розв'язання задач МІО малоприматне, оскільки процес МІО характеризується мінливістю параметрів оброблюваних виробів і складністю побудови точних математичних моделей, що описують зміну фізичних характеристик виробу під впливом магнітного поля. Опис процесів, що відбуваються під час обробки виробу, отримують або теоретично за використання відповідних припущень, або емпірично на підставі статистичного опрацювання результатів експериментів для типових випадків. Ці залежності не враховують значної кількості різноманітних чинників, що діють у реальних умовах у кожен момент часу. Завдання прогнозування результатів МІО належить до класу завдань, алгоритм розв'язання яких або не є єдиним, або не дає змоги оцінити якість розв'язання [2].

У зв'язку з цим постає завдання використання під час проектування системи керування МІО таких методів оптимізації, які були б здатні відшукувати рішення практично за повної відсутності припущень про характер досліджуваної функції.

Для подолання зазначених недоліків необхідне створення системи управління, що дає змогу:

- розв'язати завдання управління, моделювання та прогнозування результатів МІО.

- оптимізувати режими МІО конкретного виробу, використовуючи поточну інформацію за параметрами, що визначають умови і якість процесу МІО.

Сьогодні використання сучасних інтелектуальних технологій, таких як нейронні мережі та штучний інтелект, є передумовою проактивного розвитку всіх сфер діяльності людини.

Методи та засоби штучного інтелекту доходять до споживача у вигляді інтелектуальних технологій, які практично інваріантні до тієї чи іншої проблемної області. Їх успішно використовуються для створенні складних систем управління. Традиційно до інтелектуальних технологій відносять нечітку логіку, генетичні алгоритми і нейронні мережі. Вимоги до пристроїв управління – забезпечувати надійне управління об'єктом в різних режимах його роботи [2,3].

Розвиток технологій та створення високо продуктивних мікропроцесорів з великим об'ємом пам'яті, можливість організації мульти мереж для реалізації паралельних обчислень, з одного боку, та потреба обробки великих масивів інформації, використання баз знань для генерації направленої діяльності – з іншого, призвели до створення інтелектуальних систем. Інтелектуальні системи [3,4] здатні генерувати мету, приймати рішення до дії, забезпечувати дію для досягнення мети, прогнозувати значення параметрів результату дії і зіставляти їх з реальними, утворюючи зворотний зв'язок, коригувати мету або управління. Відмінною особливістю інтелектуальних систем керування є їх класифікаційне віднесення до класу динамічних систем, які працюють в режимі реального часу і мають в своєму складі підсистеми взаємодії з зовнішнім світом (датчики, виконавчі пристрої).

Доцільність застосування генетичних алгоритмів під час оптимізації режимів МІО обґрунтовано тим, що на практиці складно зафіксувати властивості функціональної залежності вихідних параметрів режимів МІО від вхідних величин, ще складніше зробити аналітичний опис такої залежності. Генетичний метод утворює клас алгоритмів пошукової оптимізації, заснованих на математичному моделюванні біологічних механізмів і процесів у живій природі за допомогою принципів популяційної генетики, що дають змогу знаходити оптимальні або близькі до них (субоптимальні) рішення [2].

Доцільність застосування нечіткої нейромережі в системі управління МІО зумовлена необхідністю класифікації даних, що використовуються під час обробки. Ефективно вирішити задачу моделювання та прогнозування результатів МІО. Використовувати апріорну інформацію, здобувати нові знання і бути для користувача логічно прозорими. Значну роль при

управлінні процесом МІО має технологія об'єктивізації процесу прийняття рішень. Інформаційна невизначеність і непередбачувані умови зумовлюють раціональність застосування методів теорії нейро-нечітких систем для управління складним процесом МІО [2,4].

Перед початком обробки вводяться параметри оброблюваної деталі - матеріал заготовки і геометричні параметри деталі. Після отримання цих даних комп'ютер визначає потрібну комбінацію параметрів оброблюваної деталі з бази даних. Якщо така інформація знайдена, з бази даних витягають діапазони параметрів режимів оброблення (напруженість магнітного поля  $H$ , числом імпульсів у серії  $n$ , часом імпульсу в серії  $\tau$ , інтервалом між імпульсом у серії  $t$ , числом серій імпульсів  $\Theta$ ). Якщо інформація не знайдена, проводиться пошук деталі з максимально близькими параметрами.

Після того, як визначено діапазон параметрів режимів обробки, він оптимізується за допомогою генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм оперує сукупністю параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ ), за яких після МІО деталей певного матеріалу і геометрії, отримують задану твердість поверхні.

Після того, як визначено параметри режимів обробки, вони подаються через нечітку нейронну мережу. Параметри режимів МІО проходять чотири блоки системи нечіткого логічного виведення:

- блок фазифікації, що перетворює чисельні параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ );
- база даних, що містить набір нечітких правил щодо зміни режимів оброблення;
- блок ухвалення рішень, що здійснює операції виведення на підставі наявних правил;
- блок дефазифікації, що перетворює результати виведення в чисельні значення параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ ).

Уточнені параметри подаються на модуль керування соленоїдом, після чого здійснюється процес МІО. Після обробки проводиться оцінка продуктивності, і якщо отриманий результат не задовольняє заявленому, результати обробки відправляються на навчання нечіткої нейромережі. Під час навчання нечіткої нейронної мережі відбувається зміна параметрів режимів обробки, і змінені режими подаються на МІО. Цикл повторюється, до отримання необхідних результатів, після чого режими обробки записуються в базу даних і базу даних нечіткої нейромережі.

Розроблена система має такі можливості:

1. Вибір параметрів режимів МІО під конкретний виріб з використанням інформації щодо початкових режимів оброблення, що містяться в базі даних системи.

2. Уточнення оптимальних режимів МІО з використанням нечіткої нейронної мережі.

3. Збереження результатів обробки конкретних виробів у базі даних і реалізація механізму самонавчання.

Програмну реалізацію алгоритму функціонування ІСУ МІО можна здійснити за допомогою інструментальних засобів пакета прикладних програм MATLAB 7 - Genetic Algorithm Tool (пакет генетичні алгоритми) і Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечіткої логіки).

## ВИСНОВКИ

1. Застосування інтелектуальної системи управління МІО дасть змогу змінювати параметри режимів обробки залежно від матеріалу і геометрії оброблюваного виробу. Це дасть змогу швидко переналаштовуватися на обробку виробів різних типів і матеріалів.

2. Застосування нечітких нейронних мереж в управлінні дасть змогу точно оптимізувати параметри режимів МІО для конкретного типу інструменту або виробу.

3. Застосування запропонованого підходу до управління МІО дасть змогу скоротити час на обробку виробів, підвищити якість МІО і скоротити витрату електроенергії, що витрачається на процес МІО.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Кінденко М.І. Вплив режимів магнітної обробки інструменту зі швидкорізальної сталі на його фізико-механічні властивості // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 16–17 травня 2024 р. Кременчук, КрНУ, 2024. – С. 67-68. <https://doi.org/10.32782/2079-5106.2024.3.2>*

2. *Інтелектуальні системи автоматизації : монографія / О.Г. Аврунін, С.І. Владов, М.В. Петченко, В.В. Семенець, В.В. Татарінов, Г.В. Тельнова, В.О. Філатов, Ю.М. Шмельов, Н.О. Шушлягіна – Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2021. – 322 с.*

3. Субботін С.О. *Нейронні мережі. Навчальний посібник /С.О. Субботін - Запоріжжя : ЗНТУ, 2014.132 с.*

4. *Нестеренко О.В., Савенков О.І., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: навч. посібн. / за ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління. 2016. 188 с.*

**Кобець І.Р., Кузнєцов Ю.М.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## СТВОРЕННЯ НАСТІЛЬНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

**Анотація:** У статті представлено результати розробки настільного фрезерного верстата портального типу з числовим програмним керуванням, що може бути трансформований для виконання функцій 3D-друку та лазерного гравіювання. Проведено огляд сучасних рішень у сфері малогабаритного верстатобудування та здійснено порівняльний аналіз існуючих конструкцій. Обґрунтовано вибір компоновальних схем, систем приводів та програмного забезпечення для побудови керуючих програм на основі Autodesk Inventor і PowerMill. Визначено переваги використання двоярусної конструкції столу для обробки деталей різної габаритності та реалізації 4-координатної обробки. Робота має прикладне значення для організації лабораторної бази в умовах обмеженого фінансування та популяризації сучасних технологій у навчальному процесі.

**Ключові слова:** настільний фрезерний верстат; портальна компоновка; ЧПК; керуюча програма; 4-осьова обробка; Autodesk Inventor; PowerMill; навчальні технології.

**Abstract:** The article presents the results of the development of a desktop CNC milling machine of portal design, which can be transformed to perform 3D printing and laser engraving functions. A review of current solutions in the field of compact machine tool construction is provided, with a comparative analysis of existing designs. The selection of layout schemes, drive systems, and software tools is substantiated, particularly the use of Autodesk Inventor and PowerMill for generating control programs. The benefits of a two-tier worktable structure are highlighted, enabling the machining of parts with varying dimensions and the implementation of 4-axis machining. The work has practical significance for establishing laboratory infrastructure under budget constraints and for promoting modern technologies in the educational process.

**Keywords:** desktop milling machine; portal design; CNC; control program; 4-axis machining; Autodesk Inventor; PowerMill; educational technologies.

**Постановка проблеми.** Верстатобудування, як ключова галузь машинобудування, грає важливу роль у розвитку промисловості та національних економік. Розвиток промисловості та її галузева структура визначають стан індустріального та технологічного рівня економіки країни, ефективність її виробництва, стабільність, сталість розвитку та економічну незалежність держави [5]. Сучасний прогрес технологій виробництва невпинно розвивається, вимагаючи від інженерів і вчених постійного пошуку нових рішень та технологій для підвищення ефективності та автоматизації виробничих процесів. Для цього потрібне створення в навчальному процесі сучасної лабораторної дослідницької бази [7,9]. В умовах обмеженого фінансування вищої освіти доцільного виготовляти малогабаритні настільні верстати з комп'ютерним керуванням, які можуть використовуватися як для навчального процесу, так і на підприємствах для виготовлення деталей невеликих розмірів.



Для цього необхідно впроваджувати наступні рекомендації [3]: оптимізувати існуючі виробничі потужності, автоматизувати та залучати передові цифрові технології для налагодження робочих процесів; прискорювати впровадження технологічних інновацій та інноваційних процесів; підвищувати кваліфікаційний рівень працівників машинобудування. Водночас науковцям і підприємцям варто продовжувати дослідження процесу розробки та впровадження нових технологій у машинобудуванні, адже використання сучасних технологій стає необхідністю, яка запобігає ризикам втрати актуальності на ринку сучасної промисловості.

**Основне завдання та одержані результати роботи.** Метою роботи є аналіз відомих малогабаритних верстатів і створення нового з розширеними функціональними можливостями.

На сучасному ринку інструментів і обладнання для малого та середнього виробництва існує багато виробників, що спеціалізуються на малогабаритних верстатах. Це обладнання відзначається високою мобільністю, компактністю та зручністю в експлуатації.

На ринку малогабаритних верстатів з ЧПК можна зустріти такі компанії як ПП «АНДІС-ТЕХНО», CNC Machines, Raptor CNC, AST3D. Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК "SMART Light" від SmartCNC оснащений сенсорним екраном і автономним контролером (може працювати без підключення до ПК) та відмінно підійде для роботи з усіма видами дерева та м'яких металів. В якості приводу осі Z використовується кулькова гвинтова пара (КГП) [10]. Компанія **CNC MACHINES** – виробник 3-х координатного фрезерного верстата з ЧПК «Сокіл 3040», призначеного для опрацювання 2D і 3D моделей, а також тіл обертання (зі встановленим модулем 4-ї осі). На верстаті можна виконувати такі операції, як розкрій листових матеріалів, вибірка, фрезерування пазів, гравірування, фрезерування 3d-рельєфів, свердління, лазерне гравіювання, фрезерування тіл обертання. **Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd.** є лідером у виробництві споживчих 3D-принтерів на світовому ринку [11]. Найновіший апарат Creality CP-01 зі змінними головками призначений для 3D-друку, лазерного гравіювання та фрезерування. На сьогоднішній день можна зустріти настільні фрезерні верстати з наступними схемами компоновки:

**Вертикальна компоновка** (рис.1). У цій схемі верстат має вертикальну колонку, на якій розташований шпиндель зі свердлом або фрезою. Такі верстати обладнані рухомим хрестовим столом з Т-подібними пазами для установки і закріплення заготовки, лещат або іншого пристосування. Вертикальні верстати добре підходять для свердління отворів або фрезерування на вертикальних поверхнях.



c

Рисунок 1 – Фрезерний верстат JET JMD-X1L

**Портальна компоновка** (рис.2), де шпиндель рухається вздовж порталу (рами), що підтримує горизонтальний рух вздовж осей X та Y. Ця схема дозволяє забезпечити великий робочий простір і високу точність обробки великих деталей. Верстати такого типу можуть бути з рухомим порталом (рис.2) або з рухомим столом (рис.3).



Рисунок 2 – CNC Router of the High-Z T-Series

У верстаті з рухомим порталом робочий інструмент (наприклад, фреза або інший різальний інструмент) рухається вздовж горизонтальних напрямків на портальній конструкції, яка підтримує його рух. Портал має великі розміри і дозволяє обробляти великі деталі або великі робочі області.

У верстатах з рухомим столом робочий інструмент розташований на жорсткому порталі, а робочий стіл, на якому розташовані оброблювані деталі, рухається вздовж горизонтальних напрямків. Рухомий стіл дозволяє легко позиціонувати та обробляти деталі, а портал забезпечує стабільну підтримку робочого інструмента.

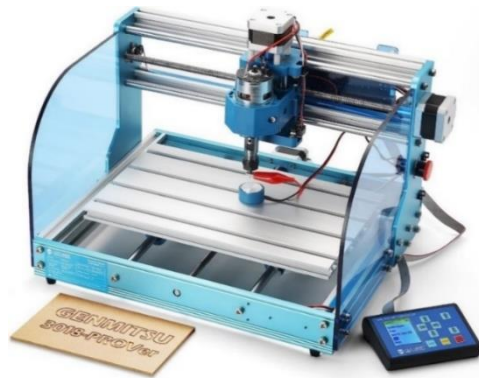


Рисунок 3 – SainSmart Genmitsu 3018-PROVer

Небагато виробників розроблюють настільні фрезерні верстати, в яких передбачена багатофункціональність, що полягає у можливості швидко і просто замінити мотор-шпиндель на друкуючу головку 3D-принтера або лазерну головку для різки листового матеріалу чи гравіювання.

**Проектування верстата.** Після ретельного аналізу значного обсягу даних, патентного дослідження подібних верстатів та детального вивчення їх конструкції [4,6,8], авторами сконструйований в різних варіантах виконання настільний верстат портального компонування (рис.4).

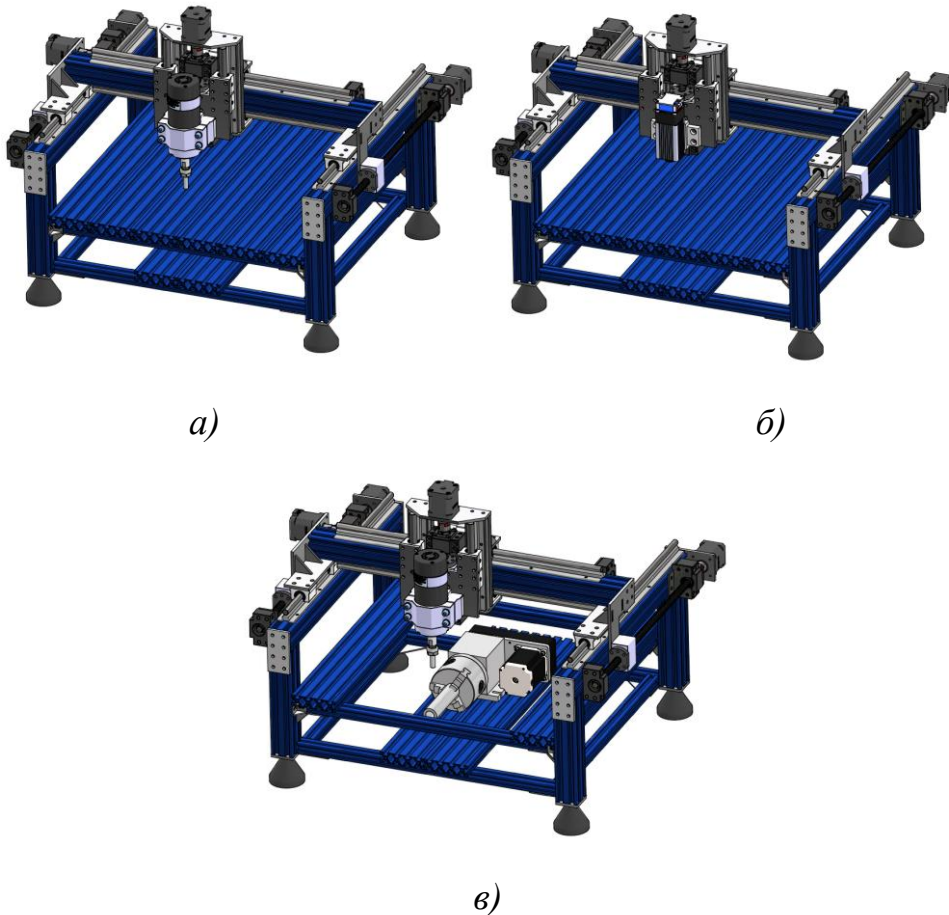


Рисунок 4 – Варіанти створеного верстат: а) - фрезерний верстат; б) - лазерний верстат; в) - фрезерний 4-х координатний верстат

Верстат містить два робочих столи. Верхній призначений для обробки листового матеріалу і малогабаритних деталей, нижній – для встановлення на ньому верстатного оснащення (ділильна головка, лещата) і обробки більш габаритних деталей. Це дозволяє при малому ході шпинделя вздовж осі Z оброблювати досить широкий спектр деталей. При використанні нижнього столу слід демонтувати кілька центральних секцій верхнього столу, а оскільки стіл складається з кількох профілів V-slot 20x80, то демонтаж не викликає значних проблем. Координатні переміщення здійснюються за рахунок кульково-гвинтових передач (КГП).

**Налагодження верстата.** Для створення керуючої програми використано програмне забезпечення від компанії Autodesk, а саме Inventor 2024 та PowerMill 2024. Спочатку за допомогою Inventor 2024 створюється 3д-модель деталі, яку необхідно потім завантажити у PowerMill 2024 для створення керуючої програми. Для прикладу виконана обробка шахової фігури – короля (рис.5).

Обробка на верстаті з 4-ма осями буде відбуватись в декілька етапів. Спочатку виконується чорнова обробка однієї половини деталі (розділення відбувається вздовж четвертої поворотної осі), потім заготовка повертається на  $180^\circ$  і оброблюється інша половина.

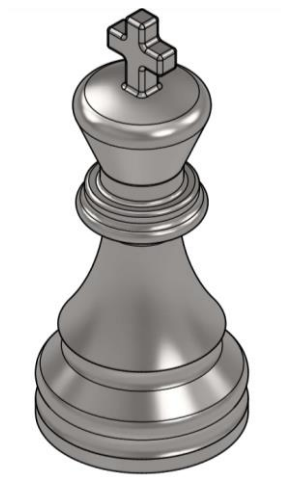


Рисунок 5 – Деталь для обробки на розробленому верстаті

Чистова обробка відбувається без розділення деталі. Друга половина деталі оброблюється аналогічним чином. Для цього створюється копія раніше установленної локальної системи координат, і стратегія обробки. Систему координат повертають на  $180^\circ$  навколо осі X, всі інші налаштування залишаю без змін. Створені керуючі програми для чорнової і чистової обробки необхідно зберегти у NC-файл, в якому буде розміщений G-код. Чистова обробка буде виконуватись за стратегією «4 осьова», при якій вісь A постійно обертається, а робочий орган рухається в площині YZ. Таким чином виконується обробка ніби по спіралі. Для цього методу обробки також налаштовуються параметри інструменту, режими різання і т.д.

Далі всі дії виконуються аналогічно до вищенаведеного прикладу створення керуючої програми для чорнової обробки. В результаті маємо

повністю готову керуючу програму для обробки деталі. Результат симуляції програми наведено на рис.6.

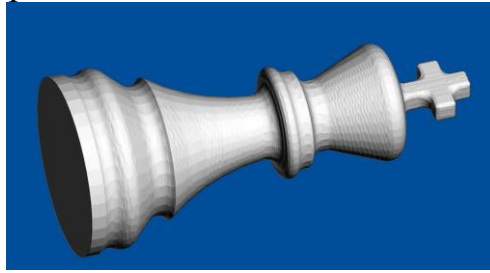


Рисунок 6 – Деталь після чистового фрезерування

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: В 3-х частинах. За ред. Ю.М. Кузнєцова /автор Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кіріченко А.М. та інші. Кіровоград, 2003. — ч.1 — 422 с.
2. Кузнєцов Ю.М., Саленко О.Ф., Харченко О.О., Щетинін В.Т. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення. – Вид-во «Точка». 2014 – 500 с.
3. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І., Гао Сінмін Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика: Монографія-Луцьк: Вежа-Друк, 2023 – 292 с. ISBN 978-966-940449-7
4. Кузнєцов Ю.М., Кривчук Ю.Т. Спрямований генетичний синтез настільних фрезерних верстатів //XIX – XX МНПК «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», 25-26.11.2020, м.Суми, СумДУ. - с.103-106
5. Кузнєцов Ю.М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні / Вісті АІНУ №1 (44), 2011.
6. Кузнєцов Ю.Н., Гайдаєнко Ю.В., Кривчук Ю.Т. Моделирование вариантов малогабаритного фрезерного станка портальной компоновки (англ.) //Международная научно-техническая конференция UNITECH'19, г.Габрово (Болгария), 2019, т.2.- с.255-258.
7. Кузнєцов Ю.М., Степаненко О.О. Настільні фрезерні верстати, керовані комп'ютером // Технологічні комплекси, Луцьк. – 2010. – № 1. – С. 72–77.
8. Степаненко О.О., Манжоло М.Ю., Кузнєцов Ю.М. Дослідження впливу компонувань настільних фрезерних верстатів з ЧПК на якість обробки деталей //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки», №2, Чернігів, 2015, с.78-83.
9. Степаненко О.О. Синтез малогабаритних фрезерних верстатів з комп'ютерним керуванням. Автореферат дис. канд. техн. наук. -К.:2014.-14с.
10. <https://smartcnc.com.ua/shop/frezernyj-gravirovalnyj-standok-s-chpu-smart-light-4060>
11. Creality. URL: <https://www.creality.com/>

**Ковалевський С.В.**, (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна), **Побережець В.Я.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗБУДЖЕННІ «БІЛИМ ШУМОМ»: ОЦІНКА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

**Анотація:** У цій роботі представлено результати дослідження спектральних характеристик різних матеріалів при збудженні «білим шумом». Проведено аналіз основних статистичних параметрів сигналів, включаючи середнє значення, дисперсію, частоту та амплітуду піку, а також ентропію спектра. Отримані результати вказують на суттєві відмінності між матеріалами, що може бути використано для їхньої подальшої класифікації та оцінки фізико-механічних властивостей. Запропонований підхід дозволяє ефективно аналізувати динамічні характеристики матеріалів і може знайти застосування у розробці нових конструкційних рішень.

**Ключові слова:** спектральний аналіз; білий шум; ентропія спектра; динамічні характеристики; статистичні параметри сигналу; фізико-механічні властивості матеріалів.

**Abstract:** This paper presents the results of a study on the spectral characteristics of various materials under excitation by white noise. The analysis covers key statistical parameters of the signals, including mean value, variance, peak frequency and amplitude, as well as spectral entropy. The obtained results reveal significant differences between the materials, which can be utilized for their further classification and assessment of physical and mechanical properties. The proposed approach enables effective analysis of the dynamic characteristics of materials and can be applied in the development of new structural solutions.

**Keywords:** spectral analysis; white noise; spectral entropy; dynamic characteristics; statistical signal parameters; physical and mechanical properties of materials.

*Постановка проблеми в загальному вигляді.* У сучасних експериментальних дослідженнях фізико-механічних властивостей матеріалів та структур дедалі ширше застосовується методика збудження «білим шумом» з подальшим аналізом спектральних відгуків [1]. Такий підхід дає змогу отримати комплексну характеристику динамічних властивостей об'єкта дослідження, зокрема оцінити його частотні та амплітудні параметри, демпфування та стійкість до зовнішніх впливів.

Важливим аспектом є коректне визначення статистичних параметрів отриманих сигналів, оскільки вони відіграють ключову роль у побудові моделей поведінки матеріалів і конструкцій, оцінюванні їхніх характеристик та прогнозуванні експлуатаційних властивостей [2]. Використання методів статистичної обробки дозволяє визначити середні значення, дисперсію, автокореляційні функції та спектральну щільність потужності, що, у свою чергу, дає змогу зробити висновки про фізичні

процеси, що відбуваються в досліджуваних зразках[3].

У цій доповіді розглянуто методику оцінювання статистичних параметрів спектрів відгуку зразків на збудження «білим шумом», описано основні алгоритми обробки сигналів, а також проаналізовано отримані результати для різних типів матеріалів та конструкцій[4]. Особлива увага приділена порівнянню різних методів розрахунку, їхній точності та обґрунтованості вибору підходів до статистичного аналізу сигналів[5].

*Основний матеріал.* Результати дослідження демонструють суттєві відмінності у спектральних характеристиках різних матеріалів при збудженні «білим шумом». Аналіз отриманих параметрів дозволяє виділити ключові особливості кожного з досліджуваних зразків та оцінити їхню динамічну поведінку. В таблиці 1 представлено оцінки статистичних параметрів сигналів спектрів.

Таблиця 1 – Розраховані оцінки статистичних параметрів сигналів спектрів відгуку зразків на збудження «білим шумом»

Матеріал	Середнє	Дисперсія	Частота піку, Гц	Амплітуда піку	Ентропія спектра (біт)
Сталь	0.0015	0.2063	27.4	644.2	8.91
Мідь	-0.00045	0.1000	75.3	238.1	10.51
Дюралюміній	-0.00179	0.1000	153.4	191.4	10.94
Текстоліт	0.00150	0.0500	215.5	65.7	11.66
Органічне скло	-0.00255	0.0500	318.8	80.1	11.60

Середнє значення сигналу для всіх матеріалів знаходиться в межах малих величин, що свідчить про симетричний характер випадкових збурень. Найбільші значення середнього показника спостерігаються у сталі (0.0015) та текстоліту (0.00150), тоді як мідь, дюралюміній та органічне скло демонструють від'ємні середні значення.

Дисперсія сигналу, що характеризує розкид значень, є максимальною у сталі (0.2063), тоді як для решти матеріалів вона значно менша і становить 0.1000 або 0.0500. Це свідчить про вищу мінливість характеристик сталі у відповідь на збудження.

Частотні параметри спектра також суттєво відрізняються: відносно низька пікова частота у сталі (27.4 Гц) поступово зростає для інших матеріалів, досягаючи 318.8 Гц для органічного скла. Це вказує на відмінності в жорсткості та внутрішніх коливальних характеристиках матеріалів.

Аналіз амплітуди піку спектра показав, що найбільше значення має сталь (644.2), тоді як для інших матеріалів воно значно менше, що вказує на різну здатність до поглинання енергії збудження.

Нарешті, значення ентропії спектра варіюються від 8.91 біта для сталі

до 11.66 біта для текстоліту, що свідчить про складність спектрального розподілу сигналів для різних матеріалів. Вищі значення ентропії можуть вказувати на більш рівномірний розподіл енергії в частотному діапазоні.

Загалом, результати дослідження підтверджують ефективність методу збудження «білим шумом» для аналізу фізико-механічних властивостей матеріалів та демонструють можливість отримання важливих характеристик, необхідних для моделювання їхньої поведінки в реальних умовах експлуатації.

*Висновки.* Отримані результати дозволяють зрозуміти, що методика аналізу спектральних характеристик при збудженні «білим шумом» є ефективним інструментом для оцінювання фізико-механічних властивостей матеріалів. Виявлені відмінності у спектральних параметрах вказують на специфічні особливості кожного матеріалу, що може бути використано при виборі конструкційних матеріалів залежно від умов експлуатації. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення методів аналізу та розширення спектра досліджуваних матеріалів.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Christie D. C. *Efficient estimation of directional wave buoy spectra using a reformulated Maximum Shannon Entropy Method: Analysis and comparisons for coastal wave datasets.* *Applied Ocean Research.* 2024. Vol. 142. Article 103830. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103830>. ISSN 0141-1187.

2. Spencer N. A., Miller J. W. *Strong uniform laws of large numbers for bootstrap means and other randomly weighted sums.* *Statistics & Probability Letters.* 2024. Vol. 211. Article 110144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110144>

3. Tomaschitz R. *Multiply broken power-law densities as survival functions: An alternative to Pareto and lognormal fits.* *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* 2020. Vol. 541. Article 123188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123188>

4. Kovalevskyy S., Kovalevska O. *New opportunities for processing materials in a strong magnetic fields.* *Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка».* – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 4 (26). – С. 7-14.

5. Kovalevskyy S., Kovalevska O.: *Identification and Technological Impact of Broadband Vibration on the Object.* *Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021), September 7-10, 2021, Odessa, Ukraine. ABCM Series on Mechanical Sciences and Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems, pp. 78-87. DOI 10.1007/978-3-030-91327-4\_8.*



**Ковалевський С.В.**, (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна), **Кузьменко П.А.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Анотація:** У даній роботі запропоновано новітній інтелектуальний підхід до класифікації технологічних методів формування функціональних робочих поверхонь деталей машин на основі поєднання методів системного аналізу та нейромережевого моделювання. Розроблено багаторівневу класифікаційну модель, яка ієрархічно структурує технологічні методи з урахуванням комплексу морфологічних, фізико-механічних, структурних та експлуатаційних характеристик поверхневих шарів. Запропоновано архітектуру глибокої нейронної мережі з адаптивним самоналаштуванням гіперпараметрів, що реалізує автоматизований вибір оптимального методу формування з урахуванням вимог до кінцевої якості поверхні. Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що застосування запропонованої системи дозволяє підвищити точність прийняття рішень щодо вибору технологій на 27–34% порівняно з традиційними евристичними та експертними підходами. Система підтримує інтеграцію з сучасними CAD/CAM/CAE-платформами та забезпечує можливість прогнозного оцінювання експлуатаційних властивостей деталей ще на етапі конструкторсько-технологічного проектування.

**Ключові слова:** функціональні поверхні, інтелектуальна класифікація, нейромережні моделі, системний аналіз, технологічні методи, машинобудування.

**Abstract:** This study presents a novel intelligent approach to the classification of technological methods for forming functional working surfaces of machine parts, based on the integration of systems analysis and neural network modeling. A multi-level classification model has been developed, hierarchically structuring technological methods according to a comprehensive set of morphological, physico-mechanical, structural, and operational characteristics of surface layers. A deep neural network architecture with adaptive self-tuning of hyperparameters is proposed to enable automated selection of optimal processing methods in accordance with target surface quality requirements. Experimental validation demonstrates that the proposed system improves decision-making accuracy in method selection by 27–34% compared to conventional heuristic and expert-based approaches. The system supports integration with modern CAD/CAM/CAE platforms and enables predictive assessment of the performance properties of machine parts at the design and process planning stage.

**Keywords:** functional surfaces, intelligent classification, neural network models, system analysis, technological methods, mechanical engineering.

У сучасному машинобудуванні функціональні властивості конструкцій значною мірою визначаються параметрами поверхневого шару деталей, який формує контакт із робочим середовищем та іншими елементами механізму. Саме цей шар безпосередньо впливає на зносостійкість, корозійну стійкість, контактну жорсткість, а також інші ключові триботехнічні характеристики виробів [1,2]. У зв'язку з широким

спектром існуючих технологічних методів обробки поверхонь постає нагальна потреба в розробці інтелектуальних систем, здатних здійснювати адаптивну класифікацію та ефективний вибір оптимального технологічного підходу з урахуванням цільових експлуатаційних вимог [3].

Традиційні методики, що базуються переважно на емпіричних закономірностях та евристичних правилах, часто виявляються недостатньо ефективними в умовах зростаючої складності виробничих задач і варіативності технічних умов. Сучасний рівень розвитку штучного інтелекту, зокрема нейромережових технологій, у поєднанні з методами системного аналізу відкриває можливості для створення інтелектуальних класифікаційних систем нового покоління, здатних самонавчатися, адаптуватися до нових технологічних умов та виявляти приховані залежності у багатофакторних даних [4].

Метою цієї роботи є розроблення методології інтелектуальної класифікації технологічних процесів формування функціональних поверхонь деталей машин на основі комплексного врахування морфологічних, структурних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик. Сучасні дослідження демонструють ефективність багаторівневих нейромережових підходів до вирішення класифікаційних задач у галузі обробки матеріалів [5]. Особливої актуальності набуває створення високофлексибельних та автоматизованих систем класифікації, здатних оперативно реагувати на динаміку впровадження інноваційних технологій та трансформацію виробничих процесів у контексті вимог Індустрії 4.0 [6,7,8].

Для побудови нейромережової моделі класифікації технологічних методів формування функціональних поверхонь було сформовано комплексну багатофакторну базу даних, яка охоплює інформацію про більш 150 технологічних підходів. До складу бази увійшли структуровані дані щодо режимів обробки, типів матеріалів, морфологічних та фізико-механічних характеристик оброблених поверхонь, а також результати лабораторних експериментів, що відображають зміну функціональних властивостей після застосування відповідних методів.

З метою верифікації ефективності запропонованої інтелектуальної системи класифікації було організовано серію експериментальних досліджень. Основним завданням досліджень стало визначення здатності системи здійснювати обґрунтований вибір оптимального методу формування поверхні відповідно до умов експлуатаційного навантаження та функціонального призначення деталей. Експерименти проводились на базі лабораторії інженерії поверхні, оснащеної високоточним вимірювальним та аналітичним обладнанням, що дозволяє досліджувати топографію, мікротвердість, залишкові напруження та інші критичні параметри поверхневого шару.

Аналіз отриманих даних представлено у Таблиці 1, яка містить порівняльні результати застосування різних підходів до вибору

технологічних методів — традиційних евристичних стратегій, ручного експертного аналізу та запропонованої нейромережної моделі. Наведені результати демонструють переваги інтелектуального підходу за критеріями точності, адаптивності та узгодженості з експлуатаційними вимогами.

Таблиця 1. Порівняльна оцінка ефективності вибору технологічних методів

Тип деталі	Функціональна поверхня	Інтелектуальна система	Експертна оцінка	Критеріальна модель
Вал редуктора	Опорна шийка	94.8%	82.3%	73.5%
Зубчате колесо	Бічна поверхня зуба	93.2%	79.6%	68.7%
Підшипникове кільце	Доріжка кочення	95.6%	84.2%	75.1%
Корпусна деталь	Посадочна поверхня	91.4%	76.8%	63.4%
Плунжерна пара	Робоча поверхня	96.2%	83.7%	71.9%

Ефективність роботи інтелектуальної системи оцінювалася комплексно, враховуючи ступінь відповідності отриманої поверхні її функціональному призначенню, а також техніко-економічні характеристики використаних технологічних методів. Отримані результати свідчать, що розроблена інтелектуальна система класифікації забезпечує суттєво вищу ефективність вибору технологічних методів обробки порівняно з традиційними підходами.

Виконано детальний порівняльний аналіз того, наскільки ефективно працює розроблена інтелектуальна система для класифікації технологічних методів порівняно з існуючими аналогами. Для того, щоб отримати повну картину переваг та недоліків нової системи, аналіз проводився за декількома критеріями. Першим із критеріїв стала точність класифікації, яка визначалася як відношення кількості правильно класифікованих технологічних методів до загальної кількості класифікованих методів, виражене у відсотках. Це дозволило зрозуміти, наскільки система точно визначає правильну категорію для кожного методу. Другий критерій— повнота класифікації—характеризував, наскільки добре система здатна врахувати усі можливі методи, які мають бути класифіковані. Цей показник також вимірювався у відсотках, дозволяючи оцінити рівень охоплення системою всього спектра методів. Наступним був обраний інтегральний показник— $F1$ , який поєднує в собі точність та повноту класифікації. Четвертим критерієм виступив час класифікації, що включав у себе загальний період, необхідний для виконання класифікації технологічних методів та вибору оптимальних з них. Цей критерій дозволив оцінити ефективність системи з точки зору швидкості роботи. Нарешті, п'ятий

критерій—адаптивність—відображав можливість інтелектуальної системи гнучко пристосовуватися до нових наборів даних, які не використовувалися під час первинного навчання. Саме цей критерій особливо важливий для практичного застосування системи у динамічних умовах реального виробництва. Усі отримані результати, що дозволяють чітко побачити переваги нової системи порівняно з іншими існуючими підходами, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняльний аналіз систем класифікації

Критерій	Розроблена система	Система на основі експертних правил	Система на основі статистичних методів
Точність класифікації	94.3%	82.7%	78.9%
Повнота класифікації	91.8%	75.4%	83.2%
F1	93.0%	78.9%	81.0%
Час класифікації	1.2 с	4.5 с	2.8 с
Адаптивність	Висока	Низька	Середня

Як видно з таблиці 2, розроблена інтелектуальна система демонструє вищі показники точності, повноти та F1 порівняно з існуючими підходами. Особливо важливою перевагою є висока адаптивність системи, що дозволяє інтегрувати нові технологічні методи без перепрограмування.

## ВИСНОВКИ

У ході дослідження було розроблено та експериментально апробовано нову методологію інтелектуальної класифікації технологічних методів формування функціональних робочих поверхонь деталей машин, що базується на поєднанні неймережевого моделювання та системного аналізу. Запропонована багаторівнева архітектура штучної нейронної мережі, доповнена механізмами динамічного самоналаштування параметрів, забезпечила суттєве покращення точності та ефективності процесу класифікації у порівнянні з традиційними підходами, заснованими на емпіричних та евристичних процедурах.

Експериментальні результати засвідчили, що використання розробленої інтелектуальної системи дозволяє підвищити точність вибору відповідного технологічного методу на 27–34%, що, в свою чергу, сприяє зменшенню інтенсивності зношування оброблених поверхонь на 18–42% та підвищенню корозійної стійкості на 15–35%. Важливою функціональною перевагою системи є її здатність до інтеграції з цифровими інженерними платформами класу CAD/CAM/CAE, що створює підґрунтя для автоматизованого прогнозування експлуатаційних властивостей виробів ще на стадії проектування.

Програмна реалізація методології продемонструвала високу адаптивність до змінних виробничих умов, що є критично важливим для умов динамічних або гнучких технологічних середовищ. Проведений порівняльний аналіз підтвердив перевагу розробленої нейромережної моделі за критеріями точності, повноти охоплення класів та швидкодії прийняття рішень.

Узагальнено, інтелектуальна система, створена в рамках цієї роботи, забезпечує комплексний підхід до управління технологічними процесами формування функціональних поверхонь, суттєво спрощуючи вибір обробних методів і сприяючи зростанню якості, надійності та ресурсної ефективності кінцевої продукції. Отримані результати відкривають перспективи для подальшої розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у машинобудуванні, матеріалознавстві, а також у суміжних сферах високотехнологічного виробництва.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Linke, H., Börner, J., Heß, R. *Load Capacity and Running Performance of External and Internal Gearing* / Heinz Linke, Jörg Börner, Ralf Heß // *Cylindrical Gears* / Ed. by H. Linke, J. Börner, R. Heß. – Munich : Hanser, 2016. – P. 177–457. – ISBN 978-1-56990-489-3. – DOI: <https://doi.org/10.3139/9781569904909.006>.
2. Vereschaka A., Volosova M., Sitnikov N., Andreev N., Milovich F., Bublikov J. *Filtered cathodic vacuum arc deposition (FCVAD) technology as method for creation of nanostructured multicomponent modifying coatings for wide application range*. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 95. P. 999–1003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.201>.
3. Taheri Kahnemouei J., Moallem M. *Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review*. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312, Pt. 3. Article 119294. ISSN 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119294>.
4. Valizadeh Sotubadi, S., Pallissery, S. S., Nguyen, V. *Multi-Modal Explainable Artificial Intelligence for neural network-based tool wear detection in machining*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 144. Art. 110141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110141>.
5. Qian K., Zou L., Wang Z., Wang W. *Metallic surface defect recognition network based on global feature aggregation and dual context decoupled head*. *Applied Soft Computing*. 2024. Vol. 158. Article 111589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111589>.
6. Yang Huguang, Zheng Han, Zhang Taohong. *A review of artificial intelligent methods for machined surface roughness prediction*. *Tribology International*. 2024. Vol. 199. Article 109935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109935>.
7. Ковалевський С. Деякі аспекти застосування штучного інтелекту для відновлення та розвитку України. *Штучний інтелект*. 2023. № 3. С. 117-125. DOI: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001445551>.
8. Kovalevskyy S. *Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks* // Міжнародний науково-технічний журнал «Штучний інтелект». «Фізико-математичні та технічні науки». – 2024. – № 4(101). – С.218-227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.

**Ковалевський С.В., Сидюк Д.М.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **АНАЛІЗ ЗМІН ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ МАГНІТО-РЕЗОНАНСНИХ ВПЛИВАХ НА ЇХ РОБОЧІ ПОВЕРХНІ**

**Анотація:** У даній статті представлено результати комплексного дослідження впливу магнітно-резонансної обробки (МРО) на фізико-механічні та експлуатаційні властивості металевих матеріалів, що використовуються у виробництві деталей машин. Проаналізовано механізми структурних перетворень при різних режимах магнітно-резонансного впливу та встановлено оптимальні параметри обробки для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та втомної міцності робочих поверхонь. Експериментально доведено, що застосування МРО дозволяє значно покращити трибологічні характеристики поверхневих шарів за рахунок формування наноструктурованого стану та зміни залишкових напружень. Представлено математичну модель прогнозування експлуатаційного ресурсу деталей після магнітно-резонансної обробки та запропоновано технологічні рекомендації щодо її практичного застосування у машинобудуванні.

**Ключові слова:** магнітно-резонансна обробка, поверхнєве зміцнення, мікроструктура, наноструктурування, зносостійкість, залишкові напруження, деталі машин, експлуатаційний ресурс.

**Abstract:** This article presents the results of a comprehensive study on the effect of magnetic resonance treatment (MRT) on the physical, mechanical, and operational properties of metallic materials used in machine part manufacturing. The mechanisms of structural transformations under different magnetic resonance treatment modes are analyzed, and the optimal processing parameters for improving wear resistance, corrosion resistance, and fatigue strength of working surfaces are determined. Experimental results demonstrate that the application of MRT significantly enhances the tribological characteristics of surface layers by forming a nanostructured state and altering residual stresses. A mathematical model for predicting the operational life of parts after magnetic resonance treatment is presented, and technological recommendations for its practical application in mechanical engineering are proposed.

**Keywords:** magnetic resonance treatment; surface strengthening; microstructure; nanostructuring; wear resistance; residual stresses; machine parts; operational life.

Сучасні тенденції розвитку машинобудування характеризуються постійним підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик деталей машин та механізмів. Особливої актуальності набувають технології поверхневого зміцнення, які дозволяють цілеспрямовано модифікувати властивості робочих поверхонь без зміни хімічного складу матеріалу.

Одним із перспективних напрямків поверхневої обробки є магнітно-резонансна обробка (МРО), що ґрунтується на використанні енергії електромагнітного поля певної частоти для впливу на кристалічну структуру металевих матеріалів. На відміну від традиційних методів термічної та хіміко-термічної обробки, МРО відзначається низькими енергетичними витратами, відсутністю небезпечних хімічних реагентів та можливістю локального впливу на визначені ділянки деталей [1-4].

Незважаючи на значний науковий та практичний інтерес до МРО, механізми структурних змін та закономірності формування фізико-механічних властивостей поверхневих шарів при магнітно-резонансних

впливах вивчені недостатньо. Відсутні комплексні дослідження взаємозв'язку між режимами МРО та експлуатаційними характеристиками деталей машин, що обмежує широке впровадження даної технології у промисловості.

Метою даної роботи є комплексне дослідження впливу параметрів магніто-резонансної обробки на мікроструктуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості металевих матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей машин, а також розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації режимів МРО для підвищення їхнього ресурсу в різних умовах експлуатації.

Аналіз літературних джерел показав недостатню вивченість механізмів впливу МРО на структуру та властивості матеріалів деталей машин, що обумовлює необхідність проведення комплексних досліджень у цьому напрямку.

Для проведення експериментальних досліджень були обрані металеві матеріали, що широко використовуються у машинобудуванні для виготовлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного зношування: конструкційна вуглецева сталь 45 (0,45% С) у нормалізованому стані; легована конструкційна сталь 40Х (0,4% С, 1% Cr) після поліпшення; інструментальна сталь Р6М5 (0,85% С, 6% W, 5% Mo) після стандартної термічної обробки; титановий сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V); алюмінієвий сплав Д16Т.

Хімічний склад матеріалів перевірявся методом оптично-емісійної спектроскопії на приладі ARL 3460 OES. Зразки для досліджень мали форму дисків діаметром 50 мм і товщиною 10 мм. Перед магніто-резонансною обробкою всі зразки піддавалися механічній шліфовці та поліруванню до шорсткості  $Ra = 0,32$  мкм.

Для проведення МРО була розроблена експериментальна установка, що складається з генератора електромагнітних коливань з регульованою частотою (0,1-1000 кГц), системи індукторів, блоку контролю та керування параметрами обробки

МРО зразків проводилася за наступними режимами: частота електромагнітного поля: 35, 78, 143, 285 та 520 кГц; напруженість магнітного поля: 40, 80, 120 та 160 кА/м; тривалість обробки: 30, 60, 120 та 240 с; температура зразків під час обробки контролювалася за допомогою термопар і не перевищувала 80°C.

Для кожного режиму обробки було виготовлено по 5 зразків, що забезпечувало статистичну достовірність отриманих результатів.

Для дослідження змін структури та властивостей матеріалів після МРО застосовувався комплекс взаємодоповнюючих методів:

1. Металографічний аналіз мікроструктури проводився на оптичному мікроскопі Olympus GX51 при збільшеннях  $\times 100$ - $\times 1000$  після хімічного травлення зразків у відповідних реактивах.

2. Електронно-мікроскопічні дослідження виконувалися на скануючому електронному мікроскопі JEOL JSM-6390LV з мікроаналізатором EX-23000BU для вивчення топографії поверхні та розподілу хімічних елементів.

3. Трансмісійна електронна мікроскопія тонких фольг здійснювалася на приладі JEOL JEM-2100 при прискорюючій напрузі 200 кВ для дослідження дислокаційної структури та виявлення наноструктурних елементів.

4. Рентгеноструктурний аналіз проводився на дифрактометрі ДРОН-4 для визначення фазового складу, параметрів кристалічної ґратки та рівня залишкових напружень.

5. Вимірювання мікротвердості здійснювалося на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н за методикою згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007.

6. Випробування на зносостійкість проводилися на машині тертя СМЦ-2 за схемою "диск-колодка" в умовах сухого тертя та при змащуванні мастилом И-40А при навантаженні 200 Н і швидкості ковзання 0,5 м/с.

7. Корозійні випробування виконувалися згідно з ДСТУ ISO 9227:2015 у камері сольового туману при розпиленні 5% розчину NaCl за температури  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ .

8. Випробування на втомну міцність проводилися на установці МУИ-6000 при циклічному згині з симетричним циклом навантаження до накопичення  $10^7$  циклів або до руйнування зразка.

Для математичної обробки експериментальних даних застосовувалися методи математичної статистики та регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення Origin Pro 2023 та Statistica 13.0.

Металографічні дослідження показали, що МРО призводить до суттєвих змін мікроструктури досліджуваних матеріалів. Найбільш виражені зміни спостерігаються у поверхневому шарі глибиною до 200-250 мкм.

У сталях 45 та 40Х після МРО з частотою 143 кГц і напруженістю поля 120 кА/м протягом 120 с спостерігається подрібнення перлітних колоній та часткове розчинення цементитних пластин. Мікроструктура поверхневого шару характеризується більш високою дисперсністю у порівнянні з вихідним станом. У сталі Р6М5 виявлено перерозподіл та часткове розчинення вторинних карбідів.

Трансмісійна електронна мікроскопія показала, що під дією МРО в поверхневих шарах всіх досліджуваних сталей формується розвинена дислокаційна структура з підвищеною щільністю дислокацій, а також утворюються дрібнодисперсні (50-100 нм) виділення карбідних фаз.

У титановому сплаві ВТ6 після МРО спостерігається перерозподіл фаз  $\alpha$  та  $\beta$  з формуванням більш дисперсної структури. У алюмінієвому сплаві Д16Т відбувається зміна морфології та розподілу зміцнюючих включень.

Рентгеноструктурний аналіз зразків до та після МРО виявив зміни параметрів кристалічної ґратки та ширини дифракційних ліній, що свідчить



про зростання рівня мікрореформацій кристалічної ґратки та зменшення розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) (табл. 1).

Таблиця 1. Зміна параметрів кристалічної ґратки та розмірів ОКР матеріалів після МРО

Матеріал	Параметр ґратки, нм		Розмір ОКР, нм		Мікрореформації, %	
	Вихідний	Після МРО	Вихідний	Після МРО	Вихідний	Після МРО
Сталь 45	0,28664	0,28678	95	48	0,12	0,27
Сталь 40Х	0,28671	0,28683	87	42	0,15	0,31
Сталь Р6М5	0,28725	0,28736	65	35	0,21	0,38
ВТ6 (α-фаза)	0,29235	0,29247	110	72	0,08	0,19
Д16Т	0,40496	0,40503	125	98	0,06	0,13

Встановлено, що оптимальними режимами МРО з точки зору формування найбільш дисперсної мікроструктури є: для сталей – частота 140-150 кГц, напруженість поля 110-130 кА/м, тривалість 100-120 с; для титанового сплаву – частота 280-300 кГц, напруженість поля 80-100 кА/м, тривалість 60-90 с; для алюмінієвого сплаву – частота 70-80 кГц, напруженість поля 50-70 кА/м, тривалість 40-60 с.

Дослідження мікротвердості показали, що МРО призводить до значного підвищення цього показника у всіх досліджуваних матеріалах (рис. 4). Найбільший ефект зміцнення спостерігається у сталі 45 та сталі 40Х, для яких приріст мікротвердості становить 25-32% у порівнянні з вихідним станом.

Встановлено, що залежність мікротвердості від параметрів МРО має нелінійний характер. При збільшенні частоти електромагнітного поля від 35 до 143 кГц мікротвердість зростає, а подальше підвищення частоти до 520 кГц призводить до зниження ефекту зміцнення. Аналогічна тенденція спостерігається і для впливу напруженості магнітного поля та тривалості обробки.

Вимірювання розподілу мікротвердості по глибині від поверхні показало, що максимальний ефект зміцнення досягається у поверхневому шарі товщиною 150-200 мкм з поступовим зниженням до рівня вихідного матеріалу на глибині 400-500 мкм.

Рентгеноструктурний аналіз показав, що у поверхневих шарах всіх досліджуваних матеріалів після МРО формуються залишкові напруження стиснення величиною від -200 до -450 МПа залежно від матеріалу та режимів обробки. Найвищий рівень залишкових напружень стиснення спостерігається у сталі Р6М5 (-430...-450 МПа), найнижчий – у сплаві Д16Т (-180...-220 МПа).

Результати трибологічних випробувань (рис. 6) показали, що МРО призводить до значного підвищення зносостійкості всіх досліджуваних матеріалів. Найбільший ефект спостерігається для сталей 45 та 40Х, де інтенсивність зношування після МРО при оптимальних режимах знижується в 1,8-2,3 рази у порівнянні з вихідним станом.

Дослідження поверхонь тертя методами електронної мікроскопії показало, що підвищення зносостійкості після МРО пов'язане зі зміною

механізмів зношування. Після МРО обробки спостерігається переважно окислювальний механізм зношування з формуванням тонких захисних оксидних плівок на поверхні тертя.

Встановлено, що ефект підвищення зносостійкості після МРО особливо виражений при підвищених навантаженнях (300-400 Н) та швидкостях ковзання (1,0-1,5 м/с), коли інтенсивність зношування зразків у вихідному стані різко зростає, тоді як оброблені зразки демонструють більш стабільну поведінку.

Результати корозійних випробувань показали, що МРО при оптимальних режимах призводить до підвищення корозійної стійкості досліджуваних матеріалів на 15-30% залежно від типу матеріалу.

Найбільший ефект підвищення корозійної стійкості спостерігається для сталей 45 та 40Х, найменший – для алюмінієвого сплаву Д16Т. Підвищення корозійної стійкості після МРО пов'язане з формуванням більш щільних та однорідних оксидних плівок на поверхні матеріалів, а також зі зниженням рівня поверхневих дефектів, які можуть слугувати центрами зародження корозійних осередків.

Випробування на втомну міцність показали, що МРО призводить до підвищення межі витривалості всіх досліджуваних матеріалів на 18-40% (табл. 2).

Таблиця 2. Вплив МРО на межу витривалості досліджуваних матеріалів

Матеріал	Межа витривалості $\sigma-1$ , МПа		Приріст, %
	Вихідний стан	Після МРО	
Сталь 45	270	378	40
Сталь 40Х	360	486	35
Сталь Р6М5	580	731	26
ВТ6	450	540	20
Д16Т	130	153	18

Підвищення втомної міцності після МРО пов'язане з формуванням залишкових напружень стиснення у поверхневих шарах, подрібненням мікроструктури та створенням більш високої щільності дислокацій, що ускладнює зародження та розповсюдження втомних тріщин.

На основі експериментальних даних розроблено регресійну модель, що описує залежність основних експлуатаційних характеристик матеріалів від параметрів МРО:

$$Y = a_0 + a_1 f + a_2 H + a_3 t + a_4 f^2 + a_5 H^2 + a_6 t^2 + a_7 fH + a_8 ft + a_9 HT$$

де:  $Y$  – параметр, що характеризує властивість матеріалу (мікротвердість, зносостійкість тощо);  $f$  – частота електромагнітного поля, кГц;  $H$  – напруженість магнітного поля, кА/м;  $t$  – тривалість обробки, с;  $a_0, a_1, \dots, a_9$  – коефіцієнти регресії.

Коефіцієнти регресії для кожного матеріалу та кожної властивості визначалися методом найменших квадратів з використанням експериментальних даних. Перевірка адекватності моделі показала, що вона

дозволяє прогнозувати зміну властивостей матеріалів з точністю до 8-12% в залежності від типу матеріалу та властивості.

На основі розробленої моделі створено комп'ютерну програму для оптимізації режимів МРО з метою досягнення максимальних значень необхідних експлуатаційних характеристик деталей машин. На основі проведених досліджень розроблено технологічні рекомендації щодо застосування МРО для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин: для деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування (зубчасті колеса, вали, осі), рекомендується використовувати наступні режими МРО: для сталей 45 та 40Х:  $f = 140-145$  кГц,  $H = 120-130$  кА/м,  $t = 110-120$  с; для сталі Р6М5:  $f = 130-135$  кГц,  $H = 140-150$  кА/м,  $t = 90-100$  с.; для деталей, що працюють в умовах фретинг-корозії (посадочні поверхні підшипників, шліцьові з'єднання), оптимальними є режими: для сталей:  $f = 120-130$  кГц,  $H = 100-110$  кА/м,  $t = 130-140$  с; для титанового сплаву ВТ6:  $f = 290-300$  кГц,  $H = 85-95$  кА/м,  $t = 70-80$  с.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Моделювання впливу магнітно-резонансної обробки матеріалів та її експериментальне підтвердження // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Технології в машинобудуванні : збірник наукових праць = *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Techniques in a machine industry : collection of scientific papers.* – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – № 2 (10). – С. 9–14. – DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2\(10\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2(10).02).

2. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Математичне моделювання магнітно-резонансної обробки матеріалів для машинобудування // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» ; відповідальний за випуск Єрошенко А. М. [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 1. – С. 137–139. – Режим доступу: [https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVmEM\\_AxquSi6b0q/view](https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVmEM_AxquSi6b0q/view).

3. Ковалевський С. В., Сидюк Д. М., Ковалевська О. С. Аспекти впровадження штучного інтелекту в технологічне забезпечення життєвого циклу виробів машинобудування // *Обробка матеріалів тиском.* – 2024. – № 1 (53). – С. 109–115. – DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)109](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)109).

4. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Коваленко О. М. Вплив широкосмугових мікроамплітудних вібрацій на процес штампуння // *Обробка матеріалів тиском.* – 2023. – № 1 (52). – С. 118–125. – DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)118](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)118).

5. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Управління властивостями матеріалів для подальшої оптимізації життєвих циклів виробів // *Збірник наукових праць НГУ.* – Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2022. – № 71. – С. 116–128. – DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.194>.

Ковалевський С.В., Сидюк Д.М., Ковалевська О.С. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Анотація:** У роботі розглянуто комплексний підхід до забезпечення ефективності життєвого циклу виробів машинобудування на всіх його етапах: проектування, виготовлення, експлуатації та утилізації. Визначено ключові проблеми, пов'язані з ресурсними втратами, відсутністю адаптивних систем управління та недостатнім рівнем технологічної спадковості. Запропоновано систему оптимізації життєвого циклу шляхом використання математичного моделювання, інтелектуальних систем керування, прогнозування ресурсу за допомогою нейромережесвих технологій та впровадження інноваційних методів зміцнення, зокрема магнітно-резонансної обробки. Обґрунтовано важливість інтеграції цифрових технологій у межах концепції Індустрії 4.0 та створення цифрових двійників для планування обслуговування і ремонту механізмів. Представлено аналітичні моделі, що враховують собівартість, надійність, безвідмовність та продуктивність, як основи прийняття управлінських рішень для оптимізації ЖЦ виробу.

**Ключові слова:** життєвий цикл виробу; технологічне забезпечення; оптимізація; індустрія 4.0; магнітно-резонансна обробка; цифровий двійник; прогнозування ресурсу; інтелектуальні системи.

**Abstract:** The paper presents a comprehensive approach to ensuring the efficiency of the life cycle of machine-building products across all its stages: design, manufacturing, operation, and disposal. Key issues such as resource losses, lack of adaptive control systems, and insufficient technological continuity are identified. A system for life cycle optimization is proposed through mathematical modeling, intelligent control systems, resource prediction using deep neural networks, and implementation of innovative strengthening methods, including magnetic resonance treatment. The importance of integrating digital technologies within the framework of Industry 4.0 and the creation of digital twins for maintenance and repair planning is substantiated. Analytical models are presented that take into account cost, reliability, fault tolerance, and productivity as the basis for decision-making in life cycle optimization.

**Keywords:** product life cycle; technological support; optimization; Industry 4.0; magnetic resonance treatment; digital twin; resource prediction; intelligent systems.

Сучасні умови експлуатації машинобудівних виробів вимагають не лише високої надійності, але й адаптивності до змінних навантажень, умов роботи та технологічних викликів, пов'язаних із екологічністю, енергоефективністю та економічною доцільністю. Життєвий цикл (ЖЦ) виробу в машинобудуванні охоплює послідовні етапи від концептуального проєктування до зняття з експлуатації, і на кожному з цих етапів

технологічне забезпечення відіграє ключову роль [1-3]. Успішне управління ЖЦ потребує системного підходу, який поєднує інструменти цифрового моделювання, діагностики, інтелектуального аналізу даних та високотехнологічної обробки.

Метою цієї роботи є формування концептуально-методичного підходу до забезпечення ефективності ЖЦ виробів машинобудування на основі інтеграції технологічних інновацій і цифрових методів управління ресурсом, надійністю та відновленням функціональних властивостей.

Дослідження базується на комплексному аналізі літературних джерел, моделюванні процесів старіння та зношування елементів машин у середовищах MATLAB, Ansys та SolidWorks, а також застосуванні методів спектрального аналізу, нейромережевої і генетичної оптимізації.

Для оцінки ефективності життєвого циклу використовувалась узагальнена модель:

$$E_{LCC} = \frac{P(t) \cdot R(t)}{C_{TOT}(t)},$$

де:  $E_{LCC}$  — ефективність життєвого циклу,  $P(t)$  — продуктивність у функції часу,  $R(t)$  — функція надійності (наприклад, експоненційна  $R(t) = e^{-\lambda t}$ ,  $C_{TOT}(t)$  — сукупна вартість володіння, включно з витратами на обслуговування, ремонт, енергію та заміну.

Інтеграція інноваційних технологій (наприклад, магнітно-резонансної обробки — МРО) у процесі експлуатації аналізувалась за допомогою моделей взаємодії між параметрами зовнішнього впливу та зміною фізико-механічних характеристик поверхневого шару.

#### **Результати дослідження.**

Побудовано цифрову модель виробу у середовищі Autodesk Inventor із подальшою генерацією цифрового двійника, що дозволило проводити віртуальне тестування змін конструкції. Результати показали, що включення етапів планово-попереджувального обслуговування на основі предиктивної діагностики зменшує сукупні витрати до 18%.

Магнітно-резонансна обробка поверхонь під час обслуговування дозволила збільшити опір зношуванню до 22% у контрольних зразках. Модель відновлення властивостей описувалась диференціальним рівнянням виду:

$$\frac{dH}{dt} = -k_1 H + k_2 M(t)$$

де:  $H$  — твердість або інша механічна характеристика поверхні,  $M(t)$  — функція магнітного впливу,  $k_1, k_2$  — константи регресії, визначені експериментально.

Нейромережеві моделі на базі рекурентної архітектури LSTM використовувалися для прогнозування залишкового ресурсу. Застосування генетичних алгоритмів дозволило мінімізувати вартість технічного обслуговування при заданому рівні надійності.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про доцільність інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного супроводу машинобудівного виробу. Поєднання традиційного інженерного підходу з цифровими інструментами дозволяє не лише підвищити довговічність, а й забезпечити адаптивність обслуговування на основі даних.

Окремої уваги заслуговує впровадження магнітно-резонансних технологій, які дозволяють проводити обробку поверхонь без демонтажу конструкцій, що відкриває нові горизонти для концепції zero-downtime maintenance.

## ВИСНОВКИ.

1. Життєвий цикл виробів машинобудування може бути суттєво подовжений завдяки цифровим інструментам контролю та інноваційним технологіям обробки.

2. Інтеграція цифрових двійників, предиктивної діагностики та магнітно-резонансної обробки є ключовими елементами технологічного забезпечення.

3. Застосування моделей оптимізації та нейромереж дозволяє забезпечити зменшення витрат на обслуговування без зниження показників надійності.

4. Отримані моделі можуть бути покладені в основу систем підтримки прийняття рішень у системах технічного сервісу промислових підприємств.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський С. В., Сидюк Д. М., Ковалевська О. С. Підходи до оптимізації життєвого циклу машинобудівних виробів з використанням штучного інтелекту // *Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу»*, (Херсон, Херсонський національний технічний університет, 17–19 вересня 2024 р.). – Херсон–Хмельницький, 2024. – С. 44–48.

2. Ковалевський С. В., Ковалевська О., Сидюк Д. Вплив магнітно-резонансної обробки на життєвий цикл виробів // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції*, 28–30 травня 2024 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ–Тернопіль : ДДМА, 2024. – С. 95–96.

3. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Модель оптимізації процесів життєвого циклу об'єктів машинобудування // *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції*. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – С. 68–71.

**Корендій В.М., Качур О.Ю., Пилип М.В., Карпин Р.Б.** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## **КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА КОНСТРУЮВАННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ БРАНДСПОЙТАМИ**

***Анотація:** Запропоновано конструкцію робота-маніпулятора з ангулярною кінематичною схемою для керування брандспойтами у системах пожежогашіння. Виконано кінематичний аналіз маніпулятора з п'ятьма ступенями вільності методом матричних перетворень, виведено рівняння руху схоплювача та представлено результати чисельного моделювання траєкторії руху у програмному продукті MathCad.*

***Ключові слова:** робот-маніпулятор; ангулярна кінематика; системи пожежогашіння; кінематичний аналіз; п'ять ступенів вільності; матричні перетворення;*

***Abstract:** A design of a robot-manipulator with an angular kinematic scheme for controlling fire monitors in firefighting systems is proposed. Kinematic analysis of the five-degree-of-freedom manipulator was performed using the matrix transformation method, the motion equations for the gripper were derived, and the results of numerical simulation of the motion trajectory using the MathCad software package are presented.*

***Keywords:** robotic manipulator; angular kinematics; fire extinguishing systems; kinematic analysis; five degrees of freedom; matrix transformations.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Пожежогашіння є однією з найнебезпечніших та фізично виснажливих професійних діяльностей, що вимагає від особового складу перебування в екстремальних умовах високих температур, задимлення, токсичних випарів та ризику обвалення конструкцій. Традиційне використання ручних або стаціонарних лафетних стволів (брандспойтів) для подачі води чи піни безпосередньо на осередок пожежі наражає пожежників на значні ризики для життя та здоров'я. Крім того, ефективність ручного керування брандспойтами може обмежуватися фізичними можливостями оператора, втомою та складністю точного наведення і утримання струменя в динамічних умовах пожежі, особливо при необхідності тривалої роботи або подачі великих об'ємів вогнегасних речовин.

Зменшення ризиків для особового складу, підвищення ефективності та точності гашіння пожеж, особливо у складних та великомасштабних сценаріях (на промислових об'єктах, складах, у тунелях, на нафтохімічних підприємствах), є критично важливим завданням. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є автоматизація процесу керування брандспойтами за допомогою роботизованих систем. Застосування роботів-маніпуляторів, здатних дистанційно або автономно керувати положенням та орієнтацією брандспойта, дозволяє вивести людину з небезпечної зони, забезпечити стабільне та точне наведення, а також потенційно інтегрувати

систему керування з давачами (тепловізорами, камерами тощо) для більш ефективного реагування на розвиток пожежі.

Розробка роботів-маніпуляторів є складною інженерною задачею, що вимагає глибокого аналізу кінематики для забезпечення необхідного робочого простору, маневреності та точності позиціонування брандспойта. Необхідно розробити та обґрунтувати кінематичну схему маніпулятора, провести аналіз його рухливості, визначити робочу зону та вирішити пряму та обернену задачі кінематики, що є основою для подальшого синтезу системи керування та конструювання механічної частини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема розробки ефективних роботизованих систем, зокрема маніпуляторів для специфічних завдань, таких як керування брандспойтами, вимагає глибокого опрацювання питань кінематичного аналізу, синтезу та оптимізації конструктивних параметрів машинобудівних конструкцій. Аналіз останніх наукових публікацій дозволяє визначити поточний стан досліджень у суміжних галузях та окреслити внесок даної роботи.

Важливі аспекти структурного та кінематичного аналізу маніпуляторів розглядаються у роботі [1]. Автори провели детальний аналіз маніпулятора пантографного типу з трьома ступенями вільності, включаючи визначення його робочої зони та аналітичний опис кінематики. Методики, представлені в цій роботі, є фундаментальними для розуміння взаємозв'язку між конструктивними параметрами та кінематичними можливостями маніпулятора, що є безпосередньо релевантним для першого етапу проектування маніпулятора для керування брандспойтом – вибору та аналізу кінематичної схеми. У дослідженні [2] автори аналізують кінематичні характеристики маніпулятора типу SCARA, встановленого на мобільній гусеничній платформі. Ця робота показує підходи до аналізу кінематики іншого поширеного типу маніпуляторів та розглядає аспекти інтеграції маніпуляційної системи з мобільною базою. Хоча маніпулятор типу SCARA може мати обмеження для застосування у керуванні брандспойтом через специфіку рухів, методи аналізу його кінематичних характеристик (робочої зони, швидкостей, точності) є корисними для порівняльного аналізу та вибору оптимальної структури для поставленої задачі.

Питання оптимізації конструктивних параметрів роботизованих систем з метою забезпечення ефективності та надійності роботи висвітлено у праці [3]. Автори зосереджуються на оптимізації параметрів маніпуляторів для виробничого середовища. Незважаючи на те, що умови експлуатації маніпулятора для брандспойта суттєво відрізняються від типового виробничого середовища (високі температури, вологість, динамічні навантаження від реакції струменя), підходи до оптимізації конструкції з точки зору досягнення необхідних показників продуктивності та безвідмовності є важливими і можуть бути адаптовані для специфічних вимог пожежогасіння. Зокрема, критерії оптимізації мають враховувати



максимальний виліт, вантажопідйомність (здатність утримувати брандспойт під тиском) та точність позиціонування. Робота [4] присвячена розробленню та дослідженню специфічних кінцевих виконавчих пристроїв – схоплювачів для маніпулювання кільцеподібними деталями. Хоча безпосередньо задача керування брандспойтом не передбачає захоплення об'єктів у класичному розумінні, ця публікація демонструє методику проектування та дослідження функціональних елементів маніпулятора, що відповідають за взаємодію з об'єктом (у нашому випадку – брандспойтом). Підходи до конструювання та аналізу вузла кріплення та орієнтації брандспойта можуть базуватися на подібних інженерних принципах.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Аналіз наведених публікацій [1-4] свідчить про наявність напрацювань у сфері структурного та кінематичного аналізу різних типів маніпуляторів [1, 2], оптимізації їхніх параметрів [3] та конструювання виконавчих елементів [4]. Запропоновані методики аналізу кінематики та підходи до оптимізації є цінним підґрунтям для розробки маніпулятора для керування брандспойтами. Однак, незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі робототехніки, комплексне завдання, що поєднує детальний кінематичний аналіз (включаючи розв'язання прямої та оберненої задач кінематики, аналіз робочої зони та сингулярностей) та обґрунтування конструктивних параметрів маніпулятора, спеціально призначеного для керування брандспойтом з урахуванням специфіки його робочого середовища та функціональних вимог (великий робочий простір, необхідність точного наведення та утримання при значних реактивних силах), залишається недостатньо розкритим у доступній літературі.

**Цілі статті та постановка задачі.** Основною метою даної статті є проведення поглибленого кінематичного аналізу та розробки конструктивного рішення для робота-маніпулятора, адаптованого до задачі керування брандспойтами. Серед задач роботи слід виділити формування кінематичної та розрахункової схем маніпулятора, виведення законів руху ланок, математичне моделювання руху схоплювача, а також розроблення й аналіз конструктивного виконання робота-маніпулятора.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Загальний вигляд промислового робота-маніпулятора, розробленого у межах виконання даного дослідження, зображено на рис. 1. Робот має шарнірно-важільну конструкцію з ангулярною кінематичною схемою. Це означає, що всі його рухомі з'єднання є обертальними, забезпечуючи високу маневреність та гнучкість у робочій зоні. Робот може бути як стаціонарним, за умови кріплення основи 1 безпосередньо до фундаменту приміщення або опорної колони, так і мобільним, коли основа 1 монтується на мобільній (колісній чи гусеничній) платформі. Основні елементи конструкції робота є наступними.

**Плита (1)** слугує основою для кріплення всієї конструкції маніпулятора. Вона забезпечує стійкість та нерухомість робота під час

виконання технологічних операцій. **Привід горизонтального обертання маніпулятора (2)** містить електродвигун (8) із черв'ячною передачею (11), що забезпечує обертання маніпулятора навколо вертикальної осі. Плече (3) – перша ланка маніпулятора, що з'єднується з плитою приводу горизонтального обертання (2) через обертальну кінематичну пару, кутове положення якої відносно горизонту регулюється електроприводом лінійного переміщення (15). Лікоть (4) – друга ланка маніпулятора, що з'єднується з плечем (3) через обертальну кінематичну пару. Кутове положення ліктя (4) відносно плеча (3) керується електроприводом лінійного переміщення (16). Передпліччя (5) – третя ланка маніпулятора, що з'єднується з ліктем (4) та має можливість обертатися навколо його поздовжньої осі за рахунок електродвигуна 9 та поворотного механізму 12. Зап'ястя (6) з'єднується із передпліччям (5) через обертальну кінематичну пару (підшипники (14)), а його кутове положення відносно передпліччям (5) регулюється електродвигуном (10) через зубчато-пасову передачу (13). У запропонованій конструкції промислового робота-маніпулятора зап'ястя (6) має шість ступенів вільності, забезпечуючи довільну орієнтацію схоплювача (7) в просторі. Схоплювач (7) – пристрій для захоплення та утримання об'єктів маніпулювання. У магістерській кваліфікаційній роботі для переміщення циліндричних заготовок масою до 10 кг запропоновано використовувати механічний схоплювач (7) хваткового типу з двома притискними пальцями (губками).

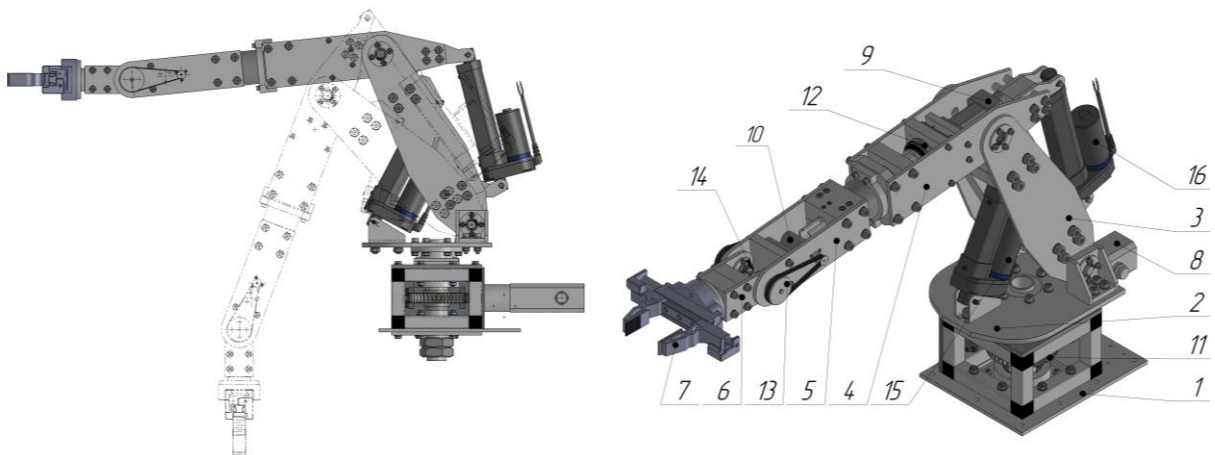


Рисунок 1. Загальний вигляд розробленого робота-маніпулятора

Основними рухами робота-маніпулятора є наступні: 1. Обертання навколо вертикальної осі: Загальне обертання маніпулятора здійснюється за допомогою електродвигуна (8) з черв'ячною передачею (11), розташованого в приводі горизонтального обертання (2). Це дозволяє роботу охоплювати широку робочу зону навколо себе. 2. Рух плеча: Електропривод лінійного переміщення (15) регулює кутове положення плеча (3) відносно горизонту. Це дозволяє піднімати та опускати плече, змінюючи висоту та частково дальність досяжності маніпулятора. 3. Рух ліктя: Електропривод лінійного

переміщення (16) керує кутовим положенням ліктя (4) відносно плеча (3). Це дозволяє згинати та розгинати «руку» робота, змінюючи його виліт та конфігурацію. 4. Обертання передпліччя: Електродвигун (9) з поворотним механізмом (12) забезпечує обертання передпліччя (5) навколо його поздовжньої осі. Це дозволяє маніпулятору «скручувати» зап'ястя та схоплювач, забезпечуючи додаткову гнучкість при маніпуляціях з об'єктами. 5. Рух зап'ястя: Електродвигун (10) із зубчато-пасовою передачею (13) регулює кутове положення зап'ястя (6) відносно передпліччя (5). Завдяки п'яти ступеням вільності, робот може довільно орієнтувати схоплювач (7) в просторі, що дозволяє йому виконувати складні маніпуляції з об'єктами.

На рис. 2 представлена кінематична схема маніпулятора з п'ятьма ступенями вільності, яка відповідає запропонованій конструкції промислового робота, зображеного на рис. 1. Аналізуючи схему, можна виділити наступні ключові компоненти та їх характеристики: **1. Ланки.** Ланка 1 ( $OA$ ): поворотна ланка, яка є базою маніпулятора. Ланка 2 ( $AB$ ): плече маніпулятора, з'єднане з базою обертальною кінематичною парою в точці  $A$ . Ланка 3 ( $BC$ ): передпліччя, з'єднане з плечем обертальною кінематичною парою в точці  $B$ . Ланка 4 ( $CD$ ): зап'ястя, з'єднане з передпліччям обертальною кінематичною парою в точці  $C$ . Ланка 5 ( $DE$ ): схоплювач, з'єднаний із зап'ястям обертальною кінематичною парою в точці  $D$ . **2. Кінематичні пари.** Всі кінематичні пари в даній кінематичній схемі є обертальними, що забезпечує маніпулятору високу маневреність та гнучкість. **3. Узагальнені координати:**  $\varphi_0$  – кут повороту ланки 1 (опорної платформи) відносно базової системи координат;  $\varphi_1$  – кут повороту ланки 2 (плеча) відносно ланки 1 (опорної платформи);  $\varphi_2$  – кут повороту ланки 3 (передпліччя) відносно ланки 2 (плеча);  $\varphi_3$  – кут повороту ланки 4 (зап'ястя) відносно ланки 3 (передпліччя);  $\varphi_4$  – кут повороту ланки 5 (схоплювача) відносно ланки 4 (зап'ястя). **4. Системи координат.** В межах методу матричних перетворень для кожної ланки вводиться локальна система координат. На рис. 2 зображено такі системи координат:  $x_0y_0z_0$  – базова система координат, нерухомо зв'язана з основою ланки 1 (підп'ятником  $O$ );  $x_1y_1z_1$  – локальна система координат, жорстко зв'язана з ланкою 2 (плечем) у шарнірі  $A$ ;  $x_2y_2z_2$  – локальна система координат, жорстко зв'язана з ланкою 3 (передпліччям) у шарнірі  $B$ ;  $x_3y_3z_3$  – локальна система координат, жорстко зв'язана з ланкою 4 (зап'ястям) у шарнірі  $C$ ;  $x_4y_4z_4$  – локальна система координат, жорстко зв'язана з ланкою 5 (схоплювачем) у шарнірі  $D$ ;  $x_5y_5z_5$  – додаткова система координат, жорстко зв'язана з кінцем схоплювача (точкою  $E$ ). **5. Геометричні параметри.** На схемі позначені геометричні параметри маніпулятора:  $l_{OA}$  – горизонтальна відстань від основи  $O$  до шарніру  $A$ ;  $h_{OA}$  – вертикальна відстань від основи  $O$  до шарніру  $A$ ;  $l_{AB}$  – довжина ланки 2 (плеча);  $l_{BC}$  – довжина ланки 3 (передпліччя);  $l_{CD}$  – довжина ланки 4 (зап'ястя);  $l_{DE}$  – довжина ланки 5 (схоплювача).

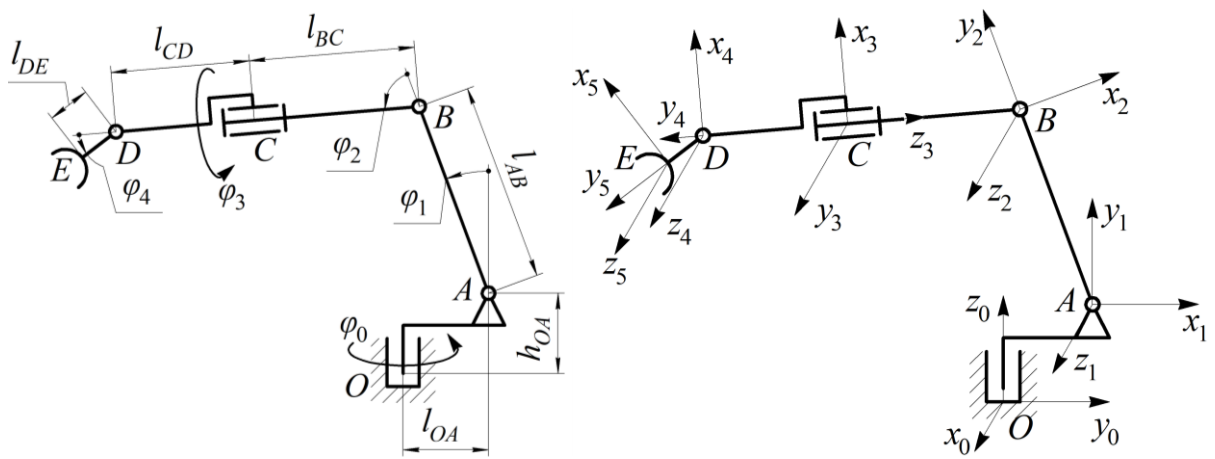


Рисунок 2. Кінематична та розрахункова схеми розробленого маніпулятора

Для виконання кінематичного аналізу даного маніпулятора використано метод матричних перетворень, в якому визначалися матриці перетворення координат між сусідніми системами координат. Зважаючи на доволі громіздкі вирази для розрахунку загальної матриці переходу між координатними системами «0» і «5», обмежимося представленням лише останнього стовпця відповідної матриці, який визначає координати кінця схоплювача (точки E) у базовій координатній системі «0» ( $x_0y_0z_0$ ):

$$x_E = \left( \begin{array}{l} l_{OA} - l_{AB} \cdot \sin \varphi_1 - (l_{BC} + l_{CD} + l_{DE} \cdot \cos \varphi_4) \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \\ - l_{DE} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ - l_{DE} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi_3); \end{array} \right) \cdot \cos \varphi_0 -$$

$$y_E = \left( \begin{array}{l} l_{OA} - l_{AB} \cdot \sin \varphi_1 - (l_{BC} + l_{CD} + l_{DE} \cdot \cos \varphi_4) \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \\ - l_{DE} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ - l_{DE} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \sin(\varphi_0 + \varphi_3); \end{array} \right) \cdot \sin \varphi_0 -$$

$$z_E = h_{OA} + l_{AB} \cdot \cos \varphi_1 + (l_{BC} + l_{CD} + l_{DE} \cdot \cos \varphi_4) \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2) -$$

$$- l_{DE} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \cos \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2).$$

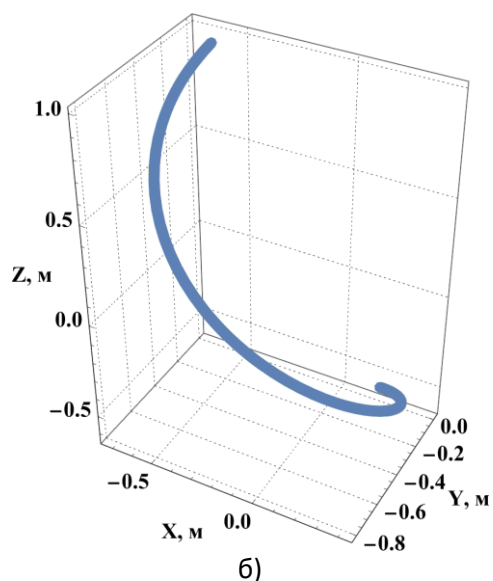
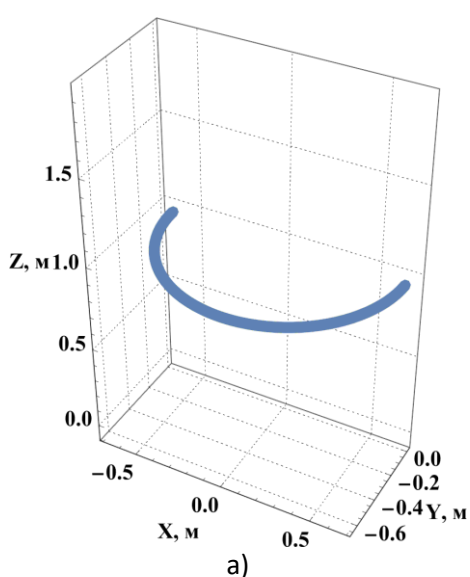
Підставляючи геометричні параметри ( $l_{OA}$ ,  $h_{OA}$ ,  $l_{AB}$ ,  $l_{BC}$ ,  $l_{CD}$ ,  $l_{DE}$ ) спроектованого робота-маніпулятора у виведені вище рівняння та задаючи параметри зміни відповідних узагальнених координат ( $\varphi_0$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ) можемо встановити траєкторію руху схоплювача в просторі та змодельовати його кінематичні характеристики. Геометричні параметри ланок схоплювача є наступними:  $l_{OA} = 0,182$  м,  $h_{OA} = 0,364$  м,  $l_{AB} = 0,581$  м,  $l_{BC} = 0,325$  м,  $l_{CD} = 0,273$  м,  $l_{DE} = 0,231$  м.

Для проведення чисельного моделювання та верифікації правильності виведених рівнянь руху схоплювача, розглянемо наступні кілька простих варіантів зміни узагальнених координат в часовому проміжку  $0 \dots 3$  с:

1) поворот маніпулятора навколо вертикальної осі (рис. 3(а)):  $\varphi_0 = 1,04 \cdot t$ ,  $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$ ,  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = 0$ ; 2) поворот маніпулятора навколо вертикальної осі та нахил плеча (рис. 3(б)):  $\varphi_0 = 1,04 \cdot t$ ,  $\varphi_1 = 0,36 \cdot t$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$ ,  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = 0$ ; 3) нахил плеча та видовження передпліччя (рис. 3(в)):  $\varphi_0 = 0$ ,  $\varphi_1 = 0,36 \cdot t$ ,  $\varphi_2 = \pi/2 - 0,36 \cdot t$ ,  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = 0$ ; 4) поворот маніпулятора навколо вертикальної осі, нахил плеча та видовження передпліччя (рис. 3(г)):  $\varphi_0 = 1,04 \cdot t$ ,  $\varphi_1 = 0,36 \cdot t$ ,  $\varphi_2 = \pi/2 - 0,36 \cdot t$ ,  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = 0$ .

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У статті запропоновано конструкцію робота-маніпулятора ангулярного типу з п'ятьма ступенями вільності, призначеного для автоматизованого керування брандспойтами в системах пожежогасіння. Виконано кінематичний аналіз маніпулятора методом матричних перетворень, що дозволило отримати аналітичні залежності для визначення положення виконавчого органу (схоплювача). Проведено чисельне моделювання траєкторій його руху у середовищі MathCad, яке підтвердило коректність виведених рівнянь та продемонструвало кінематичні можливості розробленої конструкції.

Подальші роботи доцільно спрямувати на розв'язання оберненої задачі кінематики, необхідної для розробки системи керування маніпулятором. Важливим є проведення динамічного аналізу з урахуванням мас ланок, моментів інерції та реактивних сил від струменя брандспойта.



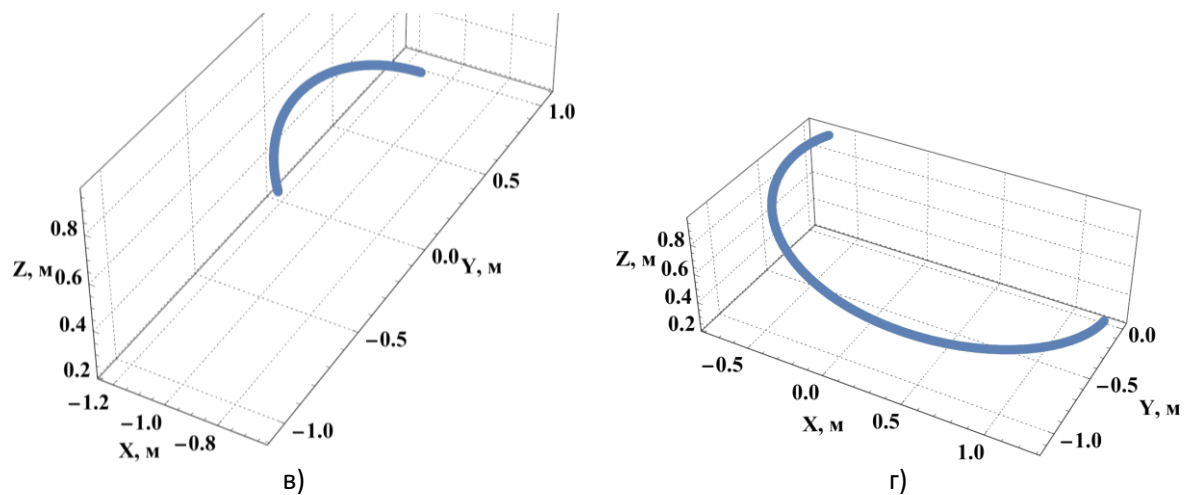


Рисунок 3. Результати чисельного моделювання руху схоплювача

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Korendiy V., Zinko R., Cherevko Y. Structural and kinematic analysis of pantograph-type manipulator with three degrees of freedom // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2019. – Vol. 5, No. 2. – P. 68–82. <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.02.068>
2. Korendiy V. et al. Analysis of kinematic characteristics of a mobile caterpillar robot with a SCARA-type manipulator // *Transport Technologies*. – 2023. – Vol. 4, No. 2. – P. 56–67. <https://doi.org/10.23939/tt2023.02.056>
3. Korendiy V. et al. Optimizing the structural parameters of the robotic system to ensure the efficiency and reliability of work in the production environment // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2024. – Vol. 3699. – P. 180–197. <https://ceur-ws.org/Vol-3699/paper13.pdf>
4. Корендій В.М., Качур О.Ю., Пилип М.В., Карпин Р.Б. Розроблення та дослідження зовнішніх і внутрішніх схоплювачів для міжопераційного переміщення кільцеподібних деталей // *Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 18-21 лютого 2025 року*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. – С. 70–73.

**Корендій В.М., Парашин О.Я., Янів О.М., Киричук В.В., Вільчинський Т.Р.,** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ПЛОСКИХ ВАЖІЛЬНИХ І ЗУБЧАСТИХ МЕХАНІЗМІВ У ПРИВОДАХ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

***Анотація:** Проаналізовано потенціал використання плоских важільних і зубчастих механізмів у приводах вібраційних технологічних машин. На прикладах планетарних та здвоєних кривошипно-повзунних механізмів продемонстровано можливість генерування різноманітних керованих траєкторій руху робочого органу (багатокутних, прямолінійних, колових та еліптичних) шляхом зміни параметрів відповідного механізму віброзбудника та коливної системи вібромашини.*

***Ключові слова:** вібраційна технологічна машина; плоский важільний механізм; зубчастий механізм; планетарний механізм; здвоєний кривошипно-повзунний механізм.*

***Abstract:** The potential for using planar linkages and gear mechanisms in drives of vibratory technological machines is analyzed. Based on examples of planetary and twin crank-slider mechanisms, the capability to generate various controllable motion trajectories of the working member (polygonal, rectilinear, circular, and elliptical) is demonstrated by adjusting the parameters of the corresponding vibration excitation mechanism and the oscillatory system of the vibratory machine.*

***Keywords:** vibratory technological machine; planar linkage mechanism; gear mechanism; planetary mechanism; double slider-crank mechanism.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Вібраційні технологічні машини (ВТМ) знайшли широке застосування у різних галузях промисловості, таких як гірничодобувна, будівельна, хімічна, харчова, сільськогосподарська та інші. Вони використовуються для виконання різноманітних технологічних операцій: транспортування, сепарації, ущільнення, зневоднення, подрібнення, змішування тощо. Ефективність, надійність та якість виконання цих операцій значною мірою залежать від параметрів вібраційного руху робочого органу машини, які, у свою чергу, визначаються конструкцією та характеристиками її приводу. Традиційно у ВТМ використовуються приводи різних типів: ексцентрикові (кривошипно-шатунні), інерційні (вібратори спрямованої дії, дебалансні), електромагнітні, гідравлічні, пневматичні. Кожен з цих типів приводів має свої переваги та недоліки щодо можливості забезпечення необхідних кінематичних та динамічних характеристик, діапазону регулювання параметрів вібрації (частоти, амплітуди, форми траєкторії), енергоефективності, складності конструкції, вартості та надійності. Зокрема, для багатьох технологічних процесів потрібні складні закони руху робочих органів або можливість їх

оперативного регулювання, що не завжди легко реалізувати за допомогою традиційних приводів.

Водночас, плоскі важільні й зубчасті механізми (ПВЗМ), які є одним із найпоширеніших класів механізмів у машинобудуванні завдяки своїй здатності до складного перетворення обертового руху у поступальний або коливальний за різними законами, розглядаються як приводи ВТМ значно рідше. ПВЗМ потенційно можуть забезпечити: реалізацію складних траєкторій руху точок робочого органу; отримання необхідних кінематичних та динамічних характеристик (наприклад, асиметричних законів руху); відносну простоту конструкції та виготовлення; можливість інтеграції з різними типами двигунів. Однак, незважаючи на значний теоретичний доробок у галузі теорії механізмів і машин та вібраційної техніки, питання систематичного аналізу можливостей та доцільності використання саме ПВЗМ як приводів вібраційних технологічних машин, оцінки їх переваг та недоліків у цьому конкретному застосуванні, а також розробки методичних підходів до їх синтезу для забезпечення заданих параметрів вібрації залишаються недостатньо вивченими.

Таким чином, існує актуальна науково-практична проблема, яка полягає у необхідності дослідження та аналізу потенціалу застосування плоских важільних й зубчастих механізмів у приводах вібраційних технологічних машин з метою розширення арсеналу приводних систем, підвищення ефективності вібраційних процесів та створення машин з покращеними або специфічними функціональними можливостями. Вирішення цієї проблеми потребує комплексного аналізу кінематичних та динамічних характеристик ПВЗМ при їх роботі у складі ВТМ, порівняння їх з традиційними приводами та визначення раціональних областей застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема розробки та вдосконалення приводів вібраційних технологічних машин є предметом постійної уваги дослідників. Особливий інтерес викликають механічні віброзбудники, зокрема ті, що використовують важільні й зубчасті механізми для перетворення обертального руху вала привідного двигуна у коливальний рух робочого органу машини або інерційного елемента віброзбудника. Аналіз останніх публікацій, зокрема робіт Корендія В. М. та співавторів, свідчить про активні дослідження у цьому напрямку, зосереджені на конкретних типах механізмів.

Значна увага приділена дослідженню інерційних віброзбудників планетарного типу. У роботах [1, 2] аналізується динамічна поведінка та можливості генерування різних траєкторій руху коливної системи, оснащеної асиметричним саморегульованим [1] та симетричним [2] планетарними віброзбудниками. Питання кінематичного аналізу й синтезу та обґрунтування геометричних параметрів таких механізмів для приводу інерційних віброзбудників розглянуті у [3]. Подальший розвиток цих досліджень представлено у [4], де проведено силовий аналіз планетарних



механізмів удосконалених віброзбудників. Дослідження, представлені в [1-4], демонструють потенціал планетарних схем для створення регульованих та ефективних вібраційних приводів різного технологічного обладнання.

Іншим напрямком досліджень є використання кривошипно-повзунних та кривошипно-шатунних механізмів у вібраційних приводах. У роботі [5] виконано динамічний аналіз тримасової вібраційної системи зі здвоєним кривошипно-повзунним механізмом збудження коливань. Силові та енергетичні характеристики здвоєного кривошипного механізму вдосконаленого віброзбудника проаналізовано у [6]. Важливим аспектом є задача синтезу таких механізмів: у [7] запропоновано методику синтезу кривошипно-повзунного механізму на основі бажаної траєкторії руху для застосування в інерційних віброзбудниках. Дослідження [5-7] обґрунтовують можливості використання класичних плоских важільних механізмів для реалізації специфічних динамічних та кінематичних характеристик робочих органів різноманітної вібраційної техніки. Оглядова робота [8] узагальнює нові концепції та конструкції інерційних віброзбудників для промислового вібраційного обладнання, систематизуючи результати, отримані в [1-7] та дослідженнях інших авторів у цій галузі.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Таким чином, аналіз останніх публікацій [1-8] свідчить про те, що на даний час активно проводяться дослідження можливостей застосування важільних і зубчастих механізмів у приводах ВТМ, які переважно зосереджені на конкретних типах – планетарних та кривошипно-повзунних (кривошипно-шатунних) механізмах та часто в контексті саме інерційних віброзбудників. Водночас, залишається відкритим питання щодо систематичного аналізу та порівняння ширшого кола плоских важільних механізмів (наприклад, шестиланкових, складніших чотириланкових, кулачково-важільних тощо), а також зубчастих диференціальних механізмів і хвильових передач стосовно їх потенційного застосування у приводах ВТМ різного призначення. Недостатньо висвітленим також залишається порівняльний аналіз різних типів ПВЗМ за критеріями можливості реалізації складних законів руху, енергоефективності, компактності, надійності та технологічності саме в контексті вібраційних машин. Це визначає необхідність проведення подальших досліджень, зокрема, представлених у даній статті, спрямованих на узагальнений аналіз можливостей використання плоских важільних і зубчастих механізмів у приводах вібраційних технологічних машин.

**Цілі статті та постановка задачі.** У даній публікації ставиться мета узагальнення й систематизації попередніх досліджень авторів у сфері аналізу й синтезу плоских важільних і зубчастих механізмів для їх ефективного використання у приводах віброзбудників різноманітного вібраційного технологічного обладнання. Основною локальною задачею є обґрунтування можливостей генерування необхідних з технологічної точки

зору траєкторій руху робочого органу, зокрема, прямолінійних, колових, еліптичних, трикутних, прямокутних та інших траєкторій довільної форми.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо одномасову вібраційну систему [2], здатну коливатися у двох взаємно перпендикулярних напрямках (Рис. 1). Система приводиться в рух внаслідок дії інерційних сил на тіла системи. Ці сили виникають, коли планетарна шестірня рухається у зовнішньому зачепленні із сонячною шестірнею або у внутрішньому зачепленні із коронною шестірнею (епіциклом). У розглянутих випадках відповідна сонячна або коронна шестірня нерухомо закріплена на коливному тілі (робочому органі вібраційної машини). Вал приводного двигуна розташований у шарнірі  $O$  і обертає водило  $OD$  за годинниковою стрілкою. Відстань  $AO$  дорівнює радіусу діляльного кола  $R_1$  відповідної нерухомої шестірні. Якщо радіус діляльного кола планетарної шестірні позначено як  $R_2$ , довжину  $l_{OD}$  водила  $OD$  можна визначити як  $l_{OD} = R_1 \pm R_2$ , де знак «плюс» використовується у випадку нерухомої сонячної шестірні, а знак «мінус» застосовується, коли коронна шестірня закріплена на коливному тілі. Маса коливного тіла дорівнює  $m_1$ , тоді як  $m_2$ ,  $m_3$  позначають маси планетарної шестірні та додаткового збурювального тіла, жорстко з'єднаного з планетарною шестірнею на відстані  $l_{DE} = R_3$  від шарніра  $D$ .

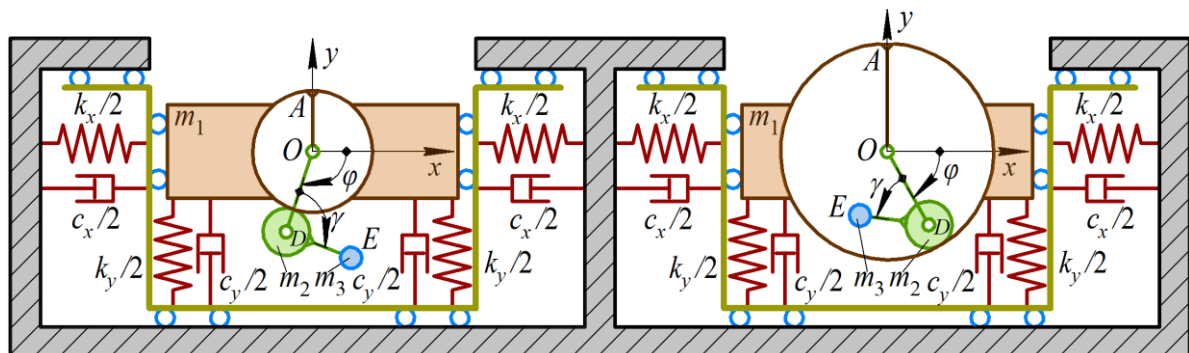


Рисунок 1. Схеми коливних систем із віброзбудниками, побудованими на базі планетарних механізмів

Коливне тіло, що здійснює періодичний плоско-паралельний рух, утримується системою горизонтальних та вертикальних пружно-демпфувальних елементів, які характеризуються відповідними коефіцієнтами жорсткості та демпфування  $k_x$ ,  $c_x$ ,  $k_y$ ,  $c_y$  [2]. Якщо обертання водила  $OD$  характеризується кутом  $\varphi$ , що відраховується за годинниковою стрілкою, то напрямок обертання планетарної шестірні та збурювального тіла навколо шарніра  $D$  залежить від типу віброзбудника: з нерухомою сонячною шестірнею або з нерухомою коронною шестірнею. Відповідні напрямки визначені на Рис. 1 кутом  $\gamma$ , який можна розрахувати за наступним виразом:  $\gamma = \gamma_0 + \varphi \cdot R_1 / R_2$ .

Розглянемо випадок усталених коливань вібраційної системи, оснащеної симетричним планетарним віброзбудником, в якому сонячна

шестірня є нерухомою ( $k = 1$ ) [2]. Вимушена частота є сталою:  $\omega = 157$  рад/с. Тому рух водила здійснюється за наступним законом:  $\varphi = \varphi_0 + \omega \cdot t$ . Для подальшого чисельного моделювання задано наступні вхідні параметри:  $\varphi_0 = 0$ ,  $\gamma_0 = 3,14$ ,  $m_1 = 30$  кг,  $R_1 = 0,088$  м,  $R_3 = 0,04$  м,  $k_x = k_y = 3 \cdot 10^6$  Н/м,  $c_x = c_y = 100$  (Н · с)/м. Маса  $m_2$ ,  $m_3$  та радіус  $R_2$  розглядаються як керовані параметри, що визначають траєкторії руху коливного тіла.

Результати чисельного моделювання (Рис. 2) представлені у вигляді траєкторій руху коливного тіла (робочого органу) за різних інерційних та геометричних параметрів планетарного вібробудника [2]. Наприклад, трикутна траєкторія коливань тіла отримана при:  $m_2 = 0,8$  кг,  $m_3 = 0,03$  кг,  $R_2 = 0,088$  м (Рис. 2(а)). Прямокутна траєкторія спостерігається при:  $m_2 = 1,1$  кг,  $m_3 = 0,08$  кг,  $R_2 = 0,044$  м (Рис. 2(б)). Шестикутна траєкторія побудована при:  $m_2 = 1,3$  кг,  $m_3 = 0,04$  кг,  $R_2 = 0,022$  м (Рис. 2(в)).

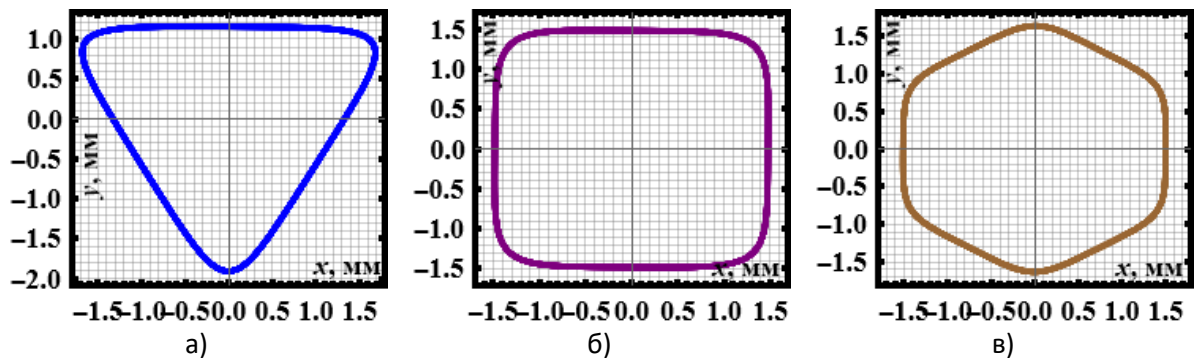


Рисунок 2. Багатокутні траєкторії руху, що здатні генеруватися робочим органом вібраційної машини з вібробудником планетарного типу

Розглянемо іншу коливну систему, що складається з трьох рухомих тіл, інерційні параметри яких характеризуються відповідними масами  $m_1$ ,  $m_2$  та  $m_3$  (див. Рис. 3) [5]. Робочий орган (транспортуючий лоток, грохот або сито) приводиться в коливальний рух завдяки обертанню кривошипа ОА, що забезпечує прямолінійні коливання мас  $m_2$  та  $m_3$  вздовж осей  $Ox_2$  та  $Ox_3$ , відповідно. Для обмеження кутових коливань маси  $m_1$  робочий орган пружно встановлений на рухомій платформі за допомогою незалежних вертикальних та горизонтальних пружно-демпфувальних елементів. Останні характеризуються коефіцієнтами жорсткості  $k_{1x}$ ,  $k_{1y}$  та коефіцієнтами демпфування  $c_{1x}$ ,  $c_{1y}$ , відповідно.

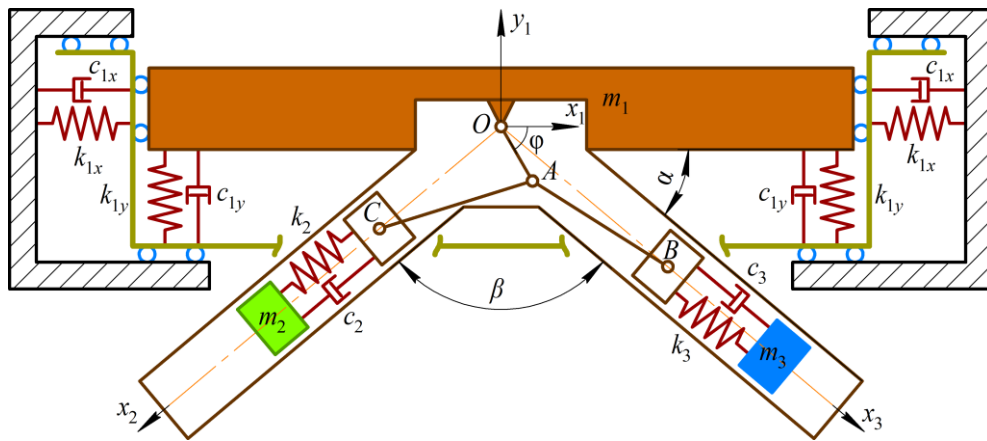
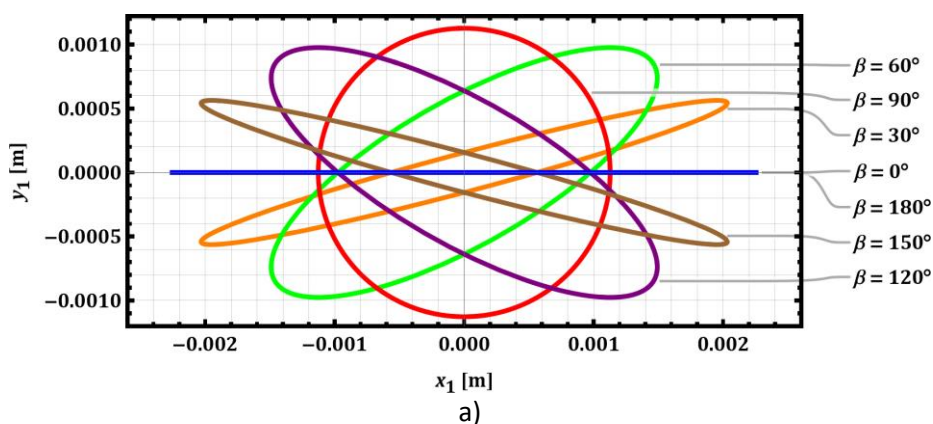


Рисунок 3. Схема коливної системи зі здвоєним кривошипно-шатунним вібробудником

Розглянута коливна система (див. Рис. 3) характеризується п'ятьма ступенями вільності. Прямолінійні рухи коливних мас  $m_2$  та  $m_3$  відносно робочого органа (маси  $m_1$ ) описуються відповідними координатами  $x_2$  та  $x_3$ . Відносний рух механізму вібробудження характеризується кутовим положенням  $\varphi$  кривошипа  $OA$  відносно горизонтальної осі  $Ox_1$ . Коливання робочого органа описуються відповідними горизонтальними та вертикальними переміщеннями  $x_1$  та  $y_1$ .

Виконуючи подальше чисельне моделювання руху коливної системи, прийемо наступні інерційні та геометричні параметри (Рис. 1):  $m_1 = 30$  кг,  $m_2 = 1$  кг,  $m_3 = 1$  кг,  $l_{OA} = 0,015$  м,  $l_{AB} = 0,08$  м,  $l_{AC} = 0,08$  м. Робочі параметри системи наступні:  $\omega = 104,7$  рад/с (тобто вал двигуна обертається з частотою 1000 об/хв),  $c_{1x} = 100$  (Н·с)/м,  $c_{1y} = 100$  (Н·с)/м,  $c_2 = 50$  (Н·с)/м,  $c_3 = 50$  (Н·с)/м,  $k_{1x} = 45400$  Н/м,  $k_{1y} = 45400$  Н/м,  $k_2 = 10800$  Н/м,  $k_3 = 10800$  Н/м. Кути  $\alpha$  та  $\beta$  розглядаються як основні параметри, вплив яких на кінематику та динаміку системи підлягає дослідженню. На Рис. 4 змодельовано траєкторії коливань робочого органа для різних значень  $\alpha$  та  $\beta$ :  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ$ ;  $\beta = 0 \dots 180^\circ$ .



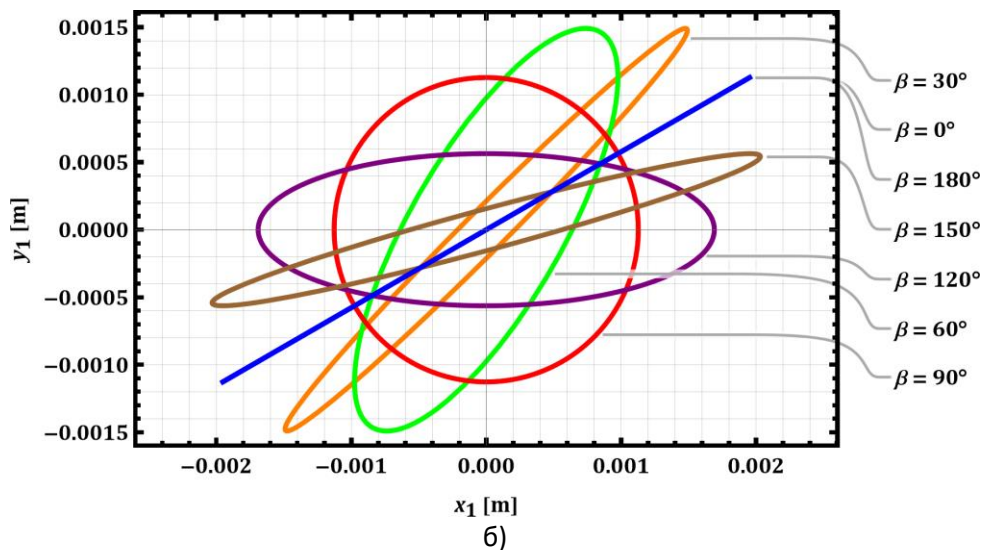


Рисунок 4. Колові, еліптичні й прямолінійні траєкторії руху, що здатні генеруватися робочим органом вібраційної машини зі здвоєним кривошипно-шатунним вібробудником

Змінюючи кут  $\beta$ , можна забезпечити прямолінійні, еліптичні та колові коливання робочого органа. Прямолінійні коливання відбуваються при  $\beta = 0^\circ$  та  $\beta = 180^\circ$ ; колові коливання – при  $\beta = 90^\circ$ . При всіх інших значеннях кута  $\beta$  забезпечуються еліптичні коливання робочого органа (див. Рис. 4). Зміна форми еліпса (фокусна відстань, ексцентриситет, відношення малої та великої півосей тощо) та відповідні параметри вібрації залежать від значення кута  $\beta$ . У випадку  $\alpha = 0^\circ$  (Рис. 4(а)), еліптичні траєкторії робочого органа, що забезпечують транспортування вантажів праворуч, мають місце в діапазоні  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ , тоді як транспортування ліворуч може бути забезпечене при  $90^\circ < \beta < 180^\circ$ . Щоб змінити напрямок прямолінійних коливань, необхідно збільшити кут  $\alpha$ . Наприклад, при  $\alpha = 30^\circ$  (Рис. 4(б)), прямолінійні коливання та великі півосі відповідних еліптичних траєкторій нахилені під кутом  $30^\circ$  проти годинникової стрілки відносно їхніх попередніх положень (при  $\alpha = 0^\circ$ ).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** На прикладі планетарного вібробудника показано можливість отримання багатокутних траєкторій руху шляхом відповідного підбору його інерційних та геометричних параметрів. Це відкриває можливості для створення вібраційних машин зі специфічними режимами руху робочого органу. Аналіз тримасової коливної системи зі здвоєним кривошипно-повзунним механізмом збудження довів можливість генерування прямолінійних, колових та еліптичних траєкторій коливань робочого органа. Встановлено, що шляхом зміни кутових параметрів механізму можна ефективно керувати формою еліптичних і прямолінійних траєкторій, їх орієнтацією у просторі та напрямком результуючого руху робочого органу вібробудника.

Перспективи подальших досліджень доцільно зосередити на таких напрямках: виведення аналітичних співвідношень для синтезу параметрів відповідних віброзбудників з метою забезпечення заданих траєкторій руху робочого органу; експериментальна верифікація результатів чисельного моделювання та дослідження працездатності розроблених приводних механізмів на лабораторних стендах та прототипах вібраційних машин.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Korendiy V. et al. *On the dynamic behavior of an asymmetric self-regulated planetary-type vibration exciter* // *Vibroengineering Procedia*. 2022. Vol. 42. P. 7–13. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22580>
2. Korendiy V. et al. *Generating various motion paths of single-mass vibratory system equipped with symmetric planetary-type vibration exciter* // *Vibroengineering Procedia*. 2022. Vol. 43. P. 7–13. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22703>
3. Korendiy V. et al. *Kinematic analysis and geometrical parameters justification of a planetary-type mechanism for actuating an inertial vibration exciter* // *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 52. P. 35–41. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23728>
4. Korendiy V. et al. *Force analysis of the planetary-type mechanisms of the enhanced vibration exciters* // *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 54. P. 28–34. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24029>
5. Korendiy V. et al. *Dynamic analysis of three-mass vibratory system with twin crank-slider excitation mechanism* // *Vibrations in Physical Systems*. 2023. Vol. 34, № 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2023.2.26>
6. Korendiy V. et al. *Analysis of the force and power characteristics of a twin crank-type mechanism of an enhanced vibration exciter* // *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. P. 1–7. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24116>
7. Korendiy V. et al. *Trajectory-based synthesis of a slider-crank mechanism for applications in inertial vibration exciters* // *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 56. P. 176–182. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24578>
8. Korendiy V. et al. *Novel concepts and designs of inertial vibration exciters for industrial vibratory equipment: A review* // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2024. Vol. 10, № 4. P. 17–33. <https://doi.org/10.23939/ujmems2024.04.017>

**Косарєв В.С., Бочковий Д.О., Солянов Д.О.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна)

## ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СУМІЩЕНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Анотація:** Метою даної роботи є дослідження технологічних режимів у процесі холодного штампування для деталі «Зубчатий стакан». Основними завданнями дослідження є визначення оптимальних параметрів штампування, а також розробка рекомендацій щодо покращення процесу виготовлення деталі з метою підвищення ефективності та якості продукції. Дослідження буде проведене у програмі DEFORM 2D/3D. Отримані в ході дослідження результати будуть використані для вдосконалення технологічного процесу штампування та підвищення якості виробництва.

**Ключові слова:** холодне штампування; зубчатий стакан; технологічні режими; оптимізація процесу; якість продукції; DEFORM 2D/3D; вдосконалення технології; моделювання процесів.

**Abstract:** The aim of this work is to investigate the technological modes in the cold stamping process for the "Gear Blank" part. The main objectives of the research are to determine the optimal stamping parameters and to develop recommendations for improving the manufacturing process of the part to enhance production efficiency and quality. The research will be conducted using the DEFORM 2D/3D program. The results obtained during the study will be utilized to enhance the technological stamping process and improve production quality.

**Keywords:** cold stamping; toothed cup; technological modes; process optimization; product quality; DEFORM 2D/3D; technology improvement; process modeling.

Видавлювання порожнистих деталей у холодному об'ємному штампуванні є важливою технологією в сучасній виробничій промисловості. Цей процес дозволяє отримати складні вироби зі зниженою вагою та збереженням високої міцності.

Нестача матеріалів, зростання вимог до легкості та міцності конструкцій, а також потреба в енергоефективних виробках стимулюють розвиток нових технологій видавлювання порожнистих деталей.

Оскільки використання порожнистої структури дозволяє знизити масу виробу, зберігаючи його стійкість та функціональні характеристики, особливого значення набувають перспективні способи видавлювання порожнистих деталей відповідального призначення.

Процеси холодного деформування характеризуються високими питомими і повними зусиллями на інструмент, що знижують його стійкість і стабільність процесу [1, 2]. Способи деформування, що спрямовані для зниження цих обмежень, передбачають створення більш сприятливих для силового режиму різнойменний схем напружено-деформованого стану, зменшення площі контакту активного деформуючого інструменту із заготовкою, зниження навантажень на інструмент за рахунок забезпечення

більшого ступеня свободи витікання металу або розвиненої радіальної течії (роздачі металу). Комбінування схем поздовжнього і радіального видавлювання може бути методом створення більш складних способів деформування, які можуть дозволити виготовити за одну операцію порожнисті і суцільні деталі з фланцями або відростками, або більш складних просторових конфігурацій. При цьому в залежності від типорозміру виробів і мети суміщення простих схем деформування можливе застосування того чи іншого поєднання простих схем видавлювання.

Одним з перспективних способів видавлювання порожнистих деталей є технологія гідроформування. Цей процес базується на застосуванні високого тиску гідравлічного середовища для формування деталі в спеціальних матрицях. Гідроформування дозволяє отримувати складні геометрії та високу точність деталей, забезпечуючи високу якість та продуктивність виробництва.

У результаті застосування перспективних способів видавлювання порожнистих деталей досягається значне зниження ваги виробів, покращення енергоефективності та збереження високої міцності. Ці технології використовуються в автомобільній, авіаційній, машинобудівній та інших галузях промисловості, де вимагаються високі стандарти безпеки, якості та ефективності.

У підсумку, перспективні способи видавлювання порожнистих деталей відповідального призначення відіграють важливу роль у сучасній промисловості. Вони дозволяють отримати вироби з оптимальним поєднанням легкості, міцності та функціональності, що сприяє розвитку енергоефективних та стійких конструкцій. Подальший розвиток та вдосконалення цих технологій має великий потенціал для сучасного виробництва та сприятиме досягненню нових вершин у виготовленні порожнистих деталей.

Метою даної роботи є дослідження технологічних режимів у процесі холодного штампування для деталі «Зубчатий стакан». Основними завданнями дослідження є визначення оптимальних параметрів штампування, а також розробка рекомендацій щодо покращення процесу виготовлення деталі з метою підвищення ефективності та якості продукції. Дослідження було проведене у програмі DEFORM 2D/3D. Отримані в ході дослідження результати будуть використані для вдосконалення технологічного процесу штампування та підвищення якості виробництва.

Для отримання деталі «Зубчатий стакан» був використаний матеріал А2017 (алюмінієвий сплав), який відзначається своєю високою міцністю та зносостійкістю. Для деталі «Зубчатий стакан» на (рис. 1а) представлено ескіз деталі, щоб отримати кінцеві розміри деталі треба заготовка (рис. 1б) з розмірами  $D = 60$  мм та  $h = 120$  мм, де  $D$  – діаметр заготовки,  $h$  – висота заготовки.

Розрахунки геометричних параметрів деталі були проведені з



використанням програмного забезпечення DEFORM 2D/3D, яке базується на методі скінченних елементів.

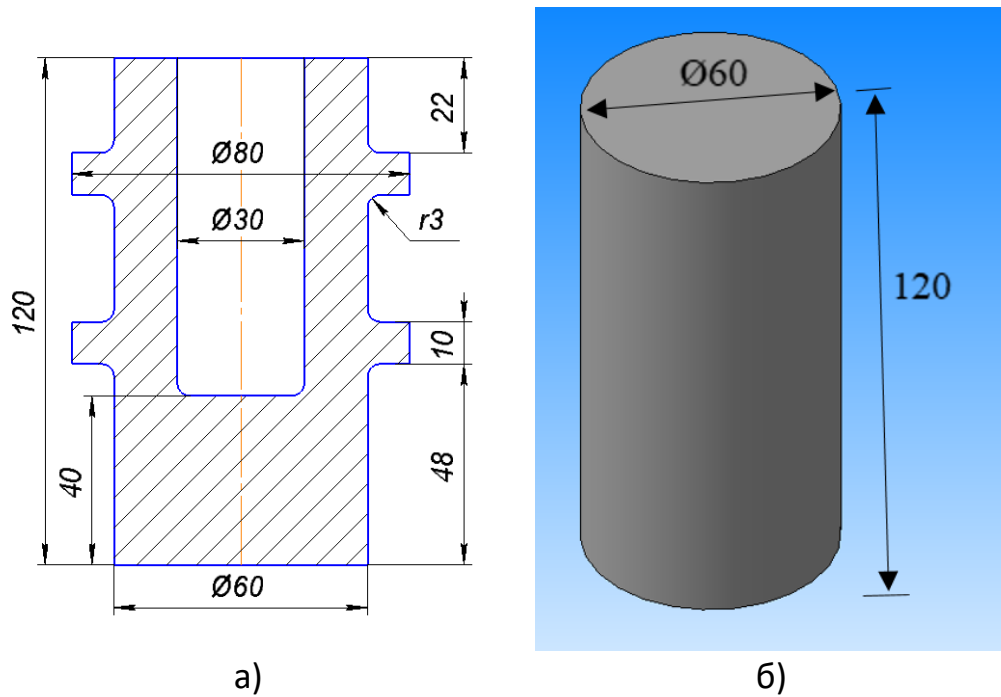
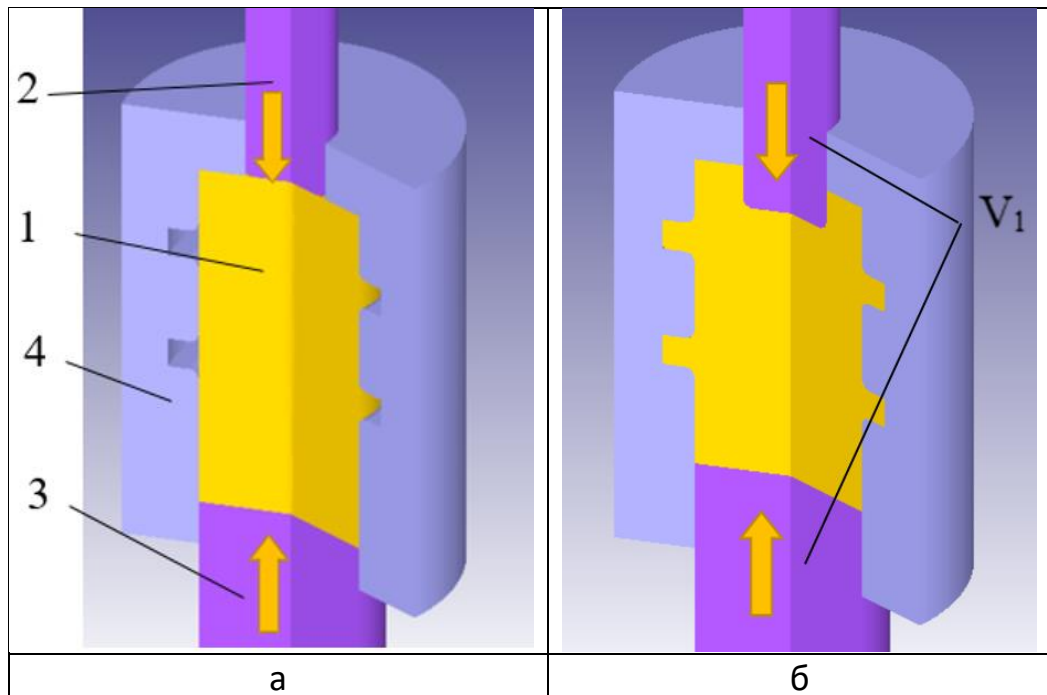


Рисунок 1 – Ескіз деталі (а), заготовка (б) для деталі «Стакан з фланцем»



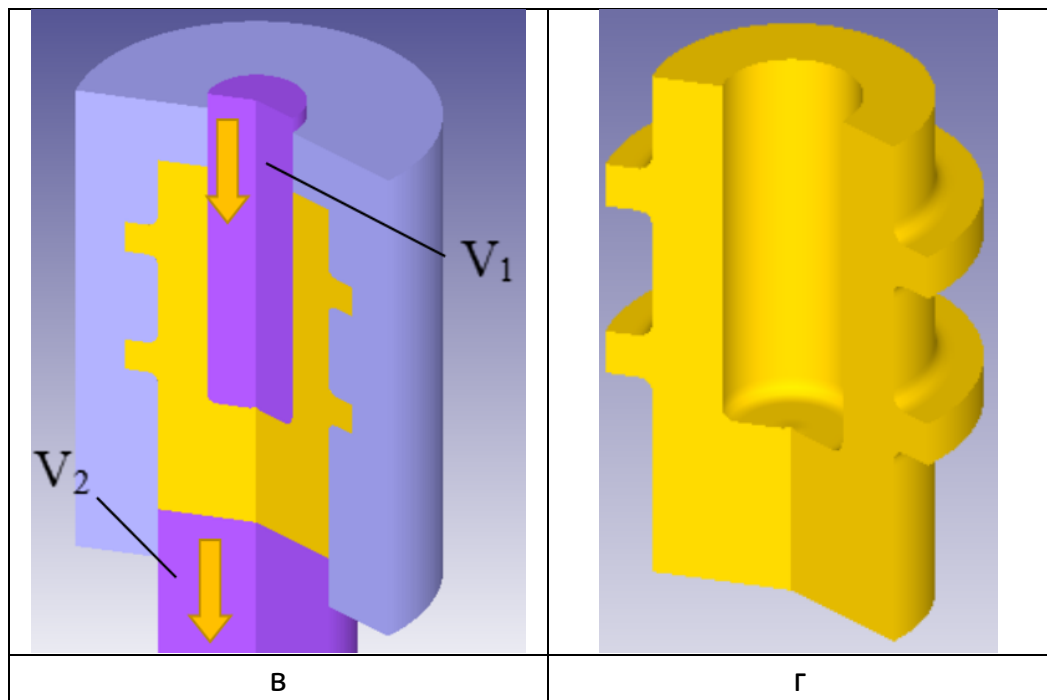


Рисунок 2 - Положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні: а – на початку видавлювання, б – на проміжній стадії видавлювання, в – в кінці видавлювання, г – після виштовхування виробу, де  $V_1 = 1 \text{ мм/с}$ ,  $V_2 = 0.2 \text{ мм/с}$ .

На (рис.2) зображені в розрізі розрахункові положення деформуючого інструменту при видавлюванні. Положення на початку видавлювання показане на (рис.2а). Вихідна заготовка 1 розміщена в матриці 4, в якій встановлений нижній пуансон 3, а деформування виконується верхнім пуансоном 2.

Деталь «Зубчатий стакан» можливо отримати за допомогою кінематичного методу. Двостороннього рухом верхнього та нижнього пуансона  $S = 13 \text{ мм}$  (рис.2б) отримаємо заповнення фланців.

При формуванні фланців використовується двосторонній рух верхнього пуансона 2 та нижнього пуансона 3 з однаковою швидкістю  $V_1 = 1 \text{ мм/с}$  (рис.2б). Ця техніка сприяє уникненню дефектів та затисків у фланцях, оскільки однорідний рух обох інструментів забезпечує рівномірний розподіл матеріалу під час процесу формування. Такий підхід дозволяє досягти високої якості фінального виробу і забезпечити відсутність небажаних дефектів в структурі та формі фланців.

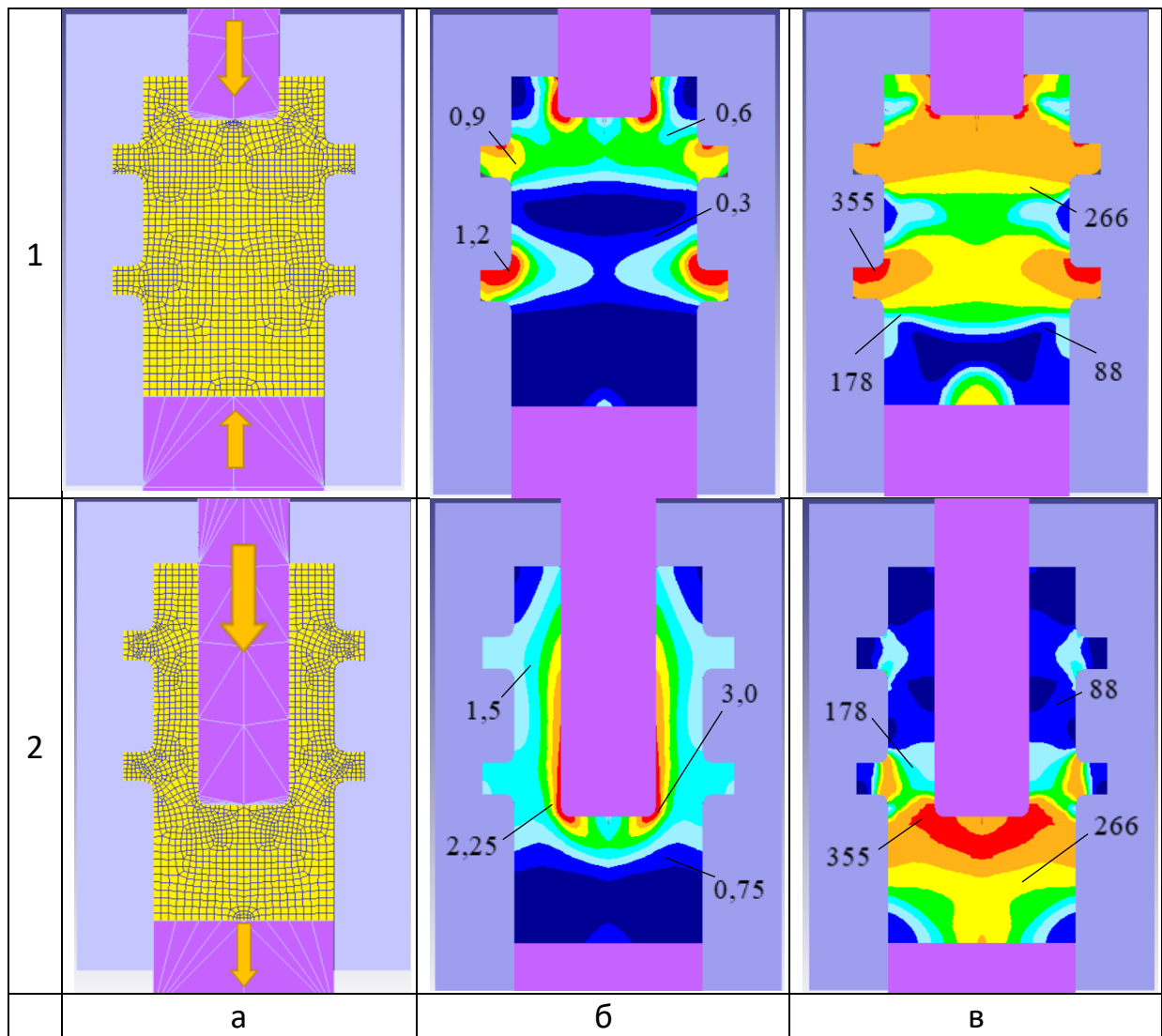


Рисунок 3 – Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (б), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в)

Для отримання структури типу стакан та отримання заданих параметрів результуючих в кінцевих розмірах деталі використовується односторонній рух з двома інструментами що рухаються, верхнього пуансона 2 з ходом  $S = 67$  мм та нижнього пуансона 3 з ходом  $S = 13$  мм та швидкістю  $V1 = 1$  мм/с та  $V2 = 0,2$  мм/с (рис.2в).

На (рис.3) аналізується викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (б), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в).

В ході процесу двостороннього руху верхнього пуансона 2 та нижнього пуансона 3 з однаковою швидкістю, можна спостерігати викривлення ділильної сітки та отримання фланцю (рис.3.1а). На останньому етапі даного переходу максимальне інтенсивності деформацій було  $\epsilon_i = 1,2$  (рис.3.1б) і максимальне інтенсивності напружень було  $\sigma_i = 355$  МПа (рис.3.1в).

В ході одностороннього руху з двома інструментами що рухаються

спостерігаємо викривлення ділильної сітки (рис.3.2а) та максимальне інтенсивності деформацій  $\epsilon_i = 3,0$  (рис.3.2б) і максимальне інтенсивності напружень було  $\sigma_i = 355$  МПа (рис.3.2в) на останньому етапі.

Ці данні свідчать, що розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  при двосторонньому русі менше, чим при односторонньому. Також, розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  прогресує лінійно і досягає однакових максимальних значень як при односторонньому так і двосторонньому русі. Також цей результат, згідно з рисунками (3.1б.в) та рисунками (3.2б.в) свідчить про те, що в області біля закруглення матриці при двосторонньому русі відбувається значна деформація матеріалу та при односторонньому біля пуансона.

Час формоутворення виробу при розглянутій швидкості деформування склав 80 секунд

### **ВИСНОВКИ.**

У дослідженні технологічних режимів холодного об'ємного штампування деталі «Зубчатий стакан» у програмі DEFORM 2D/3D визначено оптимальні параметри процесу. На основі отриманих результатів розроблено рекомендації для покращення виробництва. Аналіз показав, що найбільша інтенсивність деформації ( $\epsilon_i = 3,0$ ) спостерігається біля пуансона. У цій же зоні зосереджене й максимальне значення напружень ( $\sigma_i = 355$  МПа). Процес штампування передбачає використання двох інструментів: верхнього та нижнього пуансона. Важливим параметром є швидкість нижнього пуансона, яка має становити 0,2 мм/с. Перевищення цього значення може призвести до дефектів деталі.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ.**

1. Алієва Л. І. Технологічні можливості процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання / Л. І. Алієва // Технологічні системи. – 2017. – № 1 (78). – С. 31–40. – URL: [http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78\\_4.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78_4.pdf).
2. Алієва Л. І. Процеси комбінованого деформування та видавлювання // Обробка матеріалів тиском: сб. науч. тр. – Краматорськ : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 100–108.

**Кравченко М.В.**, науковий керівник **Кохан І.Р.**, (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, м. Харків, Україна)

## ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ ВИРОБНИЦТВА АВТОМОБІЛІВ

**Анотація:** У статті розглядається використання цифрових технологій та автоматизації в технологічній підготовці виробництва автомобілів. Проаналізовано сучасні тенденції впровадження CAD/CAM/CAE, MES та PLM-систем у провідних автомобільних компаніях. Визначено основні переваги та недоліки комп'ютеризованих систем, а також їхній вплив на ефективність виробництва. Окреслено ключові проблеми, пов'язані з інтеграцією цифрових рішень, кібербезпекою та підготовкою персоналу. Запропоновано перспективні напрями розвитку, включаючи інтеграцію штучного інтелекту.

**Ключові слова:** цифрові технології, автоматизація, технологічна підготовка виробництва, автомобілебудування, CAD/CAM/CAE, PLM, MES.

**Abstract:** The article examines the use of digital technologies and automation in the technological preparation of automobile manufacturing. Current trends in the implementation of CAD/CAM/CAE, MES, and PLM systems in leading automotive companies are analyzed. The main advantages and disadvantages of computerized systems, as well as their impact on production efficiency, are identified. Key challenges related to the integration of digital solutions, cybersecurity, and personnel training are outlined. Promising development directions are proposed, including the integration of artificial intelligence.

**Keywords:** digital technologies, automation, technological preparation of production, automotive industry, CAD/CAM/CAE, PLM, MES.

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Сучасний розвиток автомобільної промисловості вимагає ефективних технологічних рішень, які дозволяють скоротити терміни розробки та виробництва автомобілів. Комп'ютеризоване забезпечення технологічної підготовки виробництва (КЗТПВ) є ключовим елементом оптимізації виробничих процесів, проте його впровадження потребує значних фінансових витрат та адаптації до специфічних умов кожного підприємства. Дослідження у цій сфері спрямовані на розробку нових методів інтеграції комп'ютерних технологій у виробництво, що сприяє підвищенню ефективності, зниженню витрат і поліпшенню якості продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових роботах останніх років значна увага приділяється використанню CAD/CAM/CAE систем для проектування та аналізу виробничих процесів. Такі дослідники, як Дж. П. Сміт і К. Л. Джонс (2021), зазначають, що застосування PLM-систем у виробництві автомобілів дозволяє значно зменшити кількість конструктивних помилок. Крім того, дослідження в галузі промислової автоматизації вказують на важливість MES-систем для управління

виробничими ланцюгами в реальному часі. Проте, існує низка проблем, пов'язаних з інтеграцією таких технологій на різних рівнях виробництва, що потребує подальшого вивчення.

Формулювання невирішених частин загальної проблеми незважаючи на активне впровадження комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки у автомобільному виробництві, залишаються відкритими питання ефективної інтеграції між різними програмними системами, підвищення рівня кібербезпеки та адаптації персоналу до нових цифрових рішень. Також потребують подальшого дослідження методи мінімізації витрат на впровадження та експлуатацію таких систем.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою цієї статті є аналіз сучасних комп'ютеризованих систем технологічної підготовки виробництва автомобілів, визначення їхніх переваг і недоліків, а також обґрунтування перспектив розвитку та вдосконалення. Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

1. Дослідити основні складові КЗТПВ та їх застосування у провідних автомобільних компаніях.
2. Визначити основні переваги та недоліки використання таких систем.
3. Оцінити сучасні проблеми впровадження КЗТПВ та можливі шляхи їх вирішення.
4. Визначити перспективи подальшого розвитку цієї технології у світовій автомобільній промисловості.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сучасне автомобілебудування є однією з найдинамічніших галузей промисловості, що активно впроваджує передові технології для підвищення ефективності виробництва. Комп'ютеризоване забезпечення технологічної підготовки виробництва стало невід'ємною частиною цього процесу, дозволяючи виробникам створювати автомобілі швидше, точніше та з меншими витратами. Завдяки використанню цифрових рішень, таких як автоматизоване проектування, управління життєвим циклом продукції та моделювання виробничих процесів, автомобільні компанії можуть ефективно реагувати на зміну ринкових тенденцій та споживчих потреб. Однак, разом із значними перевагами, впровадження комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки виробництва супроводжується певними викликами, які варто враховувати для досягнення максимальної ефективності.

Основними складовими комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки виробництва є:

1. Системи автоматизованого проектування (САПР) – використовуються для створення та аналізу конструкторської документації. Наприклад, програмні пакети AutoCAD, SolidWorks, CATIA дозволяють створювати тривимірні моделі деталей і вузлів автомобіля.

2. Системи управління виробничими процесами (MES – Manufacturing Execution Systems) – контролюють виконання технологічних операцій, моніторять продуктивність та оптимізують використання ресурсів.

3. Системи комп'ютерного моделювання та інженерного аналізу (CAE – Computer-Aided Engineering) – включають розрахунок міцності конструкцій, аеродинамічний аналіз та тестування на віртуальних моделях.

4. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ (CAM – Computer-Aided Manufacturing) – забезпечують генерацію програм для верстатів з числовим програмним управлінням, що дозволяє підвищити точність і знизити час обробки деталей.

5. Системи управління життєвим циклом виробу (PLM – Product Lifecycle Management) – сприяють ефективному керуванню всіма етапами розробки, виробництва та експлуатації автомобіля.

Розглянемо на прикладах де саме є застосування комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки виробництва:

- Компанія Tesla – активно використовує системи САПР та CAE для створення інноваційних електромобілів, зокрема для розрахунку міцності кузова та оптимізації аеродинаміки.

- Концерн Volkswagen – застосовує PLM-системи для управління життєвим циклом продукції, що дозволяє оптимізувати процеси виробництва та зменшити кількість дефектів.

- BMW – впроваджує MES-системи для контролю якості та управління виробничими процесами в реальному часі, що підвищує ефективність виробництва.

- Toyota – використовує CAM-системи для автоматизованого програмування верстатів ЧПУ, що сприяє високій точності виробництва деталей автомобілів.

- Ford – застосовує технології цифрових двійників (digital twins) для моделювання виробничих ліній і оптимізації всіх процесів ще до їхньої реалізації на фізичних заводах.

Перевагами використання комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки виробництва є:

- Зменшення часу підготовки виробництва – автоматизовані системи скорочують терміни розробки та впровадження нових моделей автомобілів.

- Підвищення точності та якості – комп'ютерні системи знижують ймовірність помилок, що виникають під час розрахунків та виготовлення деталей.

- Оптимізація ресурсів – зниження витрат на матеріали та енергоносії завдяки точному плануванню виробничих процесів.

- Гнучкість та адаптивність – швидке внесення змін у конструкцію автомобіля та технологічні процеси відповідно до ринкових вимог.

Недоліками використання комп'ютеризованого забезпечення технологічної підготовки виробництва є:

- Висока вартість впровадження – закупівля ліцензійного програмного забезпечення та обладнання потребує значних фінансових вкладень.
- Необхідність високої кваліфікації персоналу – для ефективного використання КЗТПВ потрібні спеціалісти з відповідною освітою та досвідом роботи.
- Залежність від технологій – збої в програмному забезпеченні або апаратному обладнанні можуть призвести до зупинки виробництва.
- Кібербезпека – використання комп'ютеризованих систем підвищує ризик кібератак, що може спричинити витік даних або саботаж виробничих процесів.
- Складність інтеграції – поєднання різних програмних продуктів та систем може викликати труднощі у їхній сумісності та налаштуванні.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Комп'ютеризоване забезпечення технологічної підготовки виробництва є важливим фактором підвищення конкурентоспроможності автомобільних підприємств у сучасному світі, де цифровізація стає ключовою складовою успіху. Використання сучасних цифрових технологій дозволяє значно скоротити час розробки, зменшити виробничі витрати та забезпечити високу якість автомобільної продукції. Водночас, підприємства мають враховувати виклики, пов'язані з високими початковими витратами, необхідністю спеціалізованої підготовки персоналу та ризиками кібербезпеки. Подальший розвиток КЗТПВ сприятиме глибшій інтеграції штучного інтелекту, Інтернету речей та передових аналітичних систем у виробничі процеси, що дозволить створювати ще більш інноваційні, ефективні та екологічно чисті автомобілі майбутнього.

#### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ:**

1. ДСТУ 8302:2015. *Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.*
2. Smith J. P., Jones C. L. *Advanced Manufacturing Systems in Automotive Industry.* – New York: Springer, 2021.
3. Іванов О. В., Петров М. С. *Використання PLM-систем у виробництві автомобілів.* – Київ: Техніка, 2020.
4. Brown T. *The Role of MES in Smart Manufacturing.* – London: Wiley, 2019.
5. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015. *Інформаційні технології. Методи забезпечення безпеки. Системи управління інформаційною безпекою.*



**Кривошея В.Р., Кузнєцов Ю.М.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна)

## РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ З КОМБІНОВАНИМИ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНИМИ МЕТОДАМИ РУХУ

**Анотація:** У роботі розглядається концепція гібридного мобільного робота, що поєднує можливості крокуючої платформи та квадрокоптера. Запропонована система забезпечує ефективну адаптацію до складного рельєфу та можливість переходу в повітряний режим для подолання перешкод. Аналізуються конструкційні особливості, алгоритми управління та оптимізація енергоспоживання. Потенційні сфери застосування включають рятувальні операції, військову розвідку та дослідження важкодоступних територій.

**Ключові слова:** гібридний мобільний робот, крокуюча платформа, квадрокоптер, адаптивне пересування, енергоспоживання, рятувальні операції, військова робототехніка, дослідження важкодоступних територій.

**Abstract:** The article considers the concept of a hybrid mobile robot that combines the capabilities of a walking platform and a quadcopter. The proposed system provides effective adaptation to complex terrain and the ability to switch to air mode to overcome obstacles. The design features, control algorithms, and energy consumption optimization are analyzed. Potential areas of application include rescue operations, military reconnaissance, and exploration of hard-to-reach areas.

**Key words:** hybrid mobile robot, walking platform, quadcopter, adaptive locomotion, energy consumption, rescue operations, military robotics, exploration of hard-to-reach areas.

**Актуальність дослідження.** Сучасні бойові дії та розвідувальні операції потребують високої мобільності та автономності технічних засобів. Використання мобільних роботів значно розширює можливості військових підрозділів у складних умовах, забезпечуючи безпечне проведення операцій, моніторинг ворожих об'єктів та подолання різноманітних перешкод. Однак традиційні колісні, гусеничні та навіть крокуючі мобільні роботи мають обмеження у пересуванні по вертикальних і складних рельєфах, а також у швидкому перетині водних і загороджувальних бар'єрів.

Запропоноване дослідження спрямоване на створення гібридного мобільного робота, який поєднує можливості крокуючих платформ та безпілотних літальних апаратів (квадрокоптерів). Така гібридизація дозволить значно розширити функціональні можливості роботизованої системи, підвищити ефективність виконання розвідувальних завдань і зменшити енергетичні витрати.

**Мета дослідження.** Розробка мобільного робота довільної орієнтації в просторі з розширеними функціональними можливостями, здатного ефективно виконувати завдання розвідки та подолання перешкод у військових умовах. Основними критеріями розробки є мінімальні енерговитрати (електричної енергії) при здійсненні рухів та максимальна адаптивність до різних типів поверхонь і середовищ.

Ефект гібридизації – суттєве розширення функціональних можливостей мобільного робота, а саме, крім переміщення по горизонтальній, вертикальній і нахиленій поверхням, зліт на задану висоту, перетинання різних перешкод (стін, огорож, парканів, канав, траншей, річок тощо). Нижче наведені схеми однієї з варіантів ідеї гібридизації.

Прийнятті позначення на схемах:

**П** – платформа крокуючого мобільного робота;

**К** – квадрокоптер (дрон);

**Ш** – штанга, що з'єднує крокуючий мобільний робот і квадрокоптер (її може не бути);

Альфа – кут нахилу осі квадрокоптера відносно платформи;

Плюс (+) - переміщення присутнє;

Мінус (-) – переміщення відсутнє.

Технічна задача – розвідування ворожих об'єктів з використанням на дроні і платформі штучного зору з мікрофотокамерою і розмінування з використанням на платформі лазерного приладу.

Виконуючі функції - переміщення по горизонтальній, вертикальній і нахиленій поверхням, зліт на задану висоту, перетинання різних перешкод - стін, огорож, парканів, канав, траншей, річок тощо (рис.1-4).

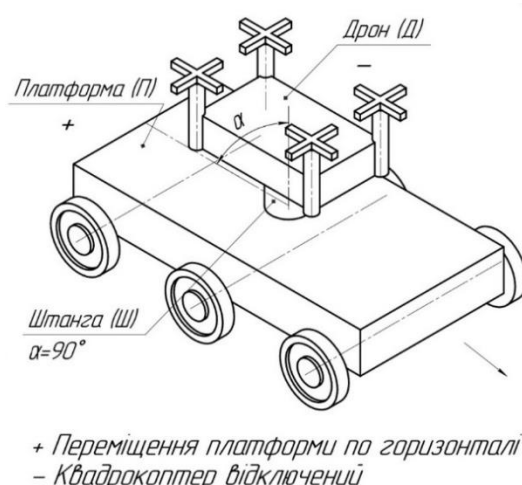


Рисунок 1 – переміщення платформи по горизонталі

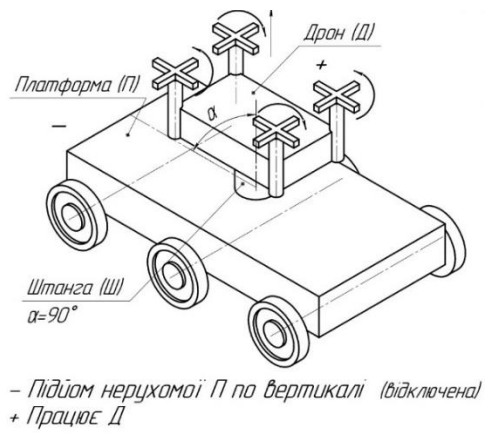


Рисунок 2 – підйом по вертикалі нерухомої платформи

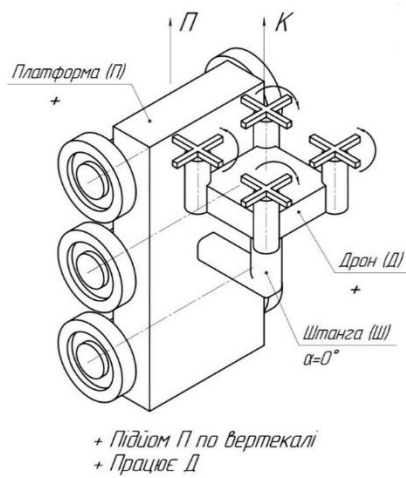


Схема 3 – переміщення платформи по вертикалі

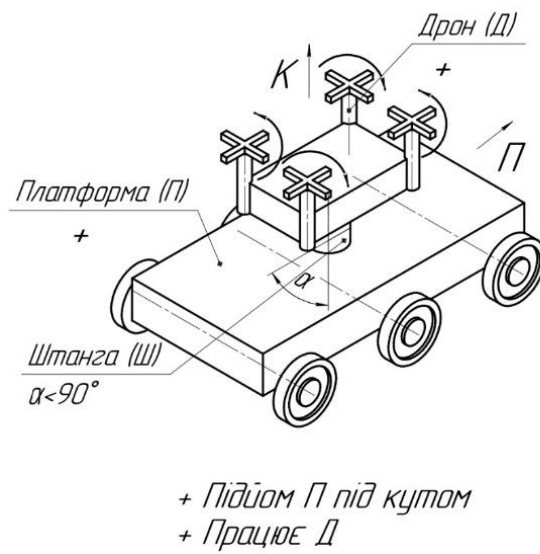


Рисунок 4 – переміщення платформи під кутом

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Розвиток робототехнічних систем вимагає створення універсальних платформ, здатних ефективно пересуватися у різних середовищах.

Сучасні наземні роботи демонструють високу прохідність, однак обмежені у швидкості та здатності подолання вертикальних перешкод. Квадрокоптери, своєю чергою, є мобільними в повітрі, проте мають обмежений час автономної роботи через високе енергоспоживання. Комбінація цих двох підходів у гібридному мобільному роботі дозволить отримати систему з підвищеною адаптивністю та автономністю.

**Цілі роботи та постановка задачі.** Метою даної роботи є створення концепції гібридного мобільного робота, який поєднує переваги крокуючої платформи та квадрокоптера. Основні задачі дослідження включають:

1. Аналіз технічних вимог до гібридного робота.
2. Розробку конструкційної моделі з урахуванням балансування ваги та міцності.
3. Оптимізацію системи керування для плавного переходу між режимами руху.
4. Оцінку енергоефективності різних режимів роботи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Запропонована концепція передбачає використання легкої, але міцної конструкції, що поєднує механічні кінцівки для пересування на нерівній поверхні та пропелери для польоту. Основними елементами є:

Каркас із легких композитних матеріалів.

- Інтелектуальна система керування, що використовує машинне навчання для вибору оптимального способу пересування.
- Модульна батарейна система з розподілом енергії між польотом і наземним рухом.
- Адаптивна система стабілізації при переході між режимами.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Результати дослідження показують, що гібридний мобільний робот із можливістю ходьби та польоту має значний потенціал у рятувальних операціях, дослідженні складних територій та військовій сфері. Подальші дослідження будуть зосереджені на вдосконаленні алгоритмів керування, зменшенні ваги конструкції та підвищенні автономності роботи.

Лещенко К.П., Кравцова Д.Ю. (Україна, м. Кривий Ріг, Криворізький національний університет)

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ШЛЯХОМ АЗОТУВАННЯ З ПОПЕРЕДНІМ ЛАЗЕРНИМ ОПРОМІНЕННЯМ

**Анотація:** Представлено огляд наукових досліджень зносостійкості деталей тертя після різних поверхневих обробок. В роботі показано, що наявний рівень зносостійкості робочих поверхонь може бути підвищений шляхом використання більш сучасної комбінованої обробки, ніж базова термічна обробка, наприклад, азотування з попереднім лазерним опроміненням.

**Ключові слова:** зносостійкість; деталі тертя; поверхнева обробка; комбінована обробка; термічна обробка; лазерне опромінення; азотування; робочі поверхні.

**Abstract:** A review of scientific studies on the wear resistance of friction parts after various surface treatments is presented. The work shows that the existing level of wear resistance of working surfaces can be increased by using a more modern combined treatment than basic heat treatment, for example, nitriding with prior laser irradiation.

**Keywords:** wear resistance; friction components; surface treatment; combined treatment; heat treatment; laser irradiation; nitriding; working surfaces.

Базові технології виготовлення деталей тертя зі сталей 45, 45Л передбачають застосування термічної обробки із метою зміцнення поверхні. Одним із варіантів такої обробки є гартування при температурі 860–880°C з подальшим охолодженням у олив'ї та відпуску при 630–650°C із охолодженням на повітрі.

Після вище зазначеної обробки мікроструктура сталі 45Л складається з троститу та фериту, а твердість матеріалу становить 311–321 НВ. Наявність фази фериту у структурі сталі бажана усередині деталей із метою надання помірної пластичності. Одночасно з тим присутність фериту у поверхневих шарах призводить до підвищення зношуваності внаслідок його пластичності та в'язкості. Таким чином деталі будуть мати низький показник надійності. Тому їм доцільно провести іншу або додаткову термічну або хіміко-термічну обробку із метою підвищення зносостійкості робочих поверхонь.

Автори [1] зазначають, що гартування поверхні високоенергетичними джерелами, тобто, струмами високої частоти, призведе до утворення на поверхні шару безструктурного мартенситу із твердістю 524 НВ, а мікроструктура у середині деталей складатиметься із сорбіту (277-293 НВ). Утворення таких мікроструктур однозначно вплине на твердість поверхні, але необов'язково вплине на зниження зношуваності. Дані у [1] про зношуваність поверхні відсутні. Крім того, загально відомо, що на зношуваність значно впливає легування сплаву джерелами концентрованої енергії, тобто, утворення спеціальних карбідів, нітридів, боридів, тощо.

Із метою поверхневого зміцнення часто виконується хіміко-термічна обробка доевтектоїдних нелегованих сталей [1-4]. Наприклад, у [1] показано оптимальний режим азотування сталі 45 при наступних параметрах: тиск у вакуумній камері 240–250 Па і концентрація аргону до 20–25%. При такому режимі азотування досягалася максимальна зона азотованого шару – 0,2 мм. А мінімальний знос сталі 45 отримано після обробки при тиску у вакуумній

камері 200 Па і об'ємній концентрації аргону 30–33%, температура 570°C, час 240 хв. Однак, ми вважаємо, що зміцнення на глибину 0,2 мм є недостатнім для експлуатаційних умов роботи відповідальних деталей, а у роботах [2, 3] досягнуто кращого результату проникнення азоту вглиб деталі – до 0,45 мм.

Автори [2, 3] зазначають, що для підвищення твердості та зносостійкості перед азотуванням можна використати легування джерелами концентрованої енергії тільки важливих ділянок деталі. У даних дослідженнях джерелами концентрованої енергії є лазерне опромінення. Дослідження показало, що якщо проводити лише азотування, тоді товщина буде складати 0,17 мм, а попереднє лазерне опромінення деталі збільшило легований шар до 0,45 мм, через те, що на поверхні утворилася більш пориста мікроструктура, а саме, зерна стали протяжніші, збільшилася площа проникнення між зернами, тому підвищилася швидкість дифузії азоту і його відсотковий вміст. За даними дослідження [3] без лазерної обробки вміст азоту сягнув 0,071%, а за наявності опроміненої поверхні – 0,14-0,15%. Також завдяки цьому значно зменшився час азотування – найбільше насичення структури азотом відбувається у першу годину.

Згідно триботехнічних випробувань зношування азотованої протягом 10 год сталі становило 0,8 мг/см<sup>2</sup>·км, а зношування поверхонь оброблених лазером та азотованих протягом 1 год – 0,33 мг/см<sup>2</sup>·км, що у 2,4 рази менше [3]. Це можна пояснити більшою глибиною азотованого шару, більшою концентрацією азоту у поверхні, а також за допомогою фазового рентгеноструктурного аналізу визначено, що без лазерної обробки азотований шар містить у більшій мірі гексагональний нітрид заліза Fe<sub>3</sub>N, а у обробленому лазером азотованому шарі – кубічний нітрид заліза Fe<sub>4</sub>N, який є стабільніший і міцніший. Твердість поверхневого шару також підвищується у 2-2,5 рази згідно дослідження [2].

У роботі [4] виявлено у ході випробувань поліпшеної сталі 45 і карбонітризованої сталі 45, що зношуваність можна зменшити у 1,2-1,3 рази для усіх діапазонів навантажень.

Отже, із оглянутих наукових досліджень випливає, що шляхом хіміко-термічної обробки можна істотно підвищити надійність і продовжити строк експлуатації у порівнянні із наявним рівнем зносостійкості робочої поверхні при базовій термічній обробці деталей тертя.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дослідження мікроструктури зношених деталей автомобілів із сталі 45 при відновленні і багатократній термічній обробці / О. Г. Чернета та ін. *Перспективні технології та прилади*. 2017. № 10. С. 212–216.
2. Alaa I. F. I. *Development of the combined hardening technology of obtaining solid coating on the surface of steel products. Technology audit and production reserves*. 2017. Vol.1, no. 1(33). P. 20–23. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93431>
3. *Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення* / М. В. Кіндрачук та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2008. № 50. URL: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.50.2940>
4. Глушкова Д. Б., Байдала В. Ю. *Порівняння зносостійкості та нанотвердості сталей, поверхня яких зміцнена різними способами. Матеріали конф. 7-ма Міжнародна науково-практична конференція Застосування знань для розвитку науки, Стокгольм, Швеція. 21–24 лют. 2023 р. 2023. С. 386.*

**Литвиненко В. В., Соколов М. Д., Пилипчук О. В., Мінько О. О.,** наукові керівники: д.т.н., проф. Драгобецький В. В., д.т.н., проф. Загірняк Д. М. (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна)

## **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАХИСНИХ СТРУКТУР З НАНОМАТЕРІАЛІВ**

***Анотація:** основною метою роботи є розробка та наукове обґрунтування конструкції бронезахисних елементів з нанокристалічних матеріалів. Вирішена одна з ключових проблем сучасного легкого бронезахисту, а саме забезпечення необхідного рівня заброньованої травми та необхідної стійкості під час зменшення маси. Обґрунтована можливість отримання наноматеріалів при вибуховому навантаженні під час співудару плоских кумулятивних струменів з реалізацією механізму рідкофазного спікання.*

***Ключові слова:** легкий бронезахист; нанокристалічні матеріали; заброньована травма; стійкість бронезахисту; маса бронеелементів; вибухове навантаження; плоский кумулятивний струмінь; рідкофазне спікання.*

***Abstract:** The main objective of the work is to develop and scientifically substantiate the design of armor protection elements made of nanocrystalline materials. One of the key problems of modern light armor protection has been solved, namely, ensuring the required level of behind-the-armor injury and the required resistance while reducing weight. The possibility of obtaining nanomaterials under explosive loading during the collision of flat cumulative jets with the implementation of the liquid-phase sintering mechanism has been substantiated.*

***Keywords:** light armor protection; nanocrystalline materials; behind-armor trauma; armor resistance; armor element mass; explosive loading; flat cumulative jet; liquid-phase sintering.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Головним завданням екіпірування та бронювання є підвищення бойової ефективності бійця. Вимоги до екіпірування розрізняються залежно від бойових умов. Засоби захисту є складовою частиною екіпірування і підвищують бойову ефективність за рахунок зниження санітарних і неповоротних втрат при балістичному ураженні. Їх розробляють як з урахуванням специфіки бойової діяльності військовослужбовців певної спеціальності, так і з урахуванням передбачуваного театру військових дій.

Сьогодні на вдосконалення екіпірування піхотинця виділяють значні кошти. У різних країнах ведеться активна робота по вдосконаленню окремих його елементів, в тому числі засобів індивідуального бронезахисту. Без знання тактико-технічних вимог, які пред'являлися до таких виробів, етапів розвитку технологій і досвіду застосування в різних війнах складно правильно оцінювати, розробляти або вибирати вироби захисту.

У сфері національної безпеки та оборони України важливою та актуальною є проблема забезпечення необхідної стійкості, амортизуючої

дії, кулестійкості, усунення крихкості при високій твердості сплаву та зменшення маси бронезахисту.

Тематика дослідження входить до Переліку критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки та відповідає розпорядженню Кабінету Міністрів України від 30.08.2017 р. № 600-р із змінами, що внесені згідно з Розпорядженнями КМ № 1358-р від 24.12.2019 р., № 223-р від 23.02.2022 р.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найперші бронесистеми застосовували для використання монолітних загартованих сталевих пластин [1–3]. Прогресивна технологія обробки призвела до винаходу бронесистем подвійної твердості (ДНА) з більш товстими та якісними пластинами. Подальші нововведення включають прокатну однорідну броню (РНА), литу однорідну броню (СНА), сталеву броню високої твердості (ННА) та броню із загартованого алюмінієвого сплаву (серія МІЛ – DTL) [2].

Як описано у [3], основні конструкції броні можна класифікувати як пасивні або реактивні. Реактивні броні використовують кінетичну силу для протидії балістичній загрозі. З іншого боку, пасивні броні використовують матеріальні властивості складових для розсіювання кінетичної енергії удару.

Більшість сучасних комерційних броньованих систем є багатошаровими композитними структурами, що поєднують переваги обох пасивних систем. В бронезилетах успішно використовується кераміка. Ці броньові конструкції мають керамічний шар, підкріплений металами та композитами.

Винахід Кевлара в 1969 р. компанією «Дюпон» призвів до першого запатентованого використання тканин у бронезилетах як захисту від кульових загроз (жилети К-15) [1].

Тканинні броні добре функціонують проти деформуючих загроз, розподіляючи кінетичну енергію через високоміцні волокна з режимами дисипації, включаючи зсув або руйнування волокна, розрив або деформацію волокна при розтягуванні та пов'язане з цим розшарування або витягування.

Металева броня як клас включає в себе броньові сталі, високоміцні алюмінієві і титанові сплави [4, 5]. Найбільш широко використовується сталева броня. З її допомогою можливо забезпечення захисту аж до п'ятого класу при товщині бронеелемента 5,0...6,5 мм, що відповідає поверхневій густині 39...51 кг/м<sup>3</sup>. Великі товщини сталевих бронееlementів неприпустимі через їх надмірно велику вагу.

Одним з можливих шляхів підвищення кулестійкості є створення біметалічної броні із зовнішнім високотвердим шаром 55...60 НРС і тильним в'язким шаром. Таку броню можна отримати, наприклад, зварюванням вибухом, пакетною прокаткою або іншими способами.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** Технічну складність являє собою забезпечення необхідного рівня захищеності від гвинтівкових та автоматних куль, а також уламків. Подібні



бронееlementи (2 - 5-й клас захисту, площа 45-55 дм<sup>2</sup>) при сучасному рівні розвитку матеріалів важать понад 15 кг. А поява нових бронейієних патронів викликає додаткові складнощі та посилення вимог до засобів захисту. Високу кулестійкість мають біметалеві сталі, але у серійне виробництво цих сталей відсутнє.

Бронесистеми, що базуються на тканині мають невелику масу, але самі по собі неефективні для подолання бронейієних загроз і потребують руйнівників для делокалізації зосереджених сил.

Збільшити кулестійкість броньової сталі можна було б шляхом збільшення її твердості. Однак, при твердості перепони з гомогенної вуглецевої броньової сталі більшою за 55 HRC, вона стає крихкою і при обстрілі навіть звичайними сталевими кулями уражається по типу пролому або розколу. Для того, щоб уникнути цього, необхідно зберегти пластичність сталі на рівні  $\psi = 30\%$ .

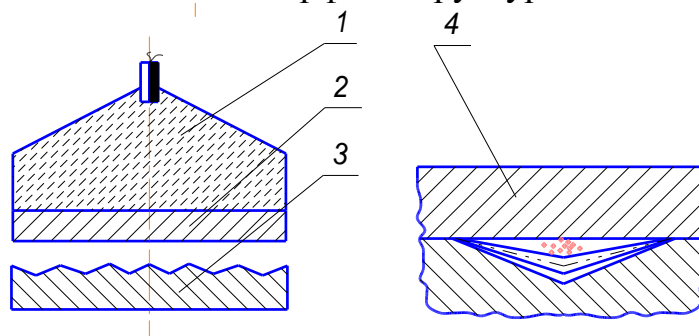
**Цілі статті та постановка задачі.** Необхідність зниження маси захисних структур бронезахисту при збереження або навіть збільшенні захисної здатності вимагають розробки нових матеріалів з новими хімічним та фазовим складовими і структурами. Кардинальне поліпшення функціональних властивостей конструкційних матеріалів можливо шляхом формування субмікросталічної структури з розміром зерен 1 мкм...100 нм і нанокристалічної структури, для якої розмір зерен не перевищує 100 нм. Для отримання об'ємних наноматеріалів, наприклад, бронепластин, можна використовувати порошкові технології – компактування нанопорошків, кристалізацію з аморфного стану та інтенсивну пластичну деформацію.

Багато провідних науково-дослідних лабораторій світу мають досить великі плани та добре фінансовані програми розробки нових бронематеріалів на основі використання досягнень нанотехнологій. Але сьогодні наноматеріали дуже коштовні, хоча інтенсивні пошуки нових матеріалів і технологій виробництва швидко ведуть до їх здешевлення.

Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування конструкції бронезахисних елементів з нанокристалічних матеріалів із забезпеченням міцності, твердості, в'язкості та пластичності матеріалу. Завданням дослідження є розробка ресурсозберігаючої дешевої технології отримання бронезахисних елементів з нанокристалічних матеріалів з високими показниками балістичного захисту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процес отримання нанокристалічної структури при зварюванні вибухом біметалу (зовнішній шар – титан VT1-0, внутрішній шар – алюміній АД1) можливо шляхом додавання міжшарової поверхні рельєфу, що забезпечує утворення зустрічних кумулятивних струменів з розплавленого металу й окислів. Наприклад, рельєф може бути трикутного (рис. 1), трапецеїдального й інших профілів. При зіткненні струменів утворюється дрібнодисперсна завіса й розпил струменів на масивне тіло сплавів. У таких умовах

швидкість охолодження компонентів кумулятивних струменів досягає 1 млн. градусів за секунду, і створюються умови для швидкої кристалізації та отримання нанокристалічної або аморфної структури.



1 – вибухова речовина; 2 – зовнішній шар біметалу; 3 – внутрішній шар біметалу; 4 – струмінь

Рис. 1 – Схема отримання нанокристалічної структури між шарами біметалу

Експериментальні дослідження [1] показали, що фізико-механічні властивості зовнішнього шару з титану суттєво відрізняються від властивостей крупнокристалічних аналогів (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості чистого титану ВТ1-0 з різними структурами

Фізико-механічні властивості	Нано-кристалічний Ті (0,1 мкм)	Субмікро-кристалічний Ті (0,25 мкм)	Крупно-кристалічний Ті (15 мкм)
Щільність, г/см <sup>3</sup>	4,492	4,483	4,54
Межа міцності, МПа	820	760	460
Межа пружності, МПа	-	360	238
Границя текучості, МПа	830	810	380
Відносне подовження, %	20	28	26
Відносне звуження, %	55	66	60
Мікротвердість, МПа	2900	2800	1800

При ударнохвильовій обробці суттєво підвищилася межа міцності границі текучості під час збереження пластичності матеріалу.

Практичний інтерес представляє значний ріст механічних властивостей у матеріалах з наноструктурою, таких як міцність, мікротвердість, підвищена демпфіруюча здатність. Реакція матеріалу на зменшення розміру зерна надана в табл. 2.

Таблиця 2 – Розмірна залежність фізичних властивостей наноструктурних матеріалів

Властивості	Реакція матеріалу на зменшення розміру зерна
Термічне	Зниження температури фазових переходів, у тому числі температури плавлення
Кінетичні	Істотне збільшення значення коефіцієнта дифузії; різке падіння теплопровідності при певному критичному розмірі зерна
Механічні	Підвищення твердості й міцності металевих і керамічних матеріалів; підвищення в'язкості руйнування; поліпшення ковкості; прояв надпластичності в малопластичних матеріалах; істотне збільшення зносостійкості й працездатності при циклічних навантаженнях

У вихідному крупнокристалічному титані (15 мкм) мікротвердість становить 1800 МПа. У наноструктурному титані (0,1 мкм) величина мікротвердості підвищилася й становить 2820 МПа (рис. 2, 3).

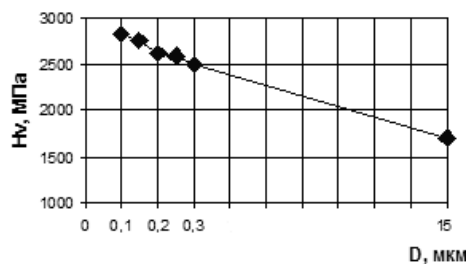


Рисунок 2 – Залежність мікротвердості від розміру зерна титану

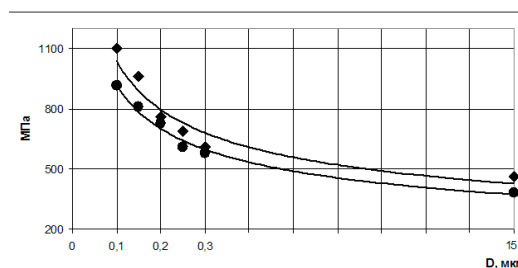


Рисунок 3 – Залежність межі міцності й межі текучості титану від розміру зерна

При ударно-хвильовому навантаженні відбувається інтенсивна пластична деформація, що досягає десятків відсотків за дуже короткий час ( $10^{-6} - 10^{-7}$  s) час. Утворення наноструктур у таких умовах підтверджене дослідженнями часток розміром у кілька мікрометрів при їх зіткненні з мішенню у технологічних процесах «холодного» газодинамічного, детонаційного й кавітаційного напilenня.

Процес фрагментації зерен при інтенсивній пластичній деформації (ПД) можна розрахувати за допомогою рівняння (1) при знанні енергії, необхідної для подрібнення зерен.

$$\iiint_W \rho \vec{F} v dW + \iint_{\Sigma} \vec{\sigma}_n v d\Sigma = \iiint_W \sigma_{ik} e_{ik} dW + \frac{d}{dt} \iiint_W 0,5 \rho v^2 dW, \quad (1)$$

де  $W$  – матеріальний обсяг;

$\Sigma$  – поверхня, що обмежує матеріальні обсяг;

$\rho \vec{F} dW$  – зовнішні масові сили;

$\sigma^n d\Sigma$  – зовнішні поверхневі сили;

$v$  – переміщення точки додатку поверхневих сил;

$\sigma_{ik}$  – напруги.

Процес пластичної деформації необхідно пов'язати зі зміною ентропії тіла, а умова руйнування можна представити у вигляді

$$s(\bar{t}) = S(0) + \Delta \bar{S} = S, \quad (2)$$

де  $\bar{t}$  – час руйнування;

$S(0)$  – щільність ентропії в початковий момент часу;

$\Delta \bar{S}$  – критичне значення щільності ентропії при заданому значенні ( $\bar{t}$ )

При цьому

$$s(\bar{t}) = \frac{n(\bar{r}, \bar{t})}{T}; \quad S(0) = \frac{n(\bar{r}, 0)}{T}; \quad \Delta \bar{S} = \frac{\Delta \bar{n}}{T}; \quad \bar{S} = \frac{\bar{n}}{T} \quad (3)$$

де  $T$  – абсолютна температура;

$\bar{n}$  – щільність внутрішньої енергії.

Можливо одержати дрібнозернисту структуру безпосередньо після вибухової обробки. Для цього необхідно отримати співвідношення між напругами, що виникають при вибуховому навантаженні й числом дислокацій усередині зерна. Для здійснення руху дислокацій необхідно прикласти напругу  $\sigma_n$  рівне

$$\sigma_n = 2 \cdot 3^{-0.5} \cdot n(\sigma_{12} - \tau_{тр}) \quad (4)$$

де  $n$  – кількість крайових дислокацій;

$\sigma_{12}$  – напруга, прикладене в площині ковзання 1 у напрямку ковзання 2;

$\tau_{тр}$  – напруга тертя, яку потрібно подолати дислокації для здійснення руху.

Умова виникнення тріщини усередині зерна полягає у вимозі

$$\sigma_{теор} = 0,5 \cdot \pi^{-1} \cdot G \quad (5)$$

де  $G$  – модуль пружності зрушення;

$\sigma_{теор}$  – теоретична міцність (критичне напруження зрушення).

Для виникнення тріщини усередині зерна необхідно така кількість дислокацій, яка приблизно дорівнює відношенню теоретичної міцності до поточної межі плинності, тобто

$$n \cong \sigma_{теор} / \sigma_s \quad (6)$$

де  $\sigma_s$  – поточна межа плинності.

Авторами освоєна технологія отамання біметалевої броні з нанокристалічним шаром. Зразки даної броні представлені на рис. 4.

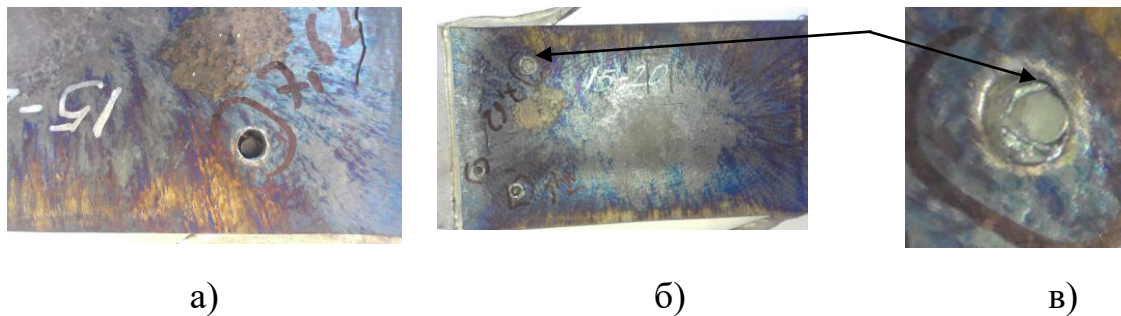


Рисунок 4 – Металева композитна броня: а) титан VT1-0+алюміній+титан VT1-0; б) титан VT1-0+алюміній+титан VT6; в) куля, що застрягла між шарами біметалу

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розроблено науковообґрунтовану конструкцію бронезахисного елемента з нанокристалічного матеріалу із забезпеченням міцності, твердості, в'язкості та пластичності матеріалу. Розроблено ресурсозберігаючідешевої технології отримання бронезахисних елементів з нанокристалічних матеріалів з високими показниками балістичного захисту. Коштовність бронезахисних елементів ESAPI виробництва США однієї одиниці складає 400-600 доларів, а коштовність елемента розробки авторів складає не більш 1500 грн.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. M.V. Zagirnyak, V.V. Drahobetskyi. *New Methods of Obtaining Materials and Structures for Light Armor Protection (Scopus). International Conference on Military Technologies (ICMT) – Brno University of Defence, 2015. – p.p 709-710*
2. Cimpoeru S.J. *Analytical modeling of the perforation of multi-layer metallic targets by fragment simulating projectiles Proceedings of the Twentieth International Symposium on Ballistics, Orlando, USA, 2002.*
3. Савенкова Ю.В., Драгобецький В.В. *Дослідження балістичної стійкості виробів з шаруватих металевих композицій. XXVIII Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, 26-27 квітня 2021 р. – Кременчук: КрНУ, 2021 – С. 51-52.*
4. *Ударостійкий бронезахисний шаруватий елемент: пат. 147309 Україна: МПК F41H 5/02 (2006.01). № и 2020 07607; заявл. 30.11.20; опубл. 28.04.21; бюл. № 17.*
5. *Спосіб отримання шаруватих композиційних матеріалів з криволінійною поверхнею шляхом зварювання вибухом : пат. 106479 Україна : МПК B23K 20/08. № и 2015 10895; заявл. 09.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8.*

**Мокієвець Д.О.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна), **Ковалевський С.В.**, (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## РОЗРОБКА ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА БАЗІ ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Анотація:** У даній статті досліджено сучасні технології формування функціональних поверхонь деталей машин та їх вплив на експлуатаційні характеристики виробів. Проаналізовано інноваційні методи обробки поверхонь, включаючи плазмові, лазерні та комбіновані технології, а також способи нанесення композитних та наноструктурованих покриттів. Запропоновано комплексний підхід до розробки технологічних процесів, що забезпечує оптимальне поєднання фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей машин. Експериментально доведено підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та втомної міцності деталей на 25-40% при застосуванні розроблених технологій. Результати дослідження демонструють перспективність запропонованих технологічних рішень для впровадження у виробництво сучасних машин і механізмів.

**Ключові слова:** функціональні поверхні, інноваційні технології обробки, наноструктуровані покриття, плазмові технології, лазерна обробка, композитні матеріали, зносостійкість, поверхневе зміцнення.

**Abstract:** This article investigates modern technologies for the formation of functional surfaces of machine parts and their impact on the operational characteristics of products. Innovative surface treatment methods are analyzed, including plasma, laser, and combined technologies, as well as techniques for applying composite and nanostructured coatings. A comprehensive approach to the development of technological processes is proposed, ensuring the optimal combination of the physical and mechanical properties of the surface layer of machine parts. Experimental results demonstrate a 25–40% improvement in wear resistance, corrosion resistance, and fatigue strength of parts when applying the developed technologies. The research findings highlight the promising nature of the proposed technological solutions for implementation in the production of modern machines and mechanisms.

**Keywords:** functional surfaces; innovative processing technologies; nanostructured coatings; plasma technologies; laser processing; composite materials; wear resistance; surface strengthening.

Сучасний розвиток машинобудування характеризується постійним підвищенням вимог до якості, надійності та довговічності деталей машин. Відомо, що експлуатаційні характеристики деталей значною мірою визначаються станом їх поверхневого шару [1, 2]. Функціональні поверхні деталей машин у процесі експлуатації піддаються різноманітним навантаженням: механічним, тепловим, хімічним та їх комбінаціям, що призводить до зношування, корозії, втомного руйнування тощо.

Традиційні методи обробки поверхонь (механічна, термічна, хіміко-термічна) не завжди забезпечують необхідний комплекс властивостей [3-5]. Тому актуальним завданням сучасного машинобудування є розробка нових технологій створення функціональних поверхонь, що базуються на інноваційних процесах і дозволяють суттєво підвищити експлуатаційні характеристики деталей машин.

Метою даної роботи є розробка та дослідження перспективних технологій створення функціональних поверхонь деталей машин на основі

комбінованого застосування сучасних методів обробки та нанесення покриттів.

Для проведення експериментальних досліджень використовувались зразки із конструкційних сталей 40X, 45, 30XГСА та титанового сплаву ВТ6. Розміри зразків для лабораторних досліджень становили: циліндричні –  $\varnothing 30 \times 8$  мм, плоскі –  $50 \times 30 \times 8$  мм. Зразки попередньо піддавалися механічній обробці до шорсткості  $Ra = 0,8-1,25$  мкм.

У роботі використовувались різні методи обробки поверхонь для формування функціональних шарів. Зокрема, застосовувалась лазерна обробка на установці "YLS-2000" із волоконним лазером потужністю до 2 кВт та довжиною хвилі 1,07 мкм. Для створення покриттів також використовували плазмове напилення на установці "УПУ-8М" із використанням плазмотрона потужністю до 40 кВт. Електроіскрове легування здійснювали за допомогою установки "Елітрон-52А" при енергії імпульсу 0,1–1,5 Дж. Завершальна обробка поверхонь проводилася ультразвуковим методом з частотою коливань 22 кГц і амплітудою 15–25 мкм. Окрему увагу приділяли застосуванню комбінованих методів, які поєднували різні технології для досягнення оптимальних властивостей поверхонь.

Для формування функціональних поверхонь використовувалися різноманітні типи покриттів. Наносили керамічні покриття на основі  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  та  $TiN$  із товщиною від 50 до 200 мкм. Окрім того, застосовували композиційні покриття системи "метал-кераміка" ( $Ni-Al_2O_3$ ,  $Co-WC$ ) товщиною 100–300 мкм. Формували багат шарові градієнтні покриття зі змінним хімічним складом по товщині, а також наноструктуровані покриття з розміром зерен у діапазоні 30–100 нм.

Для оцінки властивостей отриманих функціональних поверхонь застосовували комплекс аналітичних методів. Металографічний аналіз проводили за допомогою оптичного мікроскопа "Olympus GX51" та растрового електронного мікроскопа "JSM-6510LV". Структуру покриттів досліджували методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі "ДРОН-4". Мікротвердість поверхонь визначали за допомогою приладу "ПМТ-3М" при навантаженні від 0,49 до 1,96 Н. Зносостійкість оцінювали за схемою "диск-колодка" на машині тертя "СМЦ-2". Корозійну стійкість випробовували в 3% розчині  $NaCl$ . Втомну міцність визначали на установці із частотою навантаження 50 Гц.

Дослідження мікроструктури зразків після різних видів обробки показали, що лазерна обробка сталі 40X з оплавленням поверхні призводить до формування мартенситної структури з дисперсністю 0,5-2 мкм і мікротвердістю 8,5-9,2 ГПа. Глибина зміцненого шару становить 0,3-0,5 мм в залежності від режимів обробки. Плазмова обробка без оплавлення забезпечує формування дрібнозернистої структури з розміром зерна 5-10 мкм і мікротвердістю 6,5-7,5 ГПа при глибині зміцнення 0,15-0,25 мм.

Електроіскрове легування титанового сплаву ВТ6 електродами із  $WC-Co$  призвело до формування поверхневого шару товщиною 30-50 мкм з включеннями карбідів вольфраму, що забезпечило підвищення мікротвердості до 12-14 ГПа.

Комбінована обробка, що включає плазмове напилення з подальшою лазерною обробкою, дозволила отримати градієнтну структуру з плавною зміною властивостей по глибині (Рис. 1). Така структура характеризується підвищеною адгезією покриття до основи та зниженими залишковими напруженнями.

Розроблені наноструктуровані покриття на основі TiN-AlN з розміром зерна 40-80 нм продемонстрували підвищені триботехнічні характеристики. На Рис. 2 представлено результати порівняльних випробувань на зносостійкість зразків із різними видами покриттів.

Аналіз результатів показує, що наноструктуровані покриття забезпечують зниження інтенсивності зношування у 2,8-3,5 рази порівняно з традиційними покриттями. Це пояснюється особливостями деформації наноструктурованих матеріалів, які характеризуються підвищеною твердістю при збереженні достатньої пластичності.

Для підвищення комплексу експлуатаційних характеристик запропоновано технологію комбінованої обробки, яка об'єднує кілька етапів. На початковому етапі проводиться механічна обробка поверхні, що дозволяє досягти необхідної точності розмірів і забезпечити задану шорсткість. Після цього на підготовлену поверхню наноситься багат шарове композиційне покриття за допомогою плазмового напилення, що створює додатковий захисний шар з високими фізико-механічними властивостями. Далі здійснюється лазерна обробка, яка забезпечує оплавлення покриття та формування оптимальної структури поверхневого шару, сприяючи підвищенню його міцності та зносостійкості. Завершальним етапом є ультразвукова фінішна обробка, яка зменшує шорсткість поверхні та формує сприятливі залишкові напруження, що позитивно впливає на довговічність виробу.

Результати випробувань деталей, оброблених за запропонованою технологією, представлені в табл. 1.

**Таблиця 1. Експлуатаційні характеристики деталей з різними видами обробки**

Вид обробки	Зносостійкість, відн. од.	Корозійна стійкість, відн. од.	Втомна міцність, відн. од.
Традиційна термічна обробка	1,0	1,0	1,0
Лазерна обробка	1,8	1,3	1,2
Плазмове напилення	2,2	1,9	0,9
Комбінована обробка	3,4	2,4	1,4

## ВИСНОВКИ

У роботі розроблено та теоретично обґрунтовано комплексний підхід до створення функціональних поверхонь деталей машин на основі інноваційних процесів обробки та нанесення покриттів. Проведено дослідження впливу різних методів обробки, зокрема лазерної, плазмової,



електроіскрової та ультразвукової, на структуру та властивості поверхневого шару деталей, виготовлених із різних конструкційних матеріалів. Розроблено технологію формування наноструктурованих покриттів із розміром зерна 40–80 нм, що забезпечує підвищення зносостійкості у 2,8–3,5 рази порівняно з традиційними покриттями.

Запропоновано технологію комбінованої обробки, що включає етапи плазмового напилення, лазерної та ультразвукової обробки. Проведені експериментальні дослідження показали, що така технологія дозволяє підвищити зносостійкість деталей у 3,4 рази, корозійну стійкість у 2,4 рази та втомну міцність у 1,4 рази. Крім того, розроблено алгоритм вибору оптимальної технології створення функціональних поверхонь залежно від умов експлуатації деталей машин.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка методів комп'ютерного моделювання процесів формування функціональних поверхонь для оптимізації технологічних параметрів. Також планується дослідження можливостей застосування адитивних технологій для створення деталей із функціональними поверхнями. Окрему увагу буде приділено вивченню трибологічних властивостей наноструктурованих поверхонь в екстремальних умовах експлуатації та розробці автоматизованих систем контролю якості функціональних поверхонь.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський С. В., Бобров Д. С. Дослідження процесів нанесення антифрикційних покриттів із застосуванням апарату нейромережного аналізу // *Нейромережеві технології та їх застосування НМТІЗ-2016* : зб. наук. праць міжнар. наук. конф. / за заг. ред. С. В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 65–68.

2. Ковалевський С. В., Коваленко Д. В. Дослідження способу акустичного діагностування нанопокриттів деталей машин // *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. – 2018. – № 1. – С. 84–89.

3. Спосіб вимірювання товщини легко руйнуючого покриття деталей : пат. 100099 Україна МПК G01N 27/00 (2015.01) / С. В. Ковалевський, В. В. Анацька, О. С. Ковалевська ; заявник і власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201500175 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13.

4. Спосіб нанесення покриття на робочі поверхні деталей машин : пат. 130748 Україна МПК C23C 16/02 (2006.01), C23C 22/00, F26B 3/347 (2006.01) / С. В. Ковалевський, К. С. Глушич ; заявник і власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201806373 ; заявл. 07.06.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24.

5. Спосіб випробовування нанопокриттів на зносостійкість : пат. 131136 Україна МПК G01N 3/56 (2006.01), B82Y 35/00 / С. В. Ковалевський, Д. В. Коваленко ; заявник і власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201806515 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

**Надіч П.В., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

***Анотація:** У статті проаналізовано технологічні методи опоряджувальної обробки зовнішніх поверхонь деталей типу тіл обертання з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик протягом життєвого циклу. Розглянуто застосування тонкого точіння, шліфування, методів поверхнево-пластичного деформування, алмазного вигладжування, а також комбінованих способів зміцнення — фрикційного електроімпульсного модифікування та алюмотермії. Проведено порівняльний аналіз ефективності методів за критеріями точності, шорсткості, твердості та зносостійкості оброблених поверхонь. Встановлено, що використання комбінованих методів обробки сприяє значному підвищенню довговічності виробів машинобудування.*

***Ключові слова:** опоряджувальна обробка; поверхневе зміцнення; тонке точіння; шліфування; обкатування; алмазне вигладжування; електроімпульсне модифікування; алюмотермія.*

***Abstract:** The article analyzes technological methods of finishing the external surfaces of parts such as bodies of revolution to enhance their operational characteristics throughout the product life cycle. The application of fine turning, grinding, surface plastic deformation methods, diamond burnishing, and combined strengthening techniques such as frictional electro-impulse modification and aluminothermy is considered. A comparative analysis of the effectiveness of the methods is carried out based on the criteria of accuracy, surface roughness, hardness, and wear resistance. It is established that the use of combined processing methods significantly improves the durability of machine-building products.*

***Keywords:** finishing treatment; surface strengthening; fine turning; grinding; burnishing; diamond burnishing; electro-impulse modification; aluminothermy.*

Технологічний процес виготовлення деталей типу тіл обертання повинен забезпечити виконання наступних завдань: забезпечення геометричних параметрів (розмірів та форми) з заданою точністю та фізико-механічних властивостей поверхні деталі. Вирішення цих завдань може бути досягнуто використанням операцій механічної обробки як з використанням лезової або абразивної обробки, так з використанням методів поверхнево-пластичного деформування [1].

Метою роботи є дослідження технологічних методів опоряджувальної обробки зовнішніх поверхонь деталей типу тіл обертання.

Для фінішної обробки робочих поверхонь використовують операції тонкого точіння, шліфування, обробку методами поверхнево-пластичного деформування [2].

Операції тонкого точіння виконують на обладнанні підвищеної точності з використанням різців. Основною вимогою є висока жорсткість

металорізального обладнання. Різальні пластини виготовляються з твердого сплаву марок Т15К6, Т30К4. Тонке точіння виконується при швидкості різання 150-200 м/хв, подачі 0,1-0,15 мм/об. Досягається точність 6-7 квалітетів та шорсткість  $Ra = 0,8-2,5$  мкм.

Шліфування зовнішніх поверхонь деталей типу тіл обертання виконується на круглошліфувальних верстатах. Основними перевагами круглого зовнішнього шліфування є висока точність геометричних параметрів та висока якість поверхні. Недоліками шліфування є висока вартість реалізації процесу; низька продуктивність; неможливість шліфування канавок; висока температура в зоні шліфування, що при недостатньому охолодженні може вплинути на якісні показники поверхневого шару (наявність припиків та мікротріщин). Точність після чистового шліфування досягає 6-7 квалітетів, шорсткість  $Ra = 0,32-1,6$  мкм.

Методи поверхнево-пластичного деформування характеризуються тим, що в процесі виконання технологічного переходу з поверхні деталі не видаляється стружка, а відбувається зміцнення поверхневого шару за рахунок дії інструмента – накатника.

Накатники як деформуючі елементи мають або шарики або ролики, що виготовляються з якісних інструментальних сталей. Обкатування виконують на токарно-гвинторізних верстатах.

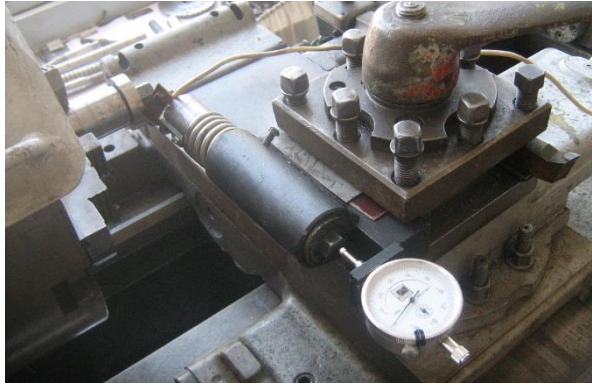
Обкатування шариками або роликами забезпечує точність розмірів за 6...9-м квалітетами, параметр шорсткості  $Ra=0,16...0,8$  мкм. Поверхневий шар після обкатування має твердість, що збільшується на 20%. Глибина зміцнення становить 0,15-0,3 мм.

Алмазне вигладжування виконується на токарно-гвинторізних верстатах з використанням спеціального інструмента – вигладжувача з твёрдосплавним наконечником або зі штучного алмазу. Перевагами алмазного вигладжування є висока якість поверхні (шорсткість становить  $Ra=0,016...0,008$  мкм), підвищення зносостійкості поверхні в 1,2-1,5 рази. Недоліками алмазного вигладжування є висока вартість інструмента, необхідність достатньо жорсткого обладнання, обмеження в оброблюваних матеріалах (не обробляються надто тверді та надто м'які матеріали).

Останнім часом набувають поширення комбіновані способи, що дозволяють отримати зносостійкі покриття, що сприятимуть збільшенню життєвого циклу виробів.

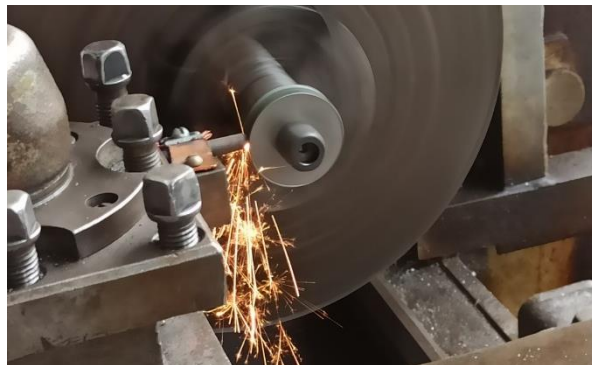
Одним з комбінованих методів обробки є фрикційне електроімпульсне модифікування дисульфідом молібдену [3]. Спосіб зміцнення полягає в нанесенні шару у вигляді твердої змазки з наступним вигладжуванням й одночасним пропусканням через зону обробки імпульсного струму прямокутної форми через зону контакту (рис. 1).

Результатом фрикційного електроімпульсного модифікування є насичення поверхні оксидом молібдену, що утворюється в результаті хімічної реакції.



*Рисунок 1 – Реалізація способу фрикційного електроімпульсного модифікування*

Другим способом є зміцнення робочої поверхні деталі методом алюмотермії на відкритому повітрі. Спосіб зміцнення полягає в насиченні хромом поверхневого шару сталеві деталі із використанням методу алюмотермії, який зніщується електричним імпульсом від електроду на відкритому повітрі (рис. 2) [4].



*Рисунок 2 – Реалізація способу зміцнення методом алюмотермії*

Результати металографічних досліджень свідчать про те, що досліджені методи забезпечують збільшення мікротвердості поверхні у 3 рази, глибина зміцненого шару 0,25 мм. Поверхневий зміцнений шар насичується хромом і алюмінієм після алюмотермії та молібденом після електроімпульсного вигладжування. Зносостійкість після електроімпульсного вигладжування збільшується в 1,8 рази, після алюмотермії – в 2 рази. Інтенсивність зношення поверхні після електроімпульсного вигладжування зменшується в 1,6 рази, після алюмотермії – в 1,8 рази.

## ВИСНОВОК

Використання технологічних методів опоряджувальної обробки зовнішніх поверхонь дозволяє забезпечити показники точності та якості поверхні, що сприяє збільшенню життєвого циклу виробів. Вибір того чи іншого методу повинен ґрунтуватися не тільки на технологічних можливостях методу, але й враховуватись собівартість.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". 2000. № 412. С. 3-11.

2 Технологія обробки типових деталей та складання машин: конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / укл. : С. В. Ковалевський, С. Г. Онищук. Краматорськ – Тернопіль : ДДМА, 2023. 132 с.

3 Тулупов В.І., Онищук С.Г. Дослідження зносостійкості металевих зразків після електроімпульсного вигладжування з модифікуванням поверхні // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 грудня 2020 р., Краматорськ, 2020. С. 89.

4 Тулупов В., Онищук С. Дослідження методу поверхневого зміцнення деталей із використанням алюмотермії // Технічні науки та технології. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. № 2(24). С. 17-22. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-17-22](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22).

**Николаєнко О.Ю., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ НАРІЗАННЯ КОНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

**Анотація:** У статті розглянуто технологічні методи нарізання прямих зубів конічних зубчастих коліс. Проаналізовано особливості методів копіювання та обкатування, а також сучасні технології нарізання, зокрема метод Invomilling™ компанії Sandvik Coromant. Розкрито вплив технології виготовлення на кінематичну точність і довговічність зубчастих передач. Зроблено висновок про доцільність використання сучасних методів обробки для забезпечення надійної роботи механізмів протягом життєвого циклу виробів.

**Ключові слова:** конічні зубчасті колеса; нарізання зубів; метод копіювання; метод обкатування; зубостругання; кінематична точність; життєвий цикл виробів.

**Abstract:** The article discusses technological methods for cutting straight teeth of bevel gears. The features of copying and generating methods are analyzed, along with modern cutting technologies, particularly the Invomilling™ method by Sandvik Coromant. The impact of manufacturing technology on the kinematic accuracy and durability of gear transmissions is revealed. It is concluded that the application of advanced processing methods ensures reliable operation of mechanisms throughout the product life cycle.

**Keywords:** bevel gears; gear cutting; copying method; generating method; gear shaping; kinematic accuracy; product life cycle.

Одним з головних завдань, що забезпечують життєвий цикл зубчастих коліс, та виробів, до складу яких вони входять, є технологічні методи їх виготовлення та контролю. Особливістю конічних зубчастих коліс є розташування зубів на конічній поверхні, які входять в зачеплення з іншим зубчастим колесом під кутом  $90^{\circ}$ .

Технологічні способи обробки зубчастих коліс досліджувались Н.С. Равською, О.О. Ключко, О.А. Охріменко та іншими дослідниками [1 - 3]. Виготовлення конічних зубчастих коліс вимагає чіткого дотримання технологічного процесу, що дозволяє збільшити довговічність поверхонь зубів зубчастих коліс, й тим самим збільшити життєвий цикл виробів.

Метою роботи є дослідження технологічних методів нарізання та контролю конічних зубчастих коліс.

Формоутворення зубів конічних зубчастих коліс можна виконати за двома методами: копіювання та обкатування.

Сутність методу копіювання полягає в тому, що форма різального інструменту повторює форму западини між зубами [4]. При нарізанні зубів зубчастих коліс головний рух різання – обертальний – отримує різальний інструмент, рух подачі частіше отримує інструмент.

Для нарізання прямозубих конічних коліс метод копіювання реалізовується за допомогою модульної дискової або пальцевої фрез. Спосіб нарізання має такі недоліки, як низька продуктивність та невисока кінематична точність (9-10-а). Перший недолік викликаний необхідністю переривати процес нарізання кожного разу по завершенню прорізання западини й відводити фрезу, другий недолік пов'язаний з виготовленням фрез комплектом для певного діапазону зубів певного модуля. Саме тому

цими різальними інструментами нарізають зуби конічних коліс в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Метод обкатування – це метод, при якому різальний інструмент та деталь отримують погоджені рухи, що відтворюють зачеплення зубчастого колеса з черв'яком, зубчастого колеса та зубчастої рейки, зубчастого колеса з іншим зубчастим колесом. Для конічних зубчастих коліс метод відтворює уявне зачеплення двох конічних коліс – одне з яких є заготовкою, а інше є уявним колесом, що реалізується відповідними рухами різального інструмента [4].

Найбільш відомим методом, що реалізує метод обкатування для нарізування конічних коліс з прямим зубом, є зубостругання. Сутність методу полягає в тому, що деталь встановлюється на оправці на поворотну бабку й отримує круговий рух подачі. Головний рух різання – зворотно-поступальний – виконують два різці. Після нарізування першого зуба бабка переміщається в вихідне положення й повертається на один кутовий крок. Процес обробки повторюється для наступного зуба колеса [4].

Нарізання конічних зубчастих коліс двома дисковими фрезами значно продуктивніше, чим зубостругання. Нарізання може бути виконане методом обкатування, врізання та комбінованим [5]. При методі обкатування прямолінійні різальні кромки інструмента крім обертання здійснюють спільно з оброблюваним колесом узгоджений рух у вертикальній площині, в результаті якого вони відтворюють бічні поверхні зубів оброблюваного колеса й формують його профіль. Під час обробки фрези не переміщуються вздовж зуба колеса, тому дно западини зуба має трохи увігнуту поверхню (рис. 1).



*Рисунок 1 – Схема нарізання двома дисковими фрезами*

Компанія Sandvik Coromant пропонує технологію Invomilling™ [6]. Особливістю технології є те, що з кінематичної точки зору метод схожий на метод обкатування, з тією лише різницею, що на 5-координатному токарному центрі можлива безперервна обробка, інструмент "загортає" кожну шестірню назад, не імітуючи зачеплення.

Sandvik Coromant пропонує універсальний асортимент інструментів для обробки зовнішнього профілю зуба і модулів, що включає фрези серій CoroMill 161 і CoroMill 162 (рисунок 2). Простота налаштування та програмування, невеликі розміри інструменту та можливість обробки зубів колеса модулем  $m=12$  дозволяють використовувати цей метод в дрібносерійному та одиничному виробництві.



Рисунок 2 – Обробка дисковими фрезами серії CoroMill

Всі розглянуті методи нарізання конічних зубчастих коліс дозволяють отримати зубчасті колеса, які після термічної та опоряджувальної обробки будуть забезпечувати надійну роботу механізмів протягом життєвого циклу.

## ВИСНОВОК

Нарізання конічних зубчастих коліс методом копіювання або методом обкатування, особливо з використанням сучасних технологій та інструмента, дозволяє забезпечити достатньо високі показники кінематичної точності. Термічна та опоряджувальна обробки, виконані після зубонарізання забезпечать надійну роботу механізмів протягом життєвого циклу.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1 Равська Н. С. *Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці* / Н. С. Равська, П. П. Мельничук, Т. П. Ніколаєнко, О.А. Охріменко. К.: Вид. СКД-Друк, 2013. 215 с.

2 *Технологія ремонту та відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки* / Клочко О. О. [та ін.] // *Dynamics of the development of world science : Abstracts of the 6th International scientific and practical conference (February 19-21, 2020)* Perfect Publishing / ed. Komarytskyu M. L. – Vancouver, Canada, 2020. P. 628-635.

3 Охріменко О.А. *Розширення технологічних можливостей верстатів для нарізання конічних коліс з круговим зубом зі збільшеною зовнішньою конусною відстанню* / Охріменко О.А. та ін. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т».* — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 1 (2022). – С. 74–80.

4 *Технологія обробки типових деталей та складання машин: конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»* / укл. : С. В. Ковалевський, С. Г. Онищук. Краматорськ – Тернопіль : ДДМА, 2023. 132 с.

5 *Нарізання двома дисковими фрезами* [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/16988130/page:3/>

6 Sandvik Coromant [Електронний ресурс]. URL: <https://www.sandvik.coromant.com>



**Новіков Ф. В.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

## РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВИСОКОТОЧНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ

***Анотація.** Обґрунтовано умови суттєвого підвищення точності, якості та продуктивності механічної обробки шляхом зменшення енергоємності обробки – зменшення інтенсивності тертя інструмента із оброблюваним матеріалом. При цьому найбільшого ефекту досягнуто в умовах високошвидкісного різання із застосуванням металорізальних верстатів із числовим програмним керуванням типу «обробний центр» та твердосплавних і керамічних ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями.*

***Ключові слова:** високошвидкісне різання; енергоємність обробки; тертя інструмента; точність обробки; якість обробки; продуктивність обробки; верстати з ЧПК; твердосплавний інструмент; керамічний інструмент; зносостійкі покриття.*

***Abstract.** The conditions for a significant increase in the accuracy, quality and productivity of machining by reducing the energy intensity of machining - reducing the intensity of friction of the tool with the material being machined - are substantiated. The greatest effect is achieved in conditions of high-speed cutting using metal-cutting machines with numerical program control of the "machining center" type and carbide and ceramic cutting tools with wear-resistant coatings.*

***Keywords:** high-speed cutting; processing energy consumption; tool friction; machining accuracy; machining quality; machining productivity; CNC machines; carbide tools; ceramic tools; wear-resistant coatings.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Підвищення ефективності механічної обробки деталей машин є одним із основних напрямів розвитку сучасного машинобудування і створення конкурентоспроможної продукції. Особливо це відноситься до встановлення оптимальних технологічних рішень механічної обробки високоточних машинобудівних виробів із застосуванням сучасних металорізальних верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) типу «обробний центр» та високопродуктивних збірних ріжучих твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями, які набули широкого застосування.

В даний час накопичено значний практичний досвід механічної обробки деталей машин. Однак, наука про різанні матеріалів, як і 100 років тому, заснована на емпіричних знаннях, які не дають узагальнюючих технологічних рішень. У результаті практика випереджає теорію. Це значно звужує можливості розроблення ефективних наукомістких технологічних процесів обробки матеріалів різанням. Крім того, застосування застарілого технологічного обладнання на машинобудівних підприємствах України і застарілих методів проектування технологічних процесів не дозволяють забезпечити виготовлення конкурентоздатної машинобудівної продукції та вимагають пошуку нових шляхів розвитку сучасного машинобудівного

виробництва. Тому актуальним є завдання суттєвого підвищення техніко-економічних показників механічної обробки високоточних машинобудівних виробів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, 2] наведено основні теоретичні підходи до розроблення високоефективних технологічних процесів механічної обробки деталей машин із урахуванням вимог до якості, точності, продуктивності, собівартості та трудомісткості. При цьому значну увагу приділено визначенню параметрів силової та теплової напруженості процесу різання [3, 4]. Однак повною мірою це завдання не вирішено із-за його складності. Є лише часткові емпіричні рішення, справедливі для окремих умов обробки. Це пов'язано із тим, що відомі методики визначення параметрів силової та теплової напруженості процесу різання та оптимальних режимів різання засновані на результатах експериментальних досліджень, які не дозволяють в узагальненому вигляді визначити параметри силової та теплової напруженості процесу різання. Показано також, що під час проектування технологічних процесів операційно-маршрутної технології (вибору найбільш ефективних методів обробки) технологи-проектувальники традиційно чисто інтуїтивно спираються лише на свій власний досвід, а не на теорію, що, безперечно, не відповідає сучасним вимогам ринкової економіки щодо створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції. Це вказує на те, що і зараз відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимальних методів і параметрів механічної обробки (включаючи процеси різання лезовими і абразивними інструментами) під час проектування операційної та більш складної маршрутної технології [5, 6].

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** До недостатньо вирішених частин загальної проблеми слід віднести питання аналітичного визначення з єдиних теоретичних позицій параметрів силової і теплової напруженості процесів лезової і абразивної обробки (сили і температури різання, енергоємності і точності обробки). Це важливо для встановлення та обґрунтованого вибору найбільш ефективних методів механічної обробки і визначення оптимальних умов обробки за критеріями точності, якості, продуктивності та розроблення на їх основі конкурентоздатних технологічних процесів високоточної механічної обробки.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою роботи є встановлення нових науково обґрунтованих оптимальних узагальнюючих технологічних рішень, які забезпечують вибір найефективніших методів високоточної механічної обробки у широких діапазонах зміни технологічних параметрів, чого не можна досягнути із застосуванням лише експериментально встановлених результатів досліджень.

Задачі дослідження:

1) розроблення математичних моделей механічної обробки та визначення оптимальних методів і параметрів обробки, обґрунтування технологічних можливостей процесів різання лезовими і абразивними інструментами;

2) створення та впровадження у виробництво високопродуктивних та високоточних технологічних процесів обробки матеріалів різанням.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналітично з нових теоретичних позицій [7, 8] визначено сили і температуру різання. Обґрунтовано умови їх зменшення через управління інтенсивністю тертя в зоні різання та вибору раціональних параметрів ріжучих інструментів і режимів різання. Показано, що складові сили різання і енергоємність тим менше, а точність і продуктивність оброблення тим більше, чим більше коефіцієнт різання, який визначається відношенням тангенціальної і радіальної складових сили різання. При цьому визначальним у зменшенні сили і температури різання є суттєве зменшення енергоємності обробки через зменшення інтенсивності тертя інструмента із оброблюваним матеріалом у зоні різання. Найбільший ефект досягається в умовах високопродуктивного високошвидкісного різання із застосуванням сучасних металорізальних верстатів із ЧПК типу «обробний центр» та твердосплавних і керамічних ріжучих лезових інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Доведено, що завдяки цьому продуктивність обробки можна збільшити до 10 разів та у стільки ж разів зменшити собівартість обробки за умов забезпечення високих показників якості і точності обробки. Особливо це відноситься до операцій високошвидкісного фрезерування виробів, виготовлених із матеріалів із підвищеними фізико-механічними властивостями. У результаті машинобудівна продукція, що виготовляється, стає конкурентоспроможною й виходить на міжнародні науково-технічні та промислові ринки.

Завдяки теоретично встановленим оптимальним умовам обробки високоточних машинобудівних виробів під час фінішної обробки вдалося виключити із діючих технологічних процесів малопродуктивні операції шліфування та абразивної обробки, замінити їх фінішними високопродуктивними операціями точіння, розточування, фрезерування із застосуванням сучасних ріжучих твердосплавних і керамічних інструментів. Це дозволило суттєво зменшити енергоємність обробки та, відповідно, сили і температуру різання, у 2 – 3 рази зменшити трудомісткість обробки та одночасно підвищити точність і продуктивність, забезпечити бездефектну лезову обробку.

Особливим ефектом обробки стало забезпечення високої точності обробки, чого не досягалося за діючими технологіями. Тому під час виготовлення складних корпусних деталей, які раніше вимагали до 100 операцій механічної обробки (особливо фінішної обробки), завдяки застосуванню нових розроблених технологій та сучасного обладнання кількість операцій скоротилася до 2 разів.

Проведено теоретичне порівняння пружних переміщень, виникаючих під час свердління та розточування отворів, які головним чином визначають точність обробки. Показано, що досягти підвищення точності обробки отворів під час свердління можна шляхом здійснення кожного наступного проходу свердлами більших діаметрів, а під час розточування – шляхом знімання припуску за один або кілька проходів інструменту (для

забезпечення точності розміру оброблюваного отвору) та збільшення кількості проходів інструменту (для забезпечення співвісності отвору). Достовірність отриманих теоретичних рішень експериментально підтверджено розробленням ефективних технологічних процесів механічної обробки різьбового отвору в горловині балона та високопродуктивного високошвидкісного фрезерування отворів та дугових пазів шириною 2,5...5,0 мм у деталях із загартованих сталей твердістю HRC 51...56 із застосуванням сучасних високооборотних верстатів із ЧПК типу «Рісомах 60». У результаті забезпечено високу точність обробки – відхилення від циліндричності змінюється у межах 0,01 мм, чого не досягалося за діючими технологіями, збільшено у 2,5 рази продуктивність обробки та у 4 рази стійкість кінцевих фрез [9, 10].

На цій основі встановлено оптимальні технологічні рішення механічної обробки високоточних машинобудівних виробів, включаючи оптимальні параметри режиму різання та характеристики ріжучих інструментів, а також нові технологічні рішення щодо структурно-параметричного аналізу і синтезу технологічних процесів, вибору оптимального варіанту технологічного маршруту і параметрів технологічних операцій. Це дозволяє з єдиних позицій аналітично описати основні технологічні процеси механічної обробки матеріалів різанням та на якісно новому фундаментальному рівні розкрити їх фізичні закономірності й обґрунтувати технологічні можливості. Це також дозволяє визначити нові наукові напрями в управлінні, оптимізації і проектуванні технологічних процесів механічної обробки матеріалів, що значно підвищує науково-технічний рівень технологічних процесів обробки матеріалів, які впроваджуються у виробництво, особливо високоточних виробів, виготовлених із важкооброблюваних матеріалів, для авіаційної та інших наукомістких галузей промисловості.

Ефекту обробки досягнуто також завдяки тому, що під час проектування операційно-маршрутної технології (вибору найбільш ефективних методів обробки) технологи-проектувальники почали застосовувати встановлені нові теоретичні технологічні рішення. Тому вирішення питань проектування технологічних процесів обробки завдяки отриманим технологічним рішенням стало надзвичайно важливим саме зараз, коли промислові підприємства отримали сучасні закордонні високооборотні верстати із ЧПУ типу «обробний центр» та комп'ютерну техніку, за допомогою яких можна автоматизувати проектні роботи, розробляти оптимальні варіанти операційно-маршрутної технології, спираючись на нові теоретичні рішення, та виконувати на їх основі кількісні розрахунки технологічних параметрів обробки. Це також допомогло вирішити важливі питання модернізації виробництва на машинобудівних підприємствах України та їх оснащення новим технологічним обладнанням і механічними технологіями (рис. 1 [5 – 8]).



Рисунок 1 – Обкладинки нових монографій з механічної обробки

Результати роботи впроваджено в діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «ВАРІТЕК» (м. Дніпро) та отримали застосування у навчальному процесі Харківського національного університету імені Семена Кузнеця під час вивчення дисциплін технологічного спрямування.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розроблено високоефективні технології механічної обробки на верстатах із ЧПК типу «обробний центр», що дозволило практично втілити у промислові

виробництва високопродуктивний метод обробки – високошвидкісне різання збірними твердосплавними і керамічними ріжучими інструментами зі зносостійкими покриттями. Це забезпечує підвищення до 10 разів продуктивність обробки із забезпеченням високих показників точності та якості оброблюваних поверхонь деталей машин, що є основою проведення модернізації сучасних виробництв машинобудівних підприємств, створення конкурентоспроможної продукції та отримання підприємствами прибутку від її реалізації.

Перспективами подальших досліджень слід розглядати більш точне аналітичне визначення енергоємності механічної обробки, включаючи лезову і абразивну обробку, що визначає основні фізичні і технологічні параметри обробки та найбільше впливає на вибір оптимальних умов обробки.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Технологія машино- та приладобудування: підручник* / О. В. Якимов, В. І. Марчук, П. А. Лінчевський, О. О. Якімов, В. П. Ларшин. Луцьк: ЛДТУ, 2005. 710 с.
2. *Теплофізика механічної обробки : підручник* / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Юргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
3. *Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Харків, 2021. 41 с.*
4. *Лавріненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник* / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков / Під заг. ред. академіка НАНУ М. В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
5. *Новіков Ф. В. Інноваційні рішення та технології металообробного виробництва [Електронний ресурс] : монографія* / Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх, Д. Ф. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2023. 342 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/29025>
6. *Новіков Ф. В. Теоретичні основи фінішної механічної обробки [Електронний ресурс] : монографія* / Ф. В. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2023. 340 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/29189>
7. *Новіков Ф. В. Оптимальні рішення в технологіях механічної обробки [Електронний ресурс] : монографія* / Ф. В. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2024. 360 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32125>
8. *Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія* / Ф. В. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2024. 460 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/34842>
9. *Новіков Ф. В. Інноваційні технології та їх застосування : навчальний посібник* / Ф. В. Новіков, Д. Ф. Новіков, В. О. Жовтобрюх. Дніпро: ЛІРА, 2024. 628 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/33683>
10. *Новіков Ф. В. Технології створення машин : навчальний посібник* / Ф. В. Новіков, Д. Ф. Новіков, В. О. Жовтобрюх. Дніпро: ЛІРА, 2023. 484 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30539>

Новосельцев М.М., Онищук С.Г., Тулупов В.І. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ВИКОРИСТАННЯ ОПОРЯДЖУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

**Анотація:** У статті досліджено використання опоряджувальних операцій при виготовленні циліндричних зубчастих коліс з метою підвищення їх зносостійкості та довговічності. Розглянуто методи лезової, абразивної обробки та поверхнево-пластичного деформування, зокрема чистове фрезерування, шліфування, хонінгування та вібраційне обкатування. Показано, що застосування віброобробки дозволяє створити регулярний мікрорельєф на робочих поверхнях зубів, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя і підвищенню зносостійкості пар тертя в 2 рази, що значно збільшує життєвий цикл зубчастих передач.

**Ключові слова:** циліндричні зубчасті колеса; опоряджувальні операції; чистове фрезерування; шліфування; хонінгування; вібраційне обкатування; поверхнево-пластичне деформування; зносостійкість.

**Abstract:** The article investigates the use of finishing operations in the manufacturing of spur gears to enhance their wear resistance and durability. Methods of cutting, abrasive processing, and surface plastic deformation, including fine milling, grinding, honing, and vibratory burnishing, are discussed. It is shown that the application of vibratory treatment enables the formation of a regular microrelief on the working surfaces of the gear teeth, which reduces the friction coefficient and increases the wear resistance of friction pairs by a factor of two, significantly extending the service life of gear transmissions.

**Keywords:** spur gears; finishing operations; fine milling; grinding; honing; vibratory burnishing; surface plastic deformation; wear resistance.

Однією зі складових, що впливають на тривалість життєвого циклу циліндричних зубчастих коліс, є стан поверхні зубів, що отриманий після виконання технологічних операцій нарізання та опорядження. Важливою складовою при цьому є наявність, величина та глибина зміцненого шару, а також шорсткість поверхні зубів зубчастих коліс.

Технологічні способи опоряджувальної обробки зубчастих коліс досліджувались О.Д. Клименко, Н.С. Равською, Л.М. Лубенською, О.О. Ключко та іншими дослідниками [1 - 3]. Використання опоряджувальних способів дозволяє збільшити зносостійкість та довговічність поверхонь зубів зубчастих коліс, тобто збільшити життєвий цикл виробів машинобудування.

Метою роботи є дослідження використання опоряджувальних операцій при виготовленні циліндричних зубчастих коліс.

Опоряджувальні способи обробки зубів зубчастих коліс використовуються для створення поверхневого шару, що має твердість та глибину, що мають забезпечити зносостійкість та довговічність експлуатації зубчастого колеса; при цьому внутрішня структура металу залишається без змін.

Традиційно опоряджувальні методи поділяються на способи лезової, абразивної обробки та способи обробки без зняття стружки (поверхнево-пластичного деформування).

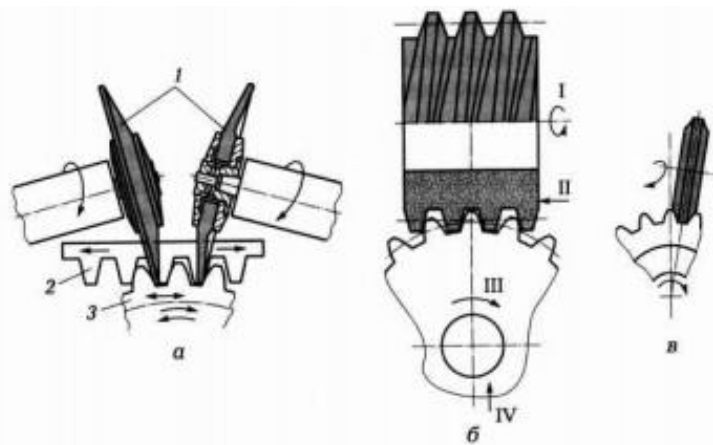
До способів лезової обробки відносяться, зокрема, чистове фрезерування загартованих зубів зубчастого колеса дисковою фрезою двостороннього різання [3]. Особливістю даного способу є використання спеціальної дискової фрези двостороннього різання, оснащеної пластинами

з кераміки марки ВОК-71. Даний спосіб дозволяє обробляти загартовані зубчасті колеса HRC 50-55. Дискава фреза двостороннього різання дозволяє обробляти колеса модулем  $m = 20$  мм. Обробка виконується на зубофрезерному верстаті. Відмінною особливістю фрези двостороннього різання є наявність другого ряду ріжучих пластин, зміщених щодо першого ряду на половину окружного кроку. В процесі обробки спочатку одним рядом пластин обробляють одну з бічних поверхонь зубів колеса, наприклад, праву, а потім, після реверсу колеса і напрямки тангенціального переміщення каретки з інструментом, обробляють другу – ліву бічну поверхню. Така конструкція дискової фрези дозволяє скоротити номенклатуру зуборізних інструментів і економити допоміжний час на переустановлення інструменту.

До способів опоряджувальної обробки з використанням абразивних матеріалів належать шліфування та хонінгування зубчастих коліс.

Шліфування зубів зубчастих коліс може виконуватись або за методом копіювання або за методом обкатування [4]. Шліфування за методом копіювання полягає в тому, що шліфування виконується профільним кругом, форма якого повторює форму евольвенти (рис. 1, в). Шліфувальний круг виконує обробку однієї западини між зубами знімаючи припуск з кожної сторони зубів одночасно. В подальшому відбувається поворот колеса й процес шліфування повторюється.

Шліфування за методом копіювання виконується або двома тарілчастим кругами (рис. 1, а) або черв'ячним шліфувальним кругом (рис. 1, б).



*а – двома тарілчастими кругами (методом обкатування); б – абразивним черв'яком (методом обкатування); в – профільним кругом (методом копіювання)*

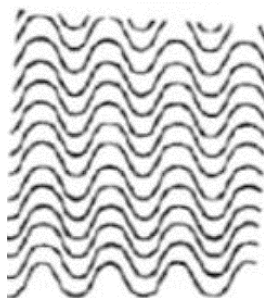
*Рисунок 1 – Схеми зубошліфування*

Шліфування за методом обкатування відтворює зачеплення колеса та рейки (див. рис. 1, а) або колеса та червяка (див. рис. 1, б) з накладенням додаткових рухів – головного (обертання шліфувального круга) та рухів подач (колеса та інструмента).

До способів опоряджувальної обробки зубів зубчастих коліс без зняття стружки (поверхнево-пластичного деформування) належить вібраційне обкатування [5]. Основою вібраційного зміцнення є динамічний характер протікання процесу, що супроводжується безліччю мікроударів



робочого інструмента або частинок робочого середовища по поверхні оброблюваних деталей. Метою обробки зубчастих коліс за даним методом є утворення на робочих поверхнях зубів системи синусоїдальних канавок, показаних на рис. 2.



**Рисунок 2 – Система синусоїдальних канавок на робочій поверхні зубів**

Обробка поверхнево-пластичним деформуванням з застосуванням вібраційних коливань обробного інструменту забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні.

Це відбувається за рахунок циклічного впливу на деталь, що обробляється через робочий інструмент. Мікрорельєф, сформований віброобробкою, підвищує плавність роботи рухомого сполучення за рахунок зниження коефіцієнта тертя в 1,6 ... 2,2 рази. Створення регулярного мікрорельєфу на обох поверхнях пари тертя підвищує зносостійкість сполучення в середньому в 2 рази.

## **ВИСНОВОК**

Використання опоряджувальних операцій при обробці циліндричних зубчастих коліс дозволяє збільшити зносостійкість та довговічність поверхонь зубів зубчастих коліс. Використання віброобробки дозволяє створити регулярний мікрорельєф поверхонь, підвищити плавність роботи з'єднання двох коліс за рахунок зниження коефіцієнта тертя в 1,6...2,2 рази.

## **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1 Клименко О.Д. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів зміцнювача на силу деформування при зміцненні зубчастих коліс загартованими кульками / О.Д. Клименко, Е.Л. Селезньов Е.Л., В.С. Пуць // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2014, №1 С. 62-67.

2 Равська Н. С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська, П. П. Мельничук, Т. П. Ніколаєнко. К.: Вид. СКД-Друк, 2013. 215 с.

3 Технологія ремонту та відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки / Клочко О. О. [та ін.] // *Dynamics of the development of world science : Abstracts of the 6th International scientific and practical conference (February 19-21, 2020) Perfect Publishing / ed. Komarytskyu M. L. – Vancouver, Canada, 2020. P. 628-635.*

4 Технологія обробки типових деталей та складання машин: конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / укл. : С. В. Ковалевський, С. Г. Онищук. Краматорськ – Тернопіль : ДДМА, 2023. 132 с.

5 Паніна В.В., Дашивець Г.І., Новік О.Ю. Оброблення робочих поверхонь зубчастих коліс поверхнево-пластичним деформуванням. Науковий вісник ТДАТУ. Вип. 10, том 2. Мелітополь, ТДАТУ, 2020. С.110-117.

**Онищак А., Стецько А.Є.,** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## **ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ІНСТРУМЕНТІВ**

**Анотація:** У статті проведено аналіз сучасних методів поверхневого зміцнення деталей машин та інструментів для підвищення їхнього експлуатаційного ресурсу. Розглянуто технології електронно-променевого, іонно-променевого, вакуумного, іонно-плазмового зміцнення, а також хіміко-термічної обробки та комбінованих методів дифузійного насичення. Проаналізовано переваги і недоліки різних методів, визначено напрямки їхнього ефективного застосування. Окрему увагу приділено комплексним технологіям, що поєднують кілька методів для створення високоміцних і зносостійких поверхневих шарів. Наведено рекомендації щодо вибору оптимальних технологій для виготовлення та відновлення деталей машин.

**Ключові слова:** поверхнєве зміцнення; дифузійне насичення; хіміко-термічна обробка; електронно-променеве напилення; іонно-плазмове напилення; вібраційне обкатування; електроіскрове легування; комбіновані технології.

**Abstract:** The article presents an analysis of modern surface strengthening methods for machine parts and tools aimed at enhancing their operational life. Technologies such as electron beam, ion beam, vacuum, ion-plasma treatment, chemical-thermal processing, and combined diffusion saturation methods are discussed. The advantages and disadvantages of various methods are analyzed, and directions for their effective application are outlined. Particular attention is paid to complex technologies that combine several methods to create high-strength and wear-resistant surface layers. Recommendations are provided for selecting optimal technologies for the manufacturing and restoration of machine parts.

**Keywords:** surface strengthening; diffusion saturation; chemical-thermal treatment; electron beam deposition; ion-plasma deposition; vibratory burnishing; electro-spark alloying; combined technologies.

**Постановка проблеми.** Сучасне виробництво ставить особливі вимоги до підвищення ресурсу і надійності роботи машин та механізмів. Покращення вказаних характеристик часто гальмується через відсутність достатньо надійних конструкційних матеріалів, які повинні поєднувати високу міцність, зносостійкість, корозійну стійкість тощо. Загальноприйнятим виходом з цієї ситуації є нанесення відповідних покриттів. Останні дослідження, присвячені одно- і багатокомпонентному насиченню металів і сплавів свідчать про ефективність багатофункціональних покриттів, до складу яких входять вуглець, титан, хром, бор та деякі інші елементи (В.Г. Хижняк, А.Я. Мовшович, Т.В. Лоскутова, М.В. Кіндрачук, Л.Ф. Головка, В.С. Коваленко, А.А. Углов, А. Bylica, David Pye, F. Cheng, Sivaprahasam D., S. Kocanda, L. Pawlowski T. Burakowski, С.Т. Kwok, F.T. Cheng, Н.С. Man, W.T. Tsai, R.N. Richman та інші). Сучасними розробками є електронно-променевий, іонно-променевий, вакуумний, іонно-плазмовий та інші методи нанесення зміцнювальних покриттів. Проте, вони технологічно складні, надзвичайно дорогі, потребують висококваліфікованого персоналу, а зміцнені поверхневі шари,

отримані вказаними методами, не завжди гарантують достатній рівень фізико-механічних властивостей.

Але, на сьогодні не розроблені фізико-хімічні засади зниження інтенсивності зношування з урахуванням закономірностей зміни структури і властивостей зносостійких шарів за умов експлуатації в різних за активністю середовищах, оскільки не вивчені механізми їх руйнування. Як правило не розглядається технологічний процес виготовлення і відновлення деталей із їх застосуванням та механічної обробки зміцнених шарів, їх якість з точки зору мінімізації припусків та відповідного зниження втрат металу та інструментальних матеріалів.

**Мета дослідження:** систематизувати та структурувати відомі методи зміцнення для оптимального і ефективного застосування в технологіях зміцнення поверхонь деталей машин та інструментів .

**Огляд літератури.** На даний момент розроблено технології, призначені для нанесення захисних, зносостійких та іншого призначення дифузійних покриттів на деталі і вироби, які використовуються в різних галузях техніки та народного господарства [1-5]. Технології базуються на способах хіміко-термічної обробки металів і сплавів в розплавах, порошках, комплексному способі хімічного осадження і наступної дифузійної металізації. Нанесення покриттів можна здійснювати в ізотермічному і неізотермічному режимах залежно від заданих параметрів і властивостей покриттів, що наносяться. Дані технології універсальні і дозволяють: наносити одно- і багатокомпонентні покриття на конфігуративно складні розвинуті поверхні з однієї ванни, наносити дифузійні покриття на деталі і вироби складної конфігурації, внутрішні поверхні малих перерізів. Дифузійним покриттям притаманні рівномірність за складом і товщиною, безпористість, висока адгезія до основи.

Протягом останніх років наукові інтереси вчених були спрямовані на вивчення механізмів руйнування гетерофазних металевих поверхонь, формування поверхонь тертя і їх топографії, формуванню зносостійких дифузійних покриттів з перехідними шарами на основі В, Cr, С, N; термодинамічному обґрунтуванню структурної стабільності модифікованих поверхонь в умовах тертя, розробку відповідного обладнання, яке б сприяло формуванню оптимальних за трибологічними характеристиками поверхонь тертя і не погіршувало інші службові характеристики матеріалу.

**Виклад основного матеріалу.** Серед методів відновлення деталей, що використовуються в реальному виробництві, згідно [6] є: поверхневе пластичне деформування, термічна обробка (поверхневе гартування), формування на поверхні металу білого шару, термомеханічні і газотермічні методи нанесення на поверхню металів і сплавів зміцнюючих покриттів, електрофізичні методи нанесення зміцнюючих покриттів, хімічні методи

нанесення покриттів, хіміко-термічна обробка, нанесення на поверхню металів і сплавів зносостійких евтектичних покриттів інші.

*Виготовлення і відновлення деталей плазмовим напиленням.* Згідно [6] цей спосіб нанесення металу найбільше відповідає сучасним вимогам, бо він забезпечує мінімальну глибину проплавлення основного металу, високу стійкість проти спрацювання, твердість, збереження фізико-механічних властивостей наплавленого металу, високу продуктивність, можливість нанесення чорних та кольорових металів на чавунні та сталеві деталі.

Для плазмового напилення застосовують гранульовані порошки зернистістю 50—150 мкм, леговані хромом, нікелем, кремнієм і бором, типу ПГ–ХН80СР2 і прості залізобуглецеві типу АПЖМ. Леговані порошки на нікелевій основі мають низьку температуру плавлення (980—1080°), добре змочують поверхню деталі. Твердість шару покриття, напиленого порошком ПГ–ХН80СР2, дорівнює HRC 35 – 40. Цей шар завдяки наявності кристалів боридів відзначається високою стійкістю проти спрацювання.

Як видно з вищенаведених даних, спосіб відновлення є досить затратний в часі і вимагає великих фінансових витрат.

*Детонаційно-газове напилення.* При зміцненні чи відновленні поверхонь деталей машин знайшло поширення детонаційно-газове напилення [6]. Суть процесу полягає в нанесенні порошку матеріалу на поверхню за допомогою напрямленого детонаційного вибуху горючої суміші. Даний метод скорочує час нагрівання при перенесенні частинок (зі швидкістю 800-1300 м/с) до тисячних (і менше) долей секунди. Твердість напилюваного матеріалу не перевищує 60 HRC, товщину вибирають в межах 0,005–1,5 мм. Перевагами детонаційно-газового напилення є висока якість отриманих покриттів ( $\sigma_a \geq 10$  МПа), можливість напилення на холодні поверхні деталей ( $T_{\text{вир}} \leq 473\text{K}$ ), помірне нагрівання відновлюваної деталі ( $T_{\text{вир}} \leq 573\text{K}$ ), досить висока продуктивність ( $\sigma = 1-10$  кг/год.), широка номенклатура матеріалів, що розпилюється і невисока чутливість до стану вихідної поверхні матеріалу.

Недоліками методу є ускладнене відновлення деталей із поверхневою твердістю  $60 \geq \text{HRC}$  та напилення порошоків з невисокою питомою масою (наприклад, карбіди титану), неможливість напилення внутрішніх поверхонь на глибину, що перевищує діаметр вихідного отвору, необхідність застосування герметичних боксів та дистанційного керування процесом, високий рівень шуму (140 дБ і вище), наявність відповідної кваліфікації працівників, висока вартість обладнання. Вищевказані недоліки роблять використання детонаційно-газового напилення при відновленні деталей машин досить обмеженим.

*Електрофізичні методи виготовлення і відновлення зміцнювальними покриттями.* Перспективними електрофізичними методами виготовлення і відновлення зміцнювальними покриттями різальних інструментів, що виготовлені із швидкорізальних сталей та твердих сплавів, та поверхонь деталей машин, що виготовлені із конструкційних сталей є методи іонно-плазмового реактивного напилення у вакуумі: метод реактивного електронно-променевого плазмового напилення (РЕП), метод активованого реактивного напилення (ARE – Aktivated Reaktive Evaporation), метод конденсації речовин з плазмової фази в умовах іонного бомбардування (КІБ, Sputtering) та інші [6].

Перевагами даних методів відновлення є: можливість отримання покриттів з хорошою адгезією практично для будь-яких пар «покриття-підкладка», забезпечення низької пористості і рівноважної структури покриттів без попереднього очищення і підігрівання, отримання різноманітних за товщиною покриттів на інструментах будь-якої конфігурації.

Недоліками електрофізичних методів відновлення зміцнювальними покриттями є потреба спеціального високовартісного обладнання та працівників високої кваліфікації, що значно звужує використання даних методів відновлення.

*Зміцнення поверхонь деталей електроіскровим легуванням.* Електроіскрове легування відноситься до електрохімічних способів і є найбільш ефективним серед них [6]. Електроіскровим способом нарощують і зміцнюють спряжені поверхні деталей.

Процес може відбуватися на повітрі та в рідкому середовищі. Процес електроіскрової обробки супроводжується безперервним іскрінням. Вібрація електрода сприяє виникненню електроіскрових розрядів. Застосовують електроди із чавуну або твердих сплавів (Т15К6, ВК3 тощо). Товщина нарощеного та зміцненого шару залежить від ємкості конденсаторів, напруги і сили струму. Під час застосування жорстких режимів товщина нарощеного і зміцненого шару збільшується, а чистота поверхні та твердість шару зменшуються. Твердість нарощеного шару деталей залежно від застосування електрода і режиму обробки може змінюватись у межах 6000 – 12000 МПа. Даним методом можна збільшити діаметр посадочного місця на 0,05 мм, хоча поверхня в такому випадку буде мати пори, дрібні раковини, а суцільність її після обробки становитиме не більше 35–90%, що розглядається як недолік даного способу відновлення поверхонь деталей машин. Недоліком даного методу є, також, висока шорсткість отриманих покриттів, високий рівень залишкових напружень, наявність пор та мікротріщин.

*Комбіноване електроіскрове та лазерне легування.* Метод використовується з метою усунення недоліків електроіскрових покриттів,

тому обробку ведуть з використанням лазерного опромінювання [7]. Електроіскрове легування проводять на установці типу «Елітрон», лазерну обробку проводять на імпульсній установці «Квант-15» при тривалості імпульсів  $4 \times 10^{-3}$  с, густині потужності 100–600 МВт/м<sup>2</sup> і діаметром плями 0,8–1,0 мм. Як електродний матеріал використовуються тверді сплави типу ТК, ТН-20 на основі карбиду титану і нікель молібденовою зв'язкою, ВК20У, Т15К6У (електроди на основі вольфраму і титану з додаванням вуглецю), евтектичними електродами системи Fe-Mn-C-W. У відновлених комбінованим електроіскровим та лазерним легуванням поверхонь деталей машин у 2 рази зменшується коефіцієнт тертя і у 3 рази збільшується зносостійкість.

*Магнітоелектричне легування.* Даний метод виготовлення і відновлення є ефективним для тонкостінних деталей діаметром до 300мм і довгомірних (до 1000мм), при якому забезпечується висока поверхнева твердість, добра зчеплюваність з основою, відсутність деформації та короблення [6]. Як легуючі найдоцільніше використовувати феросплави марок ФБО, ФБ-1 та інші. Мікротвердість магнітоелектричного покриття може сягати 28 ГПа. Оптимальними є товщини 300–700 мкм і твердістю покриття 14–22 ГПа. Особливо ефективними покриття є для деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування.

*Зміцнення спрацьованих поверхонь деталей машин дифузійним способом.* Попри велику кількість нових технологій, найпоширенішими до цього часу способами зміни якісної характеристики поверхонь деталей машин є хіміко-термічна обробка (ХТО). До її переваг можна віднести: широке впровадження у виробництві, наявність спеціалістів та обладнання, відчутний ефект від використання.

Методи ХТО, що застосовують на виробництві, ґрунтуються на збагаченні поверхневих шарів металів та сплавів тим чи іншим елементом або комплексом елементів [6]. При цьому здійснюється насичення сталі відповідним елементом (наприклад, вуглецем, азотом, алюмінієм, бором та ін.) шляхом його дифузії в атомарному стані із зовнішнього середовища при високій температурі.

Сучасні тенденції в розвитку машинобудування потребують нових технологій для створення на деталях машин зміцнювальних покриттів підвищеної зносостійкості [8-9]. Останнє особливо актуальне для так званих швидкозношуваних деталей. Такі технології дають змогу на порівняно дешевих матеріалах (наприклад, вуглецевих сталях) створювати зносостійкі зміцнювальні шари, не змінюючи при цьому структури серцевини деталі.

Незважаючи на велику різноманітність методів ХТО сталей та сплавів, більшість цих технологій спрямовані на створення твердих та крихких дифузійних покриттів на фізичній поверхні виробів. Для поверхневих шарів, покритих твердими фазами (бориди, нітриди і т.д.),

важко забезпечити високу працездатність через присутність великої кількості дефектів, що викликають значну концентрацію напружень. Так само з тієї ж причини важко забезпечити кінцеву обробку таких шарів, особливо враховуючи їх товщину (хромовані карбідні покриття товщиною 0,010–0,015 мм не дозволяють взагалі проводити механічну обробку поверхонь, зміцнених даним способом).

Таким чином, існує потреба в створенні та розвитку нових способів обробки деталей, які б задовольняли певні фізико-механічні та експлуатаційні вимоги і були вільними від недоліків, що притаманні існуючим видам хіміко-термічної обробки.

*Комплексні методи виготовлення і відновлення спрацьованих поверхонь деталей.* Із розвитком машинобудування і, відповідно, зростанням вимог до фізико-механічних та експлуатаційних властивостей деталей, поширюються комбіновані методи відновлення поверхонь деталей машин. Вони полягають в одночасному застосуванні двох чи більше способів поверхневої обробки для досягнення оптимальних результатів. Обробку, що здійснюється одночасно і послідовно декількома методами називають комплексною. Також, комбіновані методи можуть представляти як суміщення двох або більше відомих методів в одному технологічному процесі, так і послідовне застосування кожного з них окремо. На даний час розвиток комбінованих зміцнювальних методів розвивається в декількох основних напрямках.

Ряд досліджень пов'язані з одночасним використанням ХТО деталей з іншим видом обробки для отримання покриття певної структури та складу.

Проводяться розробки [10] зі створення та дослідження комбінованих технологічних процесів отримання матричнонаповнених мілі-, мікро- або нанодисперсними включеннями метало-порошкових формовок. Після ХТО КЕП були отримані композитні покриття складу Ni-TiV<sub>2</sub>, Ni-V-C. Покриття складу Ni-Cr-V, що мають будову нікелевої матриці, легованої хромом, з включеннями дрібнодисперсних боридів нікелю, отримували сумісним осадженням нікелю та частинок V та Cr з наступним відпалом у вакуумі. Другий тип електролітичного покриття містить тверді крупнозерністі включення TiC; TiV<sub>2</sub>.

Найвища зносостійкість серед отриманих даним способом композитних покриттів, навантажених силами тертя мають покриття, які складаються з нормально орієнтованих до поверхні тертя безперервних волоконподібних утворення або направлено кристалізованої евтектики. Вони можуть працювати в найважчих умовах трибоконтакту. Для лагідних режимів усталеного процесу тертя рекомендовано матричнонаповнені моно- і багатошарові КЕП, що містять крупнозерністі моно- і полідисперсні включення з тугоплавких металів у дифузійнолегованій нікелевій матриці. Для найлегших режимів тертя доцільно обирати дифузійнолеговані та

евтектично оплавлені КЕП градієнтного типу, розмір, кількість і розподіл включень котрих у матриці та легуючих її елементів за товщиною і по поверхні змінюється за певними законами.

Автори [11] рекомендують для розробки високоефективних технологій, що підвищують надійність та довговічність машин і механізмів використовувати концентровані джерела енергії. Основними факторами тут є стан поверхні, що визначає властивості поверхонь деталей та вузлів, що є вирішальним фактором при зростанні конкуренції та нарощуванні виробництва. Процес зміни стану і властивостей поверхні авторами названо „інженерією поверхні”, суть якої полягає у „розробці теорії науково обґрунтованого визначення форми робочих поверхонь, їхніх геометричних параметрів і фізико-хімічних властивостей, що забезпечують економічно доцільну довговічність та безвідмовність деталей машин та інструменту, а також технологічного створення таких поверхонь”. І далі вказують, що „зміцнення робочих поверхонь деталей та інструменту є одним із найбільш ефективних та дієвих способів збільшення ресурсу їхньої роботи”. Недоліками такого виду зміцнення є складність визначення оптимальних режимів поверхневого зміцнення конструктивними параметрами, що потребує значних затрат часу та матеріалів, а також наявністю вартісного обладнання та висококваліфікованих спеціалістів, що володіють даною технологією та мають достатні практичні навички та досвід.

## ВИСНОВКИ

Як видно з вищенаведених досліджень, розробки та дослідження відновлюваних покриттів, композитних дифузійних шарів підвищеної зносостійкості знаходяться на стадіях розробки та вдосконалення. У переважній більшості кінцевим результатом є утворення композитного шару з досить твердими включеннями значної крихкості (на базі хімічних сполук) і, в основному, малої товщини; технологія виготовлення деталей, зміцнених даним зносостійким композитним покриттям є досить складною та дорогою (наприклад, застосування лазерного оплавлення або створення композитних покриттів із дефіцитних складників та інші), що вимагає спеціального вартісного обладнання, висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Мовшович А. Я. *Некоторые вопросы развития высоких технологий в машиностроении* / А. Я. Мовшович // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 1/1 (13), – 2005. С. 43–46.
2. *Технологічне управління станом поверхневого шару у процесі точіння покриттів з аморфно-кристалічною структурою. [Електронний ресурс]* / Н. В. Новиков, Ю. О. Мельнічук, С. А. Клименко // *Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Stvm/2008\\_1/articles%5C10.htm](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Stvm/2008_1/articles%5C10.htm)*



3. *Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline WC-12Co consolidated by spark plasma sintering.* / Sivaprahasam, D., Chandrasekar, S.B., Sundaresan, R. [Електронний ресурс] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Volume 25, Issue 2, March 2007.– Pages 144-152 – Режим доступу до журналу: <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-33845907974&origin=inward&txGid=A2XmxgZbZ7kH5awS24j6oLE%3a6>
4. *Adventures in Surface Treatments.* [Електронний ресурс]. / David Pye. // *Industrial Heating* – May 29, 2009. – Режим доступу до журналу: [http://www.industrialheating.com/Articles/The\\_Experts\\_Speak\\_David\\_Pye/BNP\\_GUID\\_9-5-2006\\_A\\_1000000000000599322](http://www.industrialheating.com/Articles/The_Experts_Speak_David_Pye/BNP_GUID_9-5-2006_A_1000000000000599322)
5. Purushothaman Dinesh Babu, Gengusamynaidu Buvanashakaran, Karupuudaiyar R. Balasubramanian. EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF LASER TRANSFORMATION HARDENING OF LOWALLOY STEEL . – *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 36, No. 3, 2012, – P.241-258.
6. Голубець В.М. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів: [Навч. посібник] / Володимир Михайлович Голубець. – Львів: ВТФ «Друксервіс». – 2000. –178с.
7. Ботвинко В.П Підвищення працездатності інструменту з швидкоріжучих сталей ляхом комбінованого впливу електроіскрового легування та лазерної обробки: Автореф. дис. К.т.н. – Київ, ІПМ НАН України, 1998. –19с.
8. *Steels for Vacuum Carburizing and Structure of the Carburizing Layer after Low Pressure Carburizing.* [Електронний ресурс] / R. Gorockiewicz, Ph.D, University of Zielona Gora, Poland; A. Adamek, M. Korecki, // *SECO/WARWICK S.A., Swiebodzin, Poland* – Режим доступу: <http://www.industrialheating.com/IH/Home/Files/PDFs/SteelsforVacuumCarburizing.pdf>
9. *Adventures in Surface Treatments.* [Електронний ресурс]. / David Pye. // *Industrial Heating* – May 29, 2009. – Режим доступу до журналу: [http://www.industrialheating.com/Articles/The\\_Experts\\_Speak\\_David\\_Pye/BNP\\_GUID\\_9-5-2006\\_A\\_1000000000000599322](http://www.industrialheating.com/Articles/The_Experts_Speak_David_Pye/BNP_GUID_9-5-2006_A_1000000000000599322)
10. Luchka M.V. The strenghtening and reduction of surfaces of sliding by gradient coatingm / Luchka M.V., Kindrachuk M.V., Mechalovich Y.N. // *Problems of Tribology* – 2000, №2. – p.80-81.
11. *Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline WC-12Co consolidated by spark plasma sintering.* / Sivaprahasam, D., Chandrasekar, S.B., Sundaresan, R. [Електронний ресурс] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Volume 25, Issue 2, March 2007.– Pages 144-152 – Режим доступу до журналу: <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-33845907974&origin=inward&txGid=A2XmxgZbZ7kH5awS24j6oLE%3a6>

**Пелипинко О.О., Ковалевський С.В.,** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## **ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЧИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ**

**Анотація:** У статті розглянуто специфіку підготовки управляючих програм для верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ) в умовах воєнного часу. Проаналізовано основні проблеми та виклики, з якими стикаються підприємства машинобудівної галузі під час воєнних дій. Запропоновано методологічні підходи та технічні рішення для забезпечення стабільної роботи виробництва в критичних умовах, включаючи адаптацію програмного забезпечення, децентралізацію виробничих процесів та впровадження резервних систем. Представлено рекомендації щодо оптимізації процесів програмування верстатів з ЧПУ з урахуванням обмежень воєнного часу. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення стійкості виробничих підприємств до кризових ситуацій та забезпечення безперервності виробництва стратегічно важливої продукції.

**Ключові слова:** верстати з ЧПУ, управляючі програми, воєнний час, стійкість виробництва, оптимізація програмування, машинобудування, критична інфраструктура.

**Abstract:** The article examines the specifics of preparing control programs for computer numerical control (CNC) machines under wartime conditions. The main problems and challenges faced by enterprises in the machine-building sector during military operations are analyzed. Methodological approaches and technical solutions are proposed to ensure the stable operation of production under critical conditions, including software adaptation, decentralization of production processes, and the implementation of backup systems. Recommendations are provided for optimizing CNC programming processes, taking into account the constraints of wartime conditions. The research results can be utilized to enhance the resilience of manufacturing enterprises to crisis situations and ensure the continuity of production of strategically important products.

**Keywords:** CNC machines; control programs; wartime conditions; production resilience; programming optimization; machine building; critical infrastructure.

Сучасні геополітичні реалії свідчать про необхідність адаптації виробничих процесів до умов воєнного часу. Особливо гостро це питання постає для підприємств машинобудівної галузі, які забезпечують виробництво критично важливої продукції, включаючи компоненти військової техніки, медичного обладнання та інших стратегічно важливих виробів [1-5].

Верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ) є основою сучасного машинобудування, забезпечуючи високу точність, продуктивність та гнучкість виробництва. Однак, в умовах воєнного часу процес підготовки управляючих програм для таких верстатів стикається з низкою специфічних викликів, які потребують нестандартних рішень та адаптації існуючих методологій [1,2].

Метою даного дослідження є аналіз особливостей підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах воєнного часу та

розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності та стійкості виробничих процесів у кризових умовах.

Для оцінки ефективності запропонованих рішень використовувалися методи порівняльного аналізу та статистичної обробки даних.

Виклики підготовки управляючих програм в умовах воєнного часу

Аналіз функціонування машинобудівних підприємств в умовах воєнного часу дозволив виявити низку специфічних викликів, які впливають на процес підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПУ:

1. Обмеженість або відсутність доступу до інтернету та хмарних сервісів. Багато сучасних CAD/CAM систем використовують хмарні рішення та потребують постійного підключення до інтернету для повноцінного функціонування. В умовах воєнного часу такий доступ може бути обмеженим або повністю відсутнім.

2. Нестабільність електропостачання. Пошкодження енергетичної інфраструктури може призводити до відключень електроенергії, що ускладнює процес програмування та експлуатації верстатів з ЧПУ.

3. Кадрові проблеми. Мобілізація, евакуація або вимушена міграція кваліфікованих спеціалістів з програмування верстатів з ЧПУ створює дефіцит кадрів та необхідність швидкого навчання нових співробітників.

4. Проблеми з поставками комплектуючих та витратних матеріалів. Порушення логістичних ланцюгів ускладнює своєчасне отримання необхідних інструментів та матеріалів, що вимагає адаптації управляючих програм до наявних ресурсів.

5. Необхідність швидкого переналаштування виробництва. Зміна номенклатури продукції, що випускається, та необхідність швидкого освоєння нових виробів потребує оперативної підготовки управляючих програм.

6. Підвищені вимоги до безпеки даних. Ризики кібератак та фізичного пошкодження обладнання вимагають посилення заходів із захисту інформації та резервного копіювання управляючих програм.

Технічні рішення для підготовки управляючих програм в умовах воєнного часу

Для подолання зазначених викликів було розроблено комплекс технічних рішень, які дозволяють забезпечити ефективну підготовку управляючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах воєнного часу:

1. Впровадження автономних CAD/CAM систем. Для забезпечення незалежності від доступу до інтернету та хмарних сервісів рекомендується використання автономних CAD/CAM систем, які можуть функціонувати без зовнішніх підключень. Це дозволяє підприємству продовжувати підготовку управляючих програм навіть за умови повного відключення від мережі інтернет.

2. Децентралізація процесу підготовки управляючих програм. Розподіл процесу програмування між кількома спеціалістами та робочими станціями дозволяє знизити ризики, пов'язані з втратою обладнання або персоналу. При цьому доцільно використовувати єдину базу даних з управляючими програмами, яка регулярно синхронізується між всіма робочими станціями.

3. Впровадження системи резервного електропостачання. Для забезпечення безперервності процесу програмування та експлуатації верстатів з ЧПУ рекомендується встановлення автономних джерел електроенергії (генераторів, акумуляторних систем, сонячних панелей) з автоматичним перемиканням при відключенні основного живлення.

4. Розробка бібліотеки типових управляючих програм. Створення бази даних типових управляючих програм для найбільш поширених операцій дозволяє значно прискорити процес програмування за рахунок повторного використання та модифікації готових рішень.

5. Впровадження системи швидкого навчання програмуванню верстатів з ЧПУ. Розробка спрощених методик та інструкцій з програмування верстатів з ЧПУ дозволяє швидко підготувати нових співробітників та частково компенсувати дефіцит кваліфікованих кадрів.

6. Оптимізація управляючих програм для роботи з обмеженим набором інструментів. Адаптація програм до наявного інструменту та матеріалів дозволяє продовжувати виробництво навіть за умови порушення поставок.

7. Впровадження системи багаторівневого резервного копіювання. Регулярне створення резервних копій управляючих програм та їх зберігання на різних фізичних носіях у різних локаціях дозволяє забезпечити збереження даних навіть за умови фізичного пошкодження обладнання.

Методологічні підходи до організації процесу підготовки управляючих програм

Для забезпечення ефективної підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах воєнного часу розроблено наступні методологічні підходи:

1. Модульний підхід до розробки управляючих програм. Розбиття програм на окремі модулі, які можуть бути повторно використані або модифіковані, дозволяє прискорити процес програмування та спростити адаптацію до нових виробничих завдань.

2. Впровадження спрощених методик верифікації управляючих програм. Розробка процедур перевірки програм без використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє забезпечити якість програм навіть за умови обмеженого доступу до інструментів симуляції.

3. Розробка методик швидкого переналаштування виробництва. Створення алгоритмів та інструкцій для оперативного переходу на випуск нової продукції дозволяє забезпечити гнучкість виробництва в умовах мінливих потреб воєнного часу.

4. Впровадження системи пріоритезації виробничих завдань. Розробка критеріїв та процедур визначення пріоритетності виробничих завдань дозволяє оптимально розподілити обмежені ресурси та забезпечити виконання найбільш критичних замовлень.

5. Організація віддаленої підготовки управляючих програм. Створення можливості для розробки програм спеціалістами, які знаходяться за межами підприємства, дозволяє залучити кваліфіковані кадри, які з різних причин не можуть бути фізично присутніми на виробництві.

Практичні рекомендації з підготовки управляючих програм в умовах воєнного часу

На основі проведеного дослідження розроблено наступні практичні рекомендації для підприємств машинобудівної галузі:

1. Створення резервних копій всіх наявних управляючих програм на фізичних носіях (USB-накопичувачі, зовнішні жорсткі диски) та їх зберігання у захищених місцях, бажано в різних локаціях.

2. Впровадження системи документування процесу програмування, включаючи детальний опис всіх етапів створення управляючих програм, використовуваних інструментів та параметрів обробки.

3. Організація регулярних тренінгів для співробітників з питань програмування верстатів з ЧПУ, що дозволить розширити коло спеціалістів, здатних створювати та модифікувати управляючі програми.

4. Створення аварійних комплектів з автономними CAD/CAM системами на портативних комп'ютерах, які можуть бути швидко переміщені в безпечне місце у разі необхідності.

5. Впровадження системи швидкого обміну досвідом та знаннями між спеціалістами різних підприємств, що дозволить оперативно вирішувати нестандартні проблеми, які виникають в процесі програмування.

6. Розробка спрощених версій управляючих програм для критично важливих виробів, які можуть бути швидко адаптовані до різних моделей верстатів з ЧПУ.

7. Організація взаємодії з навчальними закладами для залучення студентів та викладачів до процесу підготовки управляючих програм, що дозволить частково компенсувати дефіцит кваліфікованих кадрів.

## **ВИСНОВКИ**

Проведене дослідження дозволило виявити специфічні особливості підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах воєнного часу та розробити комплекс технічних рішень та методологічних підходів для забезпечення стабільної роботи виробництва в кризових умовах.

Встановлено, що основними викликами для підприємств машинобудівної галузі є обмеженість доступу до інтернету та хмарних сервісів, нестабільність електропостачання, кадрові проблеми, порушення логістичних ланцюгів та підвищені вимоги до безпеки даних.

Для подолання цих викликів запропоновано впровадження автономних CAD/CAM систем, децентралізацію процесу підготовки управляючих програм, створення системи резервного електропостачання, розробку бібліотеки типових програм, впровадження системи швидкого навчання та оптимізацію програм для роботи з обмеженим набором інструментів.

Запропоновані методологічні підходи до організації процесу підготовки управляючих програм включають модульний підхід до розробки програм, впровадження спрощених методик верифікації, розробку методик швидкого переналаштування виробництва, впровадження системи пріоритетизації виробничих завдань та організацію віддаленої підготовки програм.

Практичне впровадження розроблених рекомендацій дозволить підвищити стійкість виробничих підприємств до кризових ситуацій та забезпечити безперервність виробництва стратегічно важливої продукції в умовах воєнного часу.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Цифрова трансформація в машиноремонтному виробництві: аспекти і виклики // Інформаційні технології і автоматизація – 2023: матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції, Одеса, 19–20 жовтня 2023 р. – Одеса: Видавництво ОНТУ, 2023. – С. 53–55.

2. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Сидюк Д. М. Створення інноваційних виробничих систем машиноремонтного спрямування // Галицький економічний вісник. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 115–125. – URL: <https://galicianvisnyk.tntu.edu.ua/?art=1266> (дата звернення: 06.04.2025).

3. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Володченко Ю. О. Підвищення об'єктивності метрик стратегічних оцінок інновацій для промисловості України // Наука та освіта як основа суспільного розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Житомир, 21 лютого 2024 р. – Research Europe, 2024. – С. 110–114.

4. Ковалевський С. В., Ковалевська О. С., Володченко Ю. О. Інтеграція біоніки, цифрових інновацій та демократичних принципів управління для трансформації промисловості // Міжнародний науково-технічний журнал «Штучний інтелект». Серія: Фізико-математичні та технічні науки. – 2024. – № 1(99). – С. 74–86. – DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.01.074>.

5. Kovalevsky S. V., Sydiuk D. M. Integration of AI into the life cycle of engineering products // Trends, Issues, and Challenges in Modern Science: Proceedings of the International Scientific Conference (Cambridge, UK, 13 September 2024). – Cambridge: Bookmundo, 2024. – P. 108–112.

**Пироженко А.О., Бондар О.В., Рязанцев А.О.** (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна)

## **КОНСТРУКТОРСЬКЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ В ПРИКЛАДНІЙ МЕХАНІЦІ**

**Анотація:** Розглянуто використання SolidWorks у конструкторському моделюванні. Проаналізовано ключові можливості програмного комплексу, його застосування у навчальному процесі, а також переваги та виклики інтеграції в освітнє середовище. Особливу увагу приділено моделюванню різального інструменту для обробки заданої деталі та його аналізу за допомогою SolidWorks Simulation. Обґрунтовано значущість SolidWorks для підготовки майбутніх інженерів, окреслено перспективи його подальшого використання у навчальному процесі та промисловості.

**Ключові слова:** SolidWorks; конструкторське моделювання; навчальний процес; інтеграція в освіту; моделювання різального інструменту; SolidWorks Simulation; підготовка інженерів; інженерна освіта.

**Abstract:** The study examines the use of SolidWorks in design modeling. The key capabilities of the software package, its application in the educational process, as well as the advantages and challenges of its integration into the academic environment, are analyzed. Special attention is given to the modeling of a cutting tool for machining a given part and its analysis using SolidWorks Simulation. The significance of SolidWorks for training future engineers is substantiated, and the prospects for its further application in education and industry are outlined.

**Keywords:** SolidWorks; design modeling; educational process; integration into education; cutting tool modeling; SolidWorks Simulation; engineer training; engineering education.

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Сучасне машинобудування вимагає високої точності та ефективності обробки деталей, що значною мірою залежить від конструкції металорізального інструменту. Використання систем автоматизованого проєктування, зокрема SolidWorks, дозволяє значно покращити якість моделювання, аналізу та оптимізації таких інструментів. Моделювання ріжучого інструменту у SolidWorks є важливим етапом проєктування, що дозволяє визначити оптимальні параметри інструменту та провести його віртуальні випробування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження в галузі конструкторського моделювання металорізального інструменту активно проводяться науковцями та інженерами. У численних роботах розглядаються методи моделювання ріжучих інструментів, аналіз їхніх характеристик за допомогою комп'ютерних технологій. Зокрема,

використання SolidWorks у поєднанні з модулем Simulation дозволяє виконати розрахунки на міцність, аналіз деформацій та термодинамічних впливів, що є необхідним для підвищення ефективності виробничих процесів.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на значний прогрес у сфері моделювання металорізальних інструментів, залишається актуальною проблема автоматизованої оптимізації їхніх конструкцій. Крім того, необхідно розширювати дослідження щодо впливу геометричних параметрів інструменту на якість обробки деталі, використовуючи комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження.

**Цілі статті та постановка задачі.** Основною метою статті є аналіз процесу конструкторського моделювання металорізального інструменту у SolidWorks та його застосування для оптимізації процесів механічної обробки. Для досягнення цієї мети поставлено наступні задачі:

- Розглянути особливості створення 3D-моделі металорізального інструменту у SolidWorks.
- Виконати аналіз міцності інструменту за допомогою модуля SolidWorks Simulation.
- Дослідити вплив геометричних параметрів інструменту на якість обробки деталі.
- Проаналізувати термодинамічні навантаження на ріжучий інструмент.
- Обґрунтувати переваги використання SolidWorks для проектування металорізальних інструментів.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

#### **1. Створення 3D-моделі деталі, що оброблюється та металорізального інструменту у SolidWorks (рис.1)**

На першому етапі моделювання створюється ескіз ріжучої частини інструменту, визначаються основні параметри: довжина, діаметр, кут загострення ріжучої кромки. Потім виконується об'ємне моделювання, додаються посадкові місця та технологічні елементи.



Рисунок 1 - 3D-моделі деталі, що оброблюється (а) та металорізального інструменту (б)



## 2. Виконання аналізу міцності у SolidWorks Simulation (рис.2)

Для оцінки працездатності інструменту у SolidWorks Simulation проводиться аналіз напружень і деформацій. Визначаються основні навантаження, що діють на ріжучу частину, а також перевіряється стійкість інструменту до механічних навантажень. Наприклад, при моделюванні фрези було встановлено, що під впливом осьового навантаження її максимальне напруження не перевищує допустиме значення, що підтверджує надійність конструкції.

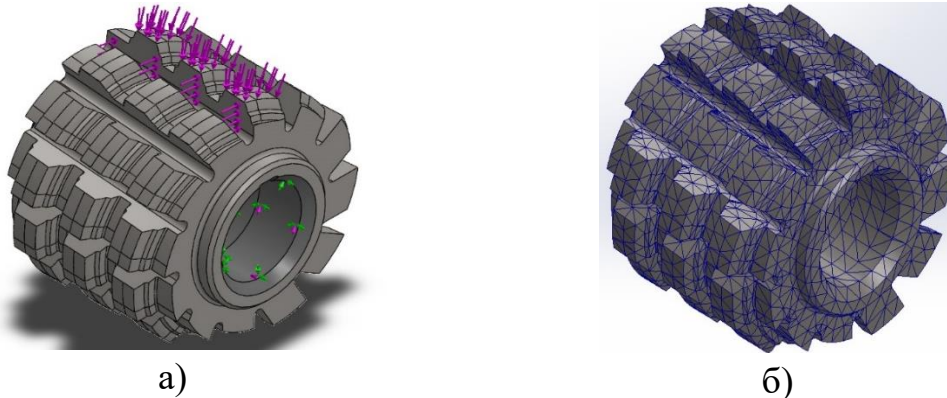


Рисунок 2 - Аналізу міцності у SolidWorks Simulation: прикладання навантажень (а) та кінцево-елементна модель (б)

## 3. Вплив геометричних параметрів інструменту на якість обробки

Параметри ріжучого інструменту (кут загострення, діаметр, довжина ріжучої кромки) значно впливають на якість обробки. Аналіз у SolidWorks дозволяє визначити оптимальні значення цих параметрів для досягнення найкращих результатів. Наприклад, при зменшенні кута загострення ріжучої частини підвищується точність обробки, проте зменшується стійкість інструменту до зносу (рис.3).

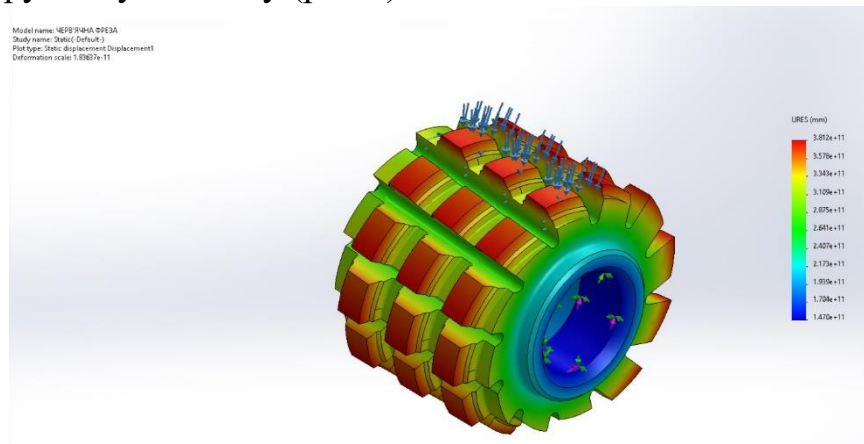


Рисунок 3 – Аналіз конструкції інструменту в SolidWorks Simulation

## 4. Аналіз термодинамічних навантажень

У процесі різання утворюється значна кількість тепла, що впливає на якість обробки та довговічність інструменту. За допомогою SolidWorks Simulation можна моделювати теплові процеси та прогнозувати температуру нагріву ріжучої частини. Наприклад, дослідження показали, що при обробці сталі швидкорізальним інструментом температура може досягати 600°C, що вимагає вибору відповідних матеріалів для покриття.

### **5. Переваги використання SolidWorks для проєктування**

Серед ключових переваг використання SolidWorks можна виділити:

- Можливість швидкого створення та модифікації 3D-моделей.
- Автоматизований аналіз міцності інструменту.
- Аналіз теплових навантажень та термостійкості конструкції.
- Оптимізацію конструкцій перед фізичним виготовленням.
- Інтеграцію з іншими CAD/CAM/CAE-системами.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У статті розглянуто використання SolidWorks для моделювання металорізального інструменту при обробці деталей. Показано можливості програмного забезпечення для аналізу та оптимізації конструкцій інструментів, що дозволяє підвищити ефективність виробничих процесів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на автоматизацію вибору оптимальних параметрів інструменту, аналіз впливу різних умов різання на його зносостійкість та інтеграцію SolidWorks з іншими програмами для технологічної підготовки виробництва.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. *Войтов В. І., Сорока О. В. Комп'ютерне моделювання у машинобудуванні. – Київ: Техніка, 2018.*
2. *Петров І. В. SolidWorks: Основи тривимірного моделювання. – Харків: Освіта, 2020.*
3. *Smith J., Brown P. Engineering Design with SolidWorks. – London: Springer, 2021.*

**Письменкова Т.О., Ротт Н.О.,** (Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна)

## **ІНТЕРАКТИВНИЙ ВІРТУАЛЬНИЙ ДОСВІД В СФЕРІ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ЯК ОДИН ІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ**

**Анотація.** Проведене експериментальне дослідження акцентує увагу на важливості внесення різноманітності дидактичних інновацій та творчості в академічних спільнотах двох установ: Технічного університету Валенсії (Іспанія) та Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (Україна). У ході семи гібридних сесій 78 студентів та 6 викладачів спільно працювали над лабораторними завданнями, відточуючи свої професійні здібності та особистий розвиток. Проект досліджує вирішальну роль цифровізації у вирішенні проблем навчання та сприяння міжнародному співробітництву. Він також демонструє потенціал віртуального обміну для підтримки активних методологій у багатомовному середовищі. Використання технологій та сприяння цілям сталого розвитку наближає матеріалознавство до більш інклюзивної освіти, орієнтованої на компетентність через цифровізацію в інженерній сфері.

**Ключові слова:** матеріалознавство, інженерна освіта, лабораторний досвід, віртуальний обмін, цифровізація, компетентності, цілі сталого розвитку

**Annotation.** The conducted experimental study emphasizes the importance of incorporating a variety of didactic innovations and creativity within academic communities at two institutions: the Technical University of Valencia (Spain) and the National Technical University "Dnipro Polytechnic" (Ukraine). During seven hybrid sessions, 78 students and 6 lecturers collaborated on laboratory tasks, refining their professional skills and personal development. The project explores the crucial role of digitalization in addressing learning challenges and fostering international cooperation. It also highlights the potential of virtual exchange in supporting active methodologies within a multilingual environment. The use of technology and the promotion of sustainable development goals bring materials science closer to more inclusive, competence-oriented education through digitalization in the engineering field.

**Keywords:** materials science, engineering education, laboratory experience, virtual exchange, digitalization, competencies, sustainable development goals

У Європейському просторі вищої освіти особлива увага приділяється командній роботі та динаміці співпраці для застосування методологічних розробок, наближених до реальності [1].

У 2005 році дослідники зазначали, що співпраця між вишами може значно покращити якість інженерної освіти [2]. Техніки онлайн взаємодії можуть стати каталізатором співпраці. Аналогічним чином, навчальні матеріали з інженерної справи можуть використовуватись у різних установах, що підвищує якість та знижує витрати. Завдяки цифровій взаємодії можна створювати спільний досвід, навчальні матеріали та навіть системи керування курсами.

Онлайн-освіта була введена в систему вищої освіти у період з 2002 по 2005 рік та продовжує розвиватися; зокрема, цей процес значно активізувався у 2019–2021 роках через пандемію COVID-19 [3]. У результаті цього досвіду викладачі виявили дві основні проблеми: студенти не мали мотивації до навчання через відсутність взаємодії з лабораторними експериментальними засобами та відсутність спілкування з викладачами [4].

Отже, зміна парадигми у процесі викладання-навчання передбачає нову роль викладачів які мають адаптуватися до вимог сучасного суспільства. Безперервне навчання та розвиток навичок є основою, що дозволяє спрямовувати розвиток здобувачів розставляти пріоритети у стратегіях саморегульованого навчання та мотивувати діяльність в умовах студентоцентрованого навчання [5].

Основною метою дослідження стало створення мультикультурного гібридного середовища навчання, а також його спільне проектування та реалізація освітньої діяльності для здобувачів з матеріалознавства задля сприяння підвищенню якості інженерної освіти.

Задачі які вирішувалися під час практик:

- просувати викладання-навчання, орієнтоване на командну роботу та ефективне спілкування під час лабораторних занять, використовуючи гібридний формат;

- оцінити прогрес у розвитку формування результатів навчання/компетентностей;

- сприяти цілям сталого розвитку;

- створити зв'язки співробітництва та підтримки між іспанськими та українськими здобувачами і викладачами.

Очікування професорсько-викладацького складу були спрямовані на:

- допомогу українським здобувачам у набутті практичних навичок в рамках виконання лабораторних завдань для майбутньої професійної діяльності;

- підвищення рівня комунікативної компетентності здобувачів;

- розвиток навичок командної роботи між іспанськими та українськими здобувачами;

- підвищення рівня англійської мови у професійному середовищі;

- підвищення мотиваційної складової професійно-комунікативної підготовки здобувачів-учасників;

- сприяння цілям сталого розвитку задля досягнення мети 4 (Якісна освіта) для забезпечення рівного доступу до вищої освіти, підвищення навичок для доступу до працевлаштування та просування глобальної освіти для сталого розвитку; 16 (Світ, справедливість та сильні інститути), що скорочує всі форми насильства та заохочує участь громадян; 17 (Партнерство для досягнення цілей) в аспекті покращення передачі технологій та розвитку державно-приватних альянсів.

У результаті динамічної та активної співпраці двох закладів вищої освіти України та Іспанії: Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (Україна) та Політехнічного університету Валенсії (UPV) була реалізована Експериментальна лабораторія віртуальної взаємодії (ЕЛВВ).

Спільний проєкт надав можливість роботи в змішаних міжвузівських групах, пов'язаних програмним продуктом MS Teams, для спостереження та розуміння лабораторних експериментів у режимі реального часу.

Функція тематичної підтримки, виконувалася національними мовами. Під час лабораторних семінарів та позакласного спілкування між українськими і іспанськими учасниками відбувалося англійською мовою.

Робота розвивалася у такі основні етапи: вибір вузів-співробітників, розробка формату, плану навчально-тренувальних заходів та проведення освітнього експерименту - Експериментальна лабораторія віртуальної взаємодії.

Враховуючи поточну ситуацію збройного конфлікту, яку переживають українські здобувачі та викладачі, планування, тимчасовий розподіл та підготовка практичних заходів здійснювалися через онлайн-зустріч ще до початку реалізації проєкту. На базі методичних розробок УПВ було розроблено гібридний формат лабораторних практик із очними заняттями (відеоконференціями) для іспанських здобувачів і онлайн-практик для українських.

Щодо бази прикладних компетенцій, на попередньому етапі було проведено дослідження змісту програм навчання між спеціальністю «Аерокосмічна техніка» в УПВ та спеціальністю «Промислова естетика та сертифікація матеріалів та виробів» за спеціальністю G8 «Матеріалознавство» в НТУ «ДП».

Порівняльне дослідження показало, що і в Україні [6], і в Іспанії [7] у процесі навчання необхідно розвивати ефективні комунікативні, командні та лідерські якості. У таблиці 1 нижче показано дві трансверсальні компетенції УПВ, над якими ведеться робота в даному дослідженні, та їх еквіваленти у загальних компетенціях спеціальності Матеріалознавство НТУ «Дніпровська політехніка». Розмірність D3 УПВ та КЗ 04, 06 та 11 та розмірність D4 УПВ та КЗ 07, 08, 09 мають практично однаковий зміст.

Таблиця 1 Співставлення змісту компетентностей УПВ і НТУ «ДП»

Політехнічний університет Валенсії	НТУ «Дніпровська політехніка»
D3. Командна робота та лідерство - ефективно функціонувати в команді, члени якої разом забезпечують лідерство та створюють середовище для співпраці та інклюзивності в організації та координації роботи; - визначати ролі та навички роботи в команді з різними професійними профілями;	КЗ.06 Здатність до адаптації та дії у новій ситуації КЗ.04 Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми КЗ.11 Здатність працювати у команді

<ul style="list-style-type: none"> <li>- активно співпрацювати в розвитку роботи, постановки цілей і виконанні завдань;</li> <li>- сприяти пошуку рішень для завдань або проектів, демонструючи емпатію та напористість під час обміну ідеями, роздумами та аргументами в рамках спільної роботи</li> </ul>	
<p>D4. Ефективна комунікація</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- будувати промову так, щоб полегшити розуміння цілей, дій та/або результатів власної роботи;</li> <li>- розробляти професійні тексти або науково-технічні звіти відповідно до умов дисципліни;</li> <li>- адаптувати організацію змісту та використання мови, вербальної та невербальної, щоб спілкуватися в різних ситуаціях та/або перед різними аудиторіями;</li> <li>- демонструвати навички цифрової комунікації з використанням різноманітних засобів підтримки, адаптованих до ситуації та аудиторії.</li> </ul>	<p>K3.07 Здатність використання інформаційних та комунікаційних технологій  K3.08 Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово  K3.09 Здатність спілкуватися іноземною мовою</p>

Придбання певної поведінки, відносин, мотивації, цінностей та знань під час навчання дозволяє випускникам інженерних спеціальностей успішно функціонувати в динамічному професійному контексті.

Тож виявлення порівнюваних компетентностей дозволяє нам встановити не лише загальні цілі, а й домовитися про дидактичне планування, реалізацію та оцінку проекту. Ці аспекти є актуальними для підготовки студентів кожного зі згаданих вище університетів у контексті різноманітності, стійкості та цифровізації.

З метою створення заходів у рамках проекту Експериментальної лабораторії віртуальної взаємодії, крім порівняння компетентностей в обох вишах, порівняли та адаптували програми навчання, їх зміст, обсяг матеріалу та кількість кредитів, що виділяються на предмети у вишах-партнерах.

Порівнюючи та аналізуючи програми навчання, було обрано дисципліну «Матеріалознавство», яка викладається в обов'язковому порядку іспанським та українським здобувачам.

Водночас викладачі українського університету проаналізували зміст дисципліни «Матеріалознавство», щоб згрупувати та декомпонувати тематичний матеріал, адаптуючи його до графіка викладання УПВ. Після вибору тем було складено план роботи. Гібридні заняття проводились за розкладом студентів УПВ, оскільки заняття передбачають використання лабораторного обладнання кафедри «Машинобудування та матеріалознавство» (ДІММ). Було проведено 7 занять тривалістю 2 години, шість із них – лабораторні практики та одне – семінарське під час якого здобувачі звітували за виконану роботу.

В обох установах кожній лабораторній практиці передувала теоретична підготовка. Окрім того, кожен університет самостійно проводив теоретичні заняття для своїх здобувачів.

Через поточну військову ситуацію в Україні українські студенти проводять заняття лише онлайн, що обмежує їх доступ до різних

інструментів та лабораторних практик. Для вирішення цієї ситуації організатори проекту створили експериментальну лабораторію віртуальної взаємодії ЕЛВІ, використовуючи як базовий інструмент Microsoft Teams. Змішані групи учасників університету співпрацювали, взаємодіяли та пропонували негайний зворотний зв'язок, відеодзвінки, чати, зображення, щоб стимулювати групову роботу та спілкування у реальному часі.

У пілотному дослідженні взяли участь 24 студенти першого курсу спеціальності «Матеріалознавство» з української сторони та 54 студенти третього курсу бакалаврату з іспанської сторони. На гібридних лабораторних заняттях студентів супроводжували 2 професори ДІММ та 2 професори лінгвістики та педагогіки. Два професори українського університету були присутні на сесіях відеоконференції через Teams, щоб надати підтримку у плані теоретичних знань та оцінити зроблені презентації.

Згідно з навчальним планом предмета «Матеріалознавство», лабораторні заняття продовжуються дві години. На початку лабораторної практики група студентів УПВ була поділена на 6 підгруп. У кожную підгрупу входило 7-9 іспанських студентів та 3-4 українські студенти. Студенти УПВ працювали очно та гібридно на об'єктах кафедри, а студенти ДТУ зв'язувалися зі своїми відповідними підгрупами через відеоконференції через MS Teams. Кожен із експериментальних сеансів мав таку послідовність робіт:

1. Постановка завдань та інформація з техніки безпеки – 10 хвилин.
2. Презентація лабораторних матеріалів та обладнання – 15 хвилин.
3. Проведення експериментальної роботи та обмін отриманими результатами з колегами – 60 хвилин.
4. Проведення розрахунків за підгрупами – 15 хвилин.
5. Презентація та обговорення результатів з викладачем – 15 хвилин.
6. Підсумкові висновки – 5 хвилин.

Під час заняття іспанські здобувачі були присутні у лабораторії та проводили практичні тести. Відповідальний за кожную підгрупу коментував кожен крок колегам з України. При цьому українські здобувачі через телеконференцію спостерігали за процесом тестування в лабораторії, ставили уточнюючі питання та записували результати досліджень.

На наступному етапі гібридної взаємодії здійснювалася обробка отриманих у підгрупах експериментальних даних, обмін результатами та формулювання висновків за результатами дослідження. Здобувачі упродовж тижня після кожної сесії готували письмовий звіт для передачі професору на наступному.

Завершальним етапом проекту ЕЛВІ стала сесія усного представлення та захисту результатів лабораторних практик кожної підгрупи. Ця робота оцінювалася за критеріями усних виступів викладачів та здобувачів.

Для іспанських здобувачів участь у цьому міжнародному онлайн-проекті була частиною навчання з дисципліни «Матеріалознавство», тобто лабораторної практики. Кінцевий результат проекту ЕЛВІ повністю прив'язаний до балу (100% можливих балів) лабораторної практики.

На рівні українського вишу, було прийнято рішення після завершення проекту та виконання всіх умов зараховувати українським здобувачам 30% зі 100% можливих балів з англійської мови як набуті результати навчання зі спілкування англійською мовою в професійному середовищі.

Таким чином наша модель проекту вирішувала такі основні завдання: встановлення контакту між учасниками проекту, групове вирішення проблем, критичне мислення та прийняття рішень, а також захист результатів лабораторних практик.

### **Результати**

Як ми зазначили у вступній частині, навчальний процес у технічній освіті дозволяє як студентам, так і викладачам удосконалювати різноманітні аспекти свого професійного розвитку. Таким чином структура вибірки дозволила нам зібрати відповіді від обох груп в Іспанії та Україні. Зокрема, всього 38 осіб (24 студенти УПВ та 8 студентів ДТУ, а також 4 професори УПВ та 2 викладачі ДТУ) поділилися своєю думкою про проведений експеримент.

Пункти, включені до рейтингової шкали Лайкерта, відображали ступінь згоди або незгоди з ствердними повідомленнями «Я впевнений у...», «Я здатний...» і пов'язані з наступними темами:

(а) компетенції: позитивні результати навчання щодо професійної компетентності в галузі матеріалознавства: 26% (повністю згодні) та 68% (згодні) респондентів висловили задоволення спільним проектом; вміння продуктивно працювати у міжвузівських колективах заслужило загальне схвалення учасників: 45% (повністю згодні) та 32% (згодні); Що стосується навичок ефективного спілкування на інженерні теми англійською мовою, отримані відповіді досягли 29% (повністю згоден) та 42% (згодний);

(d) сталий розвиток: студенти та викладачі університетів оцінили свою здатність визначати, цінувати та ділитися ключовими ЦУР ініціативи: ЦУР 4 (27% повністю згодні та 57% згодні), ЦУР 16 (35% повністю згодні та 49% згодні) та ЦУР 17 (повністю згодні 38);

(в) різноманітність: взаємодія між учасниками проекту сприяла здатності краще розуміти людей з інших країн (49% повністю згодні та 41% згодні) та відчувати співчуття до колег та співробітників з іншого університету (54% повністю згодні та 41% згодні).

### **Обговорення і висновки**

Аналіз результатів опитування демонструє високий рівень позитивних оцінок, що дозволяє стверджувати, що очікування проекту ЕЛВІ справдилися. Учасники стверджують, що у своїх відповідях у процесі виконання лабораторної роботи їм вдалося набути практичних навичок, необхідних для майбутньої професійної діяльності. Крім того, вони позитивно реагують на твердження про те, що підвищили рівень комунікативної компетентності, зуміли покращити навички командної роботи, а також набули досвіду спілкування іноземною мовою у професійному середовищі. Що, своєю чергою, позитивно впливає на їх рівень володіння англійською мовою.

Основною метою цієї роботи було побудова мультикультурної гібридної середовища навчання задля підвищення якості інженерної освіти.



Спільне проектування та реалізація збагатили освітню діяльність у галузі матеріалознавства.

Розробка освітнього проекту віртуального співробітництва проводилася відповідно до керівних принципів, встановлених ЕНЕА, що дозволило встановити спільні робочі зв'язки як між викладацьким складом, так і іспанськими та українськими студентами з двох різних університетів. Варто зазначити, що, спираючись на дидактичну модель сталого активного віртуального навчання (SAVL), вдалося провести кілька активних навчальних заходів, культивуючи постійне покращення таких аспектів компетентності, як командна робота та ефективне спілкування.

Зрештою, технічний досвід, отриманий у рамках проекту «Експериментальна лабораторія віртуальної взаємодії (ЕЛВІ)», дозволив освоїти зміст технічної теми. З іншого боку, було надано можливість підвищити обізнаність студентів за допомогою прикладів, що застосовуються до цілей та завдань сталого розвитку.

Таким чином, відчутні результати, досягнуті після завершення цієї роботи, продемонстрували, що мультикультурні віртуальні обміни сприяють якості інженерної освіти через стійкість та цифровізацію.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Elmoazen, R., Saqr, M., Khalil, M., Wasson, B. *Learning analytics in virtual laboratories: A systematic literature review of empirical research* // Smart Learning Environments. – 2023. – №10(1). – С. 23. DOI: [10.1186/s40561-023-00244-y](https://doi.org/10.1186/s40561-023-00244-y).

2. Bourne, J., Harris, D., Mayadas, F. *Online Engineering Education: Learning Anywhere, Anytime* // Journal of Engineering Education. – 2005. – №94(1). – С. 131–146. DOI: [10.1002/j.2168-9830.2005.tb00834.x](https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00834.x).

3. Park, J. J., Park, M., Jackson, K., Vanhoy, G. *Remote Engineering Education under COVID-19 Pandemic Environment* // International Journal of Multidisciplinary Perspectives in Higher Education. – 2020. – №5(1). – С. 160–166. URL: <https://eric.ed.gov/?id=EJ1273006>.

4. Serafin, J. M., Chabra, J. *Using a Cooperative Hands-On General Chemistry Laboratory Framework for a Virtual General Chemistry Laboratory* // Journal of Chemical Education. – 2020. – №97(9). – С. 3007–3010. DOI: [10.1021/acs.jchemed.0c00780](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00780).

5. Gargallo López, B., Morera Bertomeu, I., Iborra Chornet, S., Climent Olmedo, M. J., Navalón Oltra, S., Félix García, E. *Metodología centrada en el aprendizaje. Su impacto en las estrategias de aprendizaje y en el rendimiento académico de los estudiantes universitarios* // Revista Española de Pedagogía. – 2014. – №72(259). – С. 415–435. URL: <https://www.jstor.org/stable/24726630>.

6. Міністерство освіти і науки України. *Стандарт вищої освіти України [Електронний ресурс]* // Міністерство освіти і науки України. – 2018. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/12/26/132-Materialozn-bakalavr-1.pdf> (дата звернення: 06.03.2025)

7. Univeristat Politècnica De València. *Propuesta de acuerdo relativa a la ordenación e integración de las competencias transversales en los títulos oficiales de la Univeristat Politècnica De València [Електронний ресурс]* // Univeristat Politècnica De València. – 2022. – Режим доступу: <https://www.upv.es/entidades/SG/infoweb/sg/info/U0917752.pdf> (дата звернення: 06.03.2025).

**Побочій О.А., Кравцова Д.Ю. (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна) ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КАРТ ЕСКІЗІВ ЗГІДНО З ДСТУ 3.1105-2014**

**Анотація:** В роботі оглянуто кілька можливих варіантів програмного забезпечення для оформлення карт ескізів: Microsoft Office Word, WPS Office Writer, Google Документи. Представлено результат їх тестування для створення, редагування і зберігання документів конструкторського і технологічного призначення. Дано рекомендації по застосуванню програм із метою прискорення роботи з документами із забезпеченням високої якості форматування згідно стандарту.

**Ключові слова:** карта ескізів; програмне забезпечення; Microsoft Word; WPS Office Writer; Google Документи; тестування програм; конструкторська документація; технологічна документація; форматування документів.

**Abstract:** The paper considers several possible software for designing sketch maps: Microsoft Office Word, WPS Office Writer, Google Docs. The results of their testing for the creation, editing and storage of design and technological documents are presented. Recommendations are given on the use of programs to speed up work with documents while ensuring high-quality formatting according to the standard.

**Keywords:** sketch card; software; Microsoft Word; WPS Office Writer; Google Docs; software testing; design documentation; technological documentation; document formatting.

Станом на 2025 рік для багатьох підприємств і закладів України продовжує бути актуальною тема вибору програмного забезпечення (ПЗ) для складання, редагування і зберігання документів конструкторського і технологічного призначення, які містять текст, таблиці, креслення, фото, тощо. Очевидно, що для компонування різноманітних цифрових даних у єдиний документ, доречно скористатися текстовим процесором, за умови, що підприємство не використовує будь-яких PDM/PLM систем, де уже це визначено самою системою. У даній роботі оглянуто кілька можливих варіантів ПЗ для оформлення карт ескізів: Microsoft Office Word, WPS Office Writer, Google Документи.

Word – найпопулярніший ПЗ, який надає розширені можливості для налаштування документів, дозволяє створювати карти ескізів відповідно до стандартів. Завдяки інструментам для роботи з таблицями, фігурами та зображеннями можна створювати необхідні макети та вставляти ескізи. Платний.

Writer був розроблений як альтернатива Word і пропонує схожий набір функцій. Він підтримує роботу з таблицями, фігурами та зображеннями, що дозволяє створювати карти ескізів; інтерфейс і

розташування деяких інструментів у незначній степені відрізняється від Word. Безкоштовний.

Google Документи є безкоштовним онлайн-редактором із базовими можливостями для форматування документів. Хоча він підтримує створення таблиць і вставку зображень, його функціональність менша в порівнянні з десктопними текстовими процесорами Word і Writer. Це може ускладнити процес створення карт ескізів, особливо якщо необхідне точне розміщення елементів і дотримання вимог стандарту. Інтерфейс і розташування деяких інструментів у значній мірі відрізняється від Word.

Із метою тестування ПЗ у них було створено шаблон таблиці карти ескізу (KE) згідно з ДСТУ 3.1105-2014 [1], а саме, Додаток В.

Word надав широкий набір інструментів, що дозволило створити необхідну таблицю (рис. 1). Було використано функції: об'єднання комірок, налаштування відображення їх меж, зміна висоти і ширини комірок, вирівнювання тексту відносно сторін таблиці (по центру, по центру ліворуч). Завдяки цим функціям таблицю виконано без зусиль і швидко.

Дубл.																					
Взам.																					
Підп.																					
														XXXXX.XXXXX				1	1		
Розроб.	Побочій		28.03.25																		
				КНУ	XXXXX.XXXXX				-				20141.00141								
				Шток																	
Н.контр.	Кравцова		28.03.25																		
KE														20141_00141.xml	v.1.0						

Рисунок 1 – Карта ескізу виконана у MS Word

Спроба виконання аналогічної таблиці у Writer також виявилася успішною, використано побідний набір функцій до попереднього.

Спроба виконання KE у Google Документи виявилася менш вдалою з точки зору складного налаштування великої кількості комірок, що

розташовуються зі зсувом вертикальних меж від рядку до рядку. Виконання таблиці у Google Документи зайняло більше часу, а якість результату була гірша.

Наступним тестом були спроби відкривання і редагування усіх згенерованих файлів у всіх ПЗ із метою перевірити сумісність. Файли створені та збережені у Word і Writer виявилися повністю сумісні. Файли створені та збережені Word і Writer відкриті у Google Документи коректно відображалися і редагувалися із подальшим повторним редагуванням у десктопних ПЗ. Але файл створений у Google Документи і відкритий у Word і Writer мали візуально видимі похибки форматування.

Отже, тестування показало, що для виконання складання, редагування і зберігання документів конструкторського і технологічного призначення, які містять текст, таблиці, креслення, фото, зокрема, оформлення КЕ, рекомендовано використовувати Word або Writer, оскільки вони надають достатньо інструментів для точного форматування таблиць та забезпечують дотримання стандартів. Google Документи можна використовувати для редагування документів із різноманітним цифровими даними, зокрема КЕ, у заздалегідь створених шаблонах у десктопному ПЗ. Особливо такий спосіб буде актуальним, якщо є необхідність одночасної онлайн роботи з документом кількох розробників.

У подальших тестах заплановано виконати КЕ у табличному процесорі та зробити порівняльний аналіз.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. ДСТУ 3.1105:2014. Єдина система технологічної документації. Форми та правила оформлення документів загального призначення. Чинний від 2014-11-01. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвику України, 2015. 23 с.

**Полушко М.М, Шевченко В.В.** (Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".ю м. Київ, Україна)

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ**

***Анотація:** В роботі розглянуто принцип дії та структурну побудову автоматизованої системи контролю якості поверхні деталей з використанням акустичного методу. Проаналізовано етапи обробки сигналу, основні параметри контролю та функціональні блоки системи. Особливу увагу зосереджено на перевагах методу, зокрема його високій чутливості, універсальності та здатності точно виявляти дефекти різного типу.*

***Ключові слова:** автоматизована система, акустичний метод, якість поверхні деталей, контроль.*

***Abstract:** The paper discusses the operating principle and structural design of an automated surface quality control system for machine parts using the acoustic method. The stages of signal processing, key control parameters, and functional blocks of the system are analyzed. Special attention is given to the advantages of the method, particularly its high sensitivity, versatility, and ability to accurately detect various types of defects.*

***Keywords:** automated system; acoustic method; surface quality of parts; control.*

В умовах інтенсивного розвитку промислових технологій зростає потреба у високоточному та стабільному контролі параметрів якості продукції. Сучасні виробничі процеси вимагають суворого дотримання технологічних нормативів і стандартів [1]. Зі збільшенням складності конструкцій і посиленням вимог до готових виробів виникає необхідність у впровадженні інноваційних підходів до контролю, здатних своєчасно виявляти відхилення від норми на ранніх етапах виготовлення.

Одним із дієвих методів технічного контролю є акустичний, який базується на аналізі параметрів звукових хвиль, що утворюються при впливі на досліджувану деталь [2]. Зміни у характеристиках сигналу – таких як частота або амплітуда – можуть вказувати на наявність як поверхневих, так і внутрішніх дефектів. Завдяки цьому метод дозволяє підвищити точність контролю та розширити спектр виявлюваних порушень у структурі матеріалу [3].

Суть методу полягає у збудженні коливань шляхом прикладання механічного впливу, наприклад, у вигляді вібрації чи імпульсного навантаження. Акустичні хвилі, що виникають при цьому, проходять крізь матеріал деталі, змінюючи свої властивості залежно від наявних неоднорідностей. Навіть найдрібніші пошкодження – мікротріщини, включення або пористість – викликають відхилення у спектрі сигналу. Проведення спектрального аналізу дає змогу не лише фіксувати наявність

дефектів, а й визначати їх точне розташування та характеристики. Завдяки цьому метод дозволяє ефективно здійснювати контроль якості продукції як на початкових, так і на завершальних етапах виробничого процесу [4].

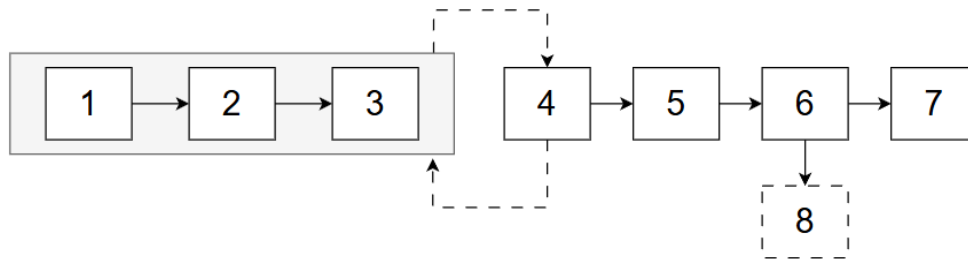


Рис. 1. Блок-схема автоматизованої системи контролю якості поверхні деталей.

На рис. 1 представлено структурну схему автоматизованої системи контролю якості обробленої поверхні деталей. Її архітектура включає функціональні блоки, які реалізують процеси генерації, фіксації, обробки та аналізу акустичних сигналів. До складу системи входять сенсори, модулі аналізу, обчислювальні засоби, генератори коливань, інформаційні інтерфейси, керуючі вузли та пристрої для зберігання результатів.

Робочий цикл системи починається з формування зовнішнього впливу (Блок 1), зокрема вібраційного або ударного збудження, що викликає виникнення акустичних хвиль у матеріалі контрольованої деталі. У процесі їх розповсюдження поверхнею змінюються основні параметри сигналу, залежно від фізичного стану об'єкта. Відбиті коливання реєструються відповідними сенсорними елементами (Блок 2).

Після фіксації сигналу він передається через канали зв'язку (Блоки 3 та 4) до системи попередньої обробки. Наступним етапом є глибинний аналіз у модулі обчислень (Блок 5), де визначаються ключові характеристики – амплітуда, частота та швидкість поширення хвиль. На підставі отриманих даних система виконує ідентифікацію дефектів (Блок 6), зіставляючи результати з нормативними критеріями якості. Після цього інформація виводиться на екран через користувацький інтерфейс (Блок 7), що забезпечує зручне сприйняття результатів контролю.

Злагоджена взаємодія всіх компонентів забезпечується блоками керування, які координують послідовність операцій у реальному часі. Архівація та збереження інформації здійснюється в окремому функціональному вузлі (Блок 8), що дозволяє накопичувати статистику, проводити порівняльний аналіз і формувати звітну документацію.

До основних параметрів, які підлягають аналізу при застосуванні акустичного методу, належать амплітуда звукових хвиль, спектральна складова та швидкість їх розповсюдження в матеріалі. Перший показник дозволяє з високою чутливістю фіксувати дрібні пошкодження на поверхні. Частотний спектр сигналу відображає структурні особливості деталі,

дозволяючи адаптувати метод під різні матеріали. Параметр швидкості коливань, у свою чергу, є індикатором наявності внутрішніх дефектів, таких як мікротріщини чи пористість.

Завдяки високій точності й інформативності, акустичний метод знайшов широке застосування в галузі машинобудування. Його здатність виявляти навіть незначні відхилення на ранніх етапах виробництва дозволяє забезпечити стабільну якість продукції. Універсальність методики забезпечує її ефективність при роботі з матеріалами різного типу, незалежно від їхніх фізико-хімічних властивостей.

Гнучкість у налаштуванні системи відповідно до специфіки технологічного процесу дає змогу оптимізувати параметри контролю, що, у свою чергу, сприяє зниженню кількості дефектної продукції, зменшенню витрат на переробку та підвищенню загальної ефективності виробничих ліній.

Промислове впровадження автоматизованої системи контролю якості поверхні деталей забезпечує високу достовірність контролю, адаптивність до умов виробництва та відповідність сучасним вимогам до якості продукції.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Shevchenko, V. (2024). *Details Processing Control System at the Automated Manufacturing*. In: Bezuglyi, M., Bouraou, N., Mykytenko, V., Tymchuk, G., Zaporozhets, A. (eds) *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 511. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_10)
2. Нортрон, Г. Р., Чек, Д.ж., та Ульманн, Г. В. (2009). *Акустичний контроль матеріалів*. Київ: Видавництво Техніка. 385 С.
3. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. (2020). *Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 19-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429
4. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. *Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник*. Ужгород: Вид-во УжНУ, 2016. 315 С..
5. Tsapenko, V., Tereshchenko, M., Tymchik, G., Matvienko, S., & Shevchenko, V. (2020, April 22-24). *Analysis of Dynamic Load on Human Foot*. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine. 400-404. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9088788>
6. *Технічні засоби автоматизації (Частина 1) / М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. Ніжин.: Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 569 С*

**Рак А.О.** (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна)

## НАНОСТРУКТУРОВАНІ ПОКРИТТЯ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ТУРБОАГРЕГАТИВ

**Анотація:** У даній статті здійснено аналіз доцільності впровадження наноструктурованих твердих покриттів для підвищення ресурсу підшипникових вузлів, що працюють за складних умов, зокрема у складі турбоагрегатів. Особливу увагу приділено огляду властивостей покриттів типу DLC, AlTiN та TiN, а також їхньому впливу на зносостійкість, термічну стабільність та коефіцієнт тертя. Матеріал базується як на опрацюванні сучасних джерел, так і на узагальнених даних про експлуатаційні умови використання підшипникових вузлів у промисловості.

**Ключові слова:** наноструктуровані покриття; підшипникові вузли; зносостійкість; DLC покриття; AlTiN покриття; TiN покриття; термічна стабільність; коефіцієнт тертя.

**Abstract:** The article analyzes the feasibility of implementing nanostructured hard coatings to extend the service life of bearing units operating under demanding conditions, particularly as part of turbomachinery. Special attention is paid to the review of properties of coatings such as DLC, AlTiN, and TiN, as well as their impact on wear resistance, thermal stability, and the coefficient of friction. The material is based on an overview of current scientific literature and generalized data on operational performance.

**Keywords:** nanostructured coatings; bearing assemblies; wear resistance; DLC coatings; AlTiN coatings; TiN coatings; thermal stability; friction coefficient.

У промисловій експлуатації турбоагрегати зазнають високих навантажень, які передаються безпосередньо на підшипникові вузли. Як показує практика, основним чинником зниження ресурсу таких вузлів є механічний знос, що супроводжується підвищенням температури в зоні контакту та погіршенням умов змащування. У зв'язку з цим актуальним напрямом є використання сучасних технологій зміцнення поверхонь, зокрема за рахунок нанесення твердих тонких покриттів з наноструктурованою будовою [1, 2]. Слід зауважити, що вітчизняна наукова спільнота також активно розробляє відповідні підходи [6].

Серед найбільш ефективних методів підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя виділяють застосування покриттів, нанесених методами PVD (фізичне осадження з парової фази) та CVD (хімічне осадження). Покриття типу DLC (алмазоподібний вуглець), TiN, CrN та AlTiN характеризуються високою твердістю (від 20 до 80 ГПа), низьким коефіцієнтом тертя (0,05–0,15) і стійкістю до агресивних середовищ [3, 5].

Важливо відзначити, що при нанесенні подібних покриттів на контактні поверхні підшипників зменшується інтенсивність зношування, стабілізується тертя і знижується потреба у додатковому мастилі. У роботах Литовченка І.В. та Дяченка С.А. [6] обґрунтовано доцільність використання



таких покриттів у машинобудуванні, зокрема при модернізації елементів, що працюють у режимі сухого або граничного тертя.

Також у публікації [7] підкреслено, що попередня обробка поверхні має не менше значення, ніж вибір типу покриття, оскільки мікрогеометрія основи впливає на адгезію та ефективність роботи у динамічному навантаженні. Таким чином, оптимальне поєднання матеріалу основи, структури покриття та технології його нанесення є вирішальним фактором у забезпеченні довговічності підшипникового вузла.

У публікаціях, присвячених трибології високонавантажених вузлів, часто зазначається важливість правильного вибору покриття залежно від характеру навантажень та температурного режиму. Для турбоагрегатів характерні циклічні теплові навантаження, високі швидкості обертання і значне динамічне навантаження на опори. У таких умовах особливо ефективними виявляються покриття типу AlTiN, які поєднують високу твердість з термічною стабільністю [5].

Показники зниження коефіцієнта тертя при використанні таких покриттів, за літературними джерелами [3, 4], можуть досягати понад 50% порівняно з непокритими деталями. Зниження зносу відбувається також за рахунок зменшення контактної температури, що позитивно впливає на збереження мастильного шару.

Крім того, важливо враховувати не лише хімічний склад покриття, але й його товщину, структуру та спосіб нанесення. Як показують результати досліджень [8], застосування TiN у вигляді тонкого рівномірного шару дозволяє значно зменшити втрати на тертя та підвищити ресурс у вузлах з періодичним навантаженням.

Аналіз відкритих публікацій і технічних звітів дозволяє зробити висновок, що застосування наноструктурованих покриттів забезпечує істотне покращення показників довговічності. Зокрема, для підшипників із покриттям DLC у літературі фіксується зниження зношування до 4–6 разів, порівняно зі звичайною сталлю [2, 5]. У поєднанні з правильно підібраними умовами експлуатації це дозволяє значно знизити витрати на ремонт і обслуговування.

Значна кількість робіт також підтверджує доцільність модернізації наявних вузлів шляхом нанесення покриттів без зміни їх геометрії. Такий підхід актуальний для промислових підприємств, де необхідно швидко продовжити строк служби агрегатів без зупинки виробництва.

До основних переваг використання нанопокриттів у підшипникових вузлах можна віднести:

- суттєве зменшення тертя та зносу;
- підвищення температурної стійкості;
- зниження частоти технічного обслуговування;
- можливість роботи в умовах недостатнього змащення;
- покращення стабільності роботи при динамічних навантаженнях.

З огляду на вказане, впровадження таких технологій є доцільним не лише на етапі проектування, але й при модернізації обладнання. Наприклад, за даними виробничої практики, ремонт підшипникових вузлів турбогенераторів із заміною тіл кочення коштує у 3–5 разів більше, ніж нанесення твердого покриття на існуючі компоненти.

Необхідно також звернути увагу на екологічний аспект: зниження обсягів мастильних матеріалів зменшує навантаження на систему утилізації та очищення, що відповідає сучасним вимогам європейського екостандарту.

## ВИСНОВКИ

Наноструктуровані покриття демонструють високу ефективність у збільшенні ресурсу підшипникових вузлів, що працюють у важких умовах, зокрема в турбоагрегатах. Враховуючи узагальнені дані літератури, можна стверджувати, що застосування твердих покриттів типу AlTiN або DLC забезпечує суттєве зниження зношування, стабільність роботи при підвищених температурах та зниження потреб у частому технічному обслуговуванні.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення поведінки комбінованих покриттів, які поєднують твердість і еластичність, а також на розробку методів локального відновлення поверхонь без демонтажу вузла.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення : навч. посіб. / А. В. Гайдамака. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009.
2. Donnet C., Erdemir A. *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. — Springer, 2008.
3. Tyagi R., Sharma A. *Nanostructured coatings for tribological applications*. — *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2020.
4. Holmberg K., Matthews A. *Coatings Tribology*. — Elsevier, 2009.
5. Bhushan B. *Introduction to Tribology*. — Wiley, 2013.
6. Литовченко І.В., Дяченко С.А. Підвищення ресурсу вузлів тертя машин шляхом використання зміцнюючих покриттів // *Вісник машинобудування та транспорту*. — 2020. — №3. — С. 25–31.
7. Гребенюк С.М., Ткаченко О.В. Вплив структури поверхні на зносостійкість елементів вузлів тертя // *Збірник наукових праць НТУУ "КПІ"*. — 2019. — №4. — С. 52–57.
8. Сидоренко О.П., Поліщук В.В. Вплив режимів нанесення твердих покриттів на зносостійкість підшипників // *Вісник технічних наук*. — 2021. — №2. — С. 41–46.

Сухой Р.А., Шуліка М.С. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)

## ІНТЕЛЕКТ-КАРТИ ЯК ОСНОВА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОБРОЧЕСНОСТІ ПРИ АНАЛІЗІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ ПРИ ВИКОНАННІ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ З ДИСЦИПЛІН ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ

**Анотація:** У статті розглядається використання інтелект-карт як ефективного інструменту забезпечення академічної доброчесності при виконанні індивідуальних завдань здобувачами вищої освіти. Проаналізовано потенціал технології інтелект-карт для структурування інформаційного простору, візуалізації джерел інформації та відстеження власного внеску студента при опрацюванні матеріалів. Запропоновано методичні рекомендації щодо впровадження інтелект-карт у навчальний процес з метою формування культури академічної доброчесності. Результати дослідження демонструють, що систематичне використання інтелект-карт сприяє розвитку критичного мислення, підвищенню якості самостійної роботи та зниженню випадків академічного плагіату.

**Ключові слова:** інтелект-карти, академічна доброчесність, інформаційний простір, індивідуальні завдання, критичне мислення, плагіат, візуалізація знань.

**Abstract:** The article examines the use of mind maps as an effective tool for ensuring academic integrity during the completion of individual assignments by higher education students. The potential of mind mapping technology for structuring the information space, visualizing information sources, and tracking the student's own contribution during material processing is analyzed. Methodological recommendations are proposed for integrating mind maps into the educational process to foster a culture of academic integrity. The research results demonstrate that systematic use of mind maps promotes the development of critical thinking, improves the quality of independent work, and reduces instances of academic plagiarism.

**Keywords:** mind maps; academic integrity; information space; individual assignments; critical thinking; plagiarism; knowledge visualization.

Академічна доброчесність є фундаментальною цінністю сучасної освіти та науки. В умовах інформаційного суспільства та зростаючої доступності інформаційних ресурсів питання забезпечення доброчесності набуває особливої актуальності. Індивідуальні завдання, що є невід'ємною складовою освітнього процесу, потребують від здобувачів освіти вміння аналізувати великі обсяги інформації, критично її осмислювати та творчо переосмислювати без порушення принципів академічної етики.

Метою дослідження є обґрунтування ефективності використання інтелект-карт як інструменту забезпечення академічної доброчесності при аналізі інформаційного простору та виконанні індивідуальних завдань здобувачами вищої освіти.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретичні засади використання інтелект-карт в освітньому процесі.

2. Визначити потенціал інтелект-карт для структурування інформаційного простору та запобігання плагіату.
3. Розробити методичні рекомендації щодо впровадження інтелект-карт у систему забезпечення академічної доброчесності.
4. Експериментально перевірити ефективність запропонованої методики.

Інтелект-карти (mind maps) — це візуальний метод запису та організації інформації, розроблений британським психологом Тоні Бьюзеном у 1970-х роках. Концептуально інтелект-карта представляє собою діаграму, в центрі якої розміщується ключове поняття або ідея, від якої радіально розходяться гілки з пов'язаними поняттями, ідеями, фактами та іншими елементами [1].

Ключовими принципами побудови інтелект-карт є:

- радіальна структура і ієрархічність інформації;
- використання ключових слів та образів;
- застосування кольорів, символів та візуальних елементів;
- встановлення зв'язків між елементами карти.

В освітньому процесі інтелект-карти використовуються для різноманітних цілей, зокрема:

- конспектування лекцій та літератури;
- планування та структурування наукових робіт;
- підготовка до іспитів та презентацій;
- візуалізація складних концепцій та ідей;
- генерація нових ідей та проєктів.

Дослідження показують, що використання інтелект-карт сприяє кращому запам'ятовуванню матеріалу, розвитку критичного мислення та креативності [2]. За даними [3], студенти, які регулярно використовують інтелект-карти, демонструють на 30% вищу здатність до аналізу інформації та встановлення логічних зв'язків між концепціями.

Академічна доброчесність — це сукупність етичних принципів та визначених законом правил, якими мають керуватися учасники освітнього процесу під час навчання, викладання та провадження наукової діяльності [4]. Основними складовими академічної доброчесності є чесність, довіра, справедливість, повага, відповідальність та мужність/

В інформаційному суспільстві забезпечення академічної доброчесності стикається з низкою викликів:

- легкий доступ до інформації через інтернет;
- складність відстеження першоджерел інформації;
- інформаційне перевантаження;
- поширення "культури копіювання" серед здобувачів освіти.

У дослідженні взяли участь студентів бакалаврату та магістратури різних спеціальностей.

Методи дослідження:

- теоретичні: аналіз науково-методичної літератури, синтез, порівняння, узагальнення;
- емпіричні: педагогічний експеримент, спостереження, анкетування, аналіз студентських робіт;
- статистичні: кількісний та якісний аналіз отриманих даних.

Експериментальна методика передбачала впровадження інтелект-карт як обов'язкового компонента виконання індивідуальних завдань (курсівих робіт, проєктів, рефератів) з різних дисциплін. Студенти експериментальної групи систематично використовували інтелект-карти на всіх етапах роботи: від пошуку інформації до написання готової роботи. Контрольна група виконувала завдання традиційними методами.

Аналіз процесу використання інтелект-карт студентами показав, що вони дозволяють ефективно структурувати інформаційний простір при виконанні індивідуальних завдань. Інтелект-карти дають можливість:

1. Візуалізувати джерельну базу дослідження. Кожне джерело інформації може бути представлене окремою гілкою з зазначенням бібліографічних даних та ключових ідей автора. Такий підхід дозволяє чітко відстежувати використані джерела та уникати ненавмисного плагіату.
2. Розмежовувати власні ідеї та запозичені. При роботі з інтелект-картою студенти можуть використовувати різні кольори або символи для позначення власних думок та ідей, запозичених з літератури, що сприяє усвідомленню свого інтелектуального внеску.
3. Створювати цілісне бачення проблеми. Радіальна структура інтелект-карти дозволяє бачити проблему як цілісну систему, а не як набір фрагментарних відомостей з різних джерел, що спонукає до критичного осмислення та синтезу інформації.
4. Встановлювати логічні зв'язки між концепціями. Інтелект-карти візуалізують зв'язки між різними поняттями та концепціями, що сприяє формуванню власного розуміння теми та запобігає механічному копіюванню тексту.

На основі проведеного дослідження розроблено методику використання інтелект-карт для забезпечення академічної доброчесності, яка включає наступні етапи:

1. Підготовчий етап:
  - ознайомлення студентів з принципами побудови інтелект-карт;
  - роз'яснення зв'язку між використанням інтелект-карт та дотриманням принципів академічної доброчесності;
  - демонстрація прикладів ефективного використання інтелект-карт.
2. Етап пошуку та аналізу інформації:
  - створення центрального вузла з назвою теми дослідження;
  - формування основних гілок відповідно до завдань дослідження;

- додавання гілок для кожного використаного джерела з зазначенням бібліографічних даних;
  - виокремлення ключових ідей з джерел з використанням цитування.
3. Етап синтезу та критичного осмислення:
- встановлення зв'язків між різними джерелами та концепціями;
  - виділення суперечностей та дискусійних питань;
  - додавання власних думок та ідей з використанням відмінного кольору або символів.
4. Етап створення оригінального тексту:
- розробка структури роботи на основі інтелект-карти;
  - використання карти як джерела для написання тексту з коректним посиланням на джерела;
  - перевірка на наявність плагіату та самоплагіату.
5. Етап рефлексії:
- аналіз створеної інтелект-карти та готової роботи;
  - оцінка власного внеску у розробку теми;
  - визначення напрямків для подальшого дослідження.

Впровадження цієї методики дозволяє сформувати у студентів навички коректного опрацювання інформації та запобігти ненавмисному плагіату, який часто виникає через неструктуроване опрацювання великих обсягів інформації.

Порівняльний аналіз робіт студентів експериментальної та контрольної груп показав суттєві відмінності у якості робіт та дотриманні принципів академічної доброчесності (табл. 1).

**Таблиця 1. Порівняльні результати експериментальної та контрольної груп**

Показник	Експериментальна група	Контрольна група
Середній відсоток оригінальності тексту	86,4%	67,8%
Наявність коректних цитувань та посилань	94,2%	62,3%
Логічність структури роботи	88,7%	71,2%
Наявність власних висновків та міркувань	76,3%	48,9%
Кількість робіт з ознаками плагіату	7,8%	34,6%

Як видно з таблиці, у експериментальній групі спостерігається суттєве підвищення якості робіт та зниження випадків плагіату. Особливо значущим є показник наявності власних висновків та міркувань, що свідчить про розвиток критичного мислення та аналітичних здібностей студентів.

Анкетування учасників експериментальної групи виявило позитивне ставлення до використання інтелект-карт:

- 83,1% студентів відзначили, що інтелект-карти допомогли їм краще структурувати інформацію;
- 76,8% вказали на підвищення усвідомленості при використанні джерел;
- 68,3% планують використовувати інтелект-карти в подальшій навчальній та науковій діяльності.

Проведене дослідження дозволяє дійти важливих висновків щодо ролі інтелект-карт у забезпеченні академічної доброчесності в освітньому процесі. Встановлено, що інтелект-карти виступають дієвим інструментом при виконанні індивідуальних завдань, оскільки допомагають структурувати інформаційний простір, наочно відображати використані джерела інформації та фіксувати особистий внесок здобувача освіти. Такий підхід не лише забезпечує прозорість виконання завдань, а й формує усвідомлену відповідальність за академічну чесність. Крім того, дослідження показало, що застосування інтелект-карт активно сприяє розвитку критичного мислення, аналітичних здібностей і навичок академічного письма, які є основними компетентностями для дотримання стандартів академічної доброчесності. Використання запропонованої методики інтеграції інтелект-карт у навчальний процес підтвердило свою високу ефективність у формуванні культури доброчесності серед здобувачів освіти та у зниженні кількості випадків плагіату. Нарешті, систематичне впровадження інтелект-карт у навчальну діяльність сприяє закріпленню у студентів стійких навичок коректної роботи з інформаційними джерелами, що, у свою чергу, має позитивний довготривалий вплив на академічну поведінку як під час навчання, так і в подальшій професійній діяльності.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1.Бьюзен Т. Супермислення та інтелект-карти. Київ : КМ-Букс, 2019. 224 с.
- 2.Буйницька О. Інтелект-карти як інструмент візуалізації знань у цифровому навчальному середовищі. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2021. Т. 84, № 4. С. 154-167. DOI: 10.33407/ilt.v84i4.3602
- 3.Дяченко С. Використання ментальних карт у процесі навчання студентів. *Педагогічні науки : збірник наукових праць*. 2020. Вип. 92. С. 45-52. DOI: 10.32999/ksu2413-1865/2020-92-6
- 4.Про освіту : Закон України від 05.09.2017 р. № 2145-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 38-39. Ст. 380.

**Товкач А.О., Козлов С.Л.** (Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна)

## СТІЙКІСТЬ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА НА ОСНОВІ МУЛЬТИРЕЖИМНОГО РЕГУЛЯТОРА

**Анотація.** У статті наведено схему мехатронного привода, що включає регульований насос з мультирежимним регулятором та контролер. Розглянуті режими роботи мехатронного привода. Розроблено нелінійну математичну модель. Проведено дослідження стійкості роботи мехатронного привода при різних величинах тиску та подачі насоса. Показано, що стійкість роботи мехатронного привода в діапазоні подач насоса  $Q_2 = (0,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  та тиску до 16 МПа може бути забезпечена за рахунок вибору певних параметрів регулятора. Так величина дроселя в регуляторі насоса  $f_0$  повинна вибиратись з діапазону  $f_0 = (2,5 \dots 6,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , а коефіцієнт підсилення  $k_z$  робочого вікна золотника регулятора повинен вибиратись із діапазону  $k_z = (3 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

**Ключові слова:** мехатронний привод; мультирежимний регулятор; регульований насос; нелінійна математична модель

**Abstract.** The article presents a scheme of a mechatronic drive that includes a controlled pump with a multi-mode regulator and a controller. The operating modes of the mechatronic drive are considered. A nonlinear mathematical model has been developed. Stability studies of the mechatronic drive operation at different values of pump pressure and flow rate have been carried out. It is shown that the stability of the mechatronic drive within the pump flow rate range of  $Q_2 = (0,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  and pressure up to 16 MPa can be ensured by selecting specific regulator parameters. In particular, the orifice area  $f_0$  in the pump regulator should be selected from the range  $f_0 = (2,5 \dots 6,5) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , and the gain coefficient  $k_z$  of the spool valve working window should be selected from the range  $k_z = (3 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

**Keywords:** mechatronic drive; multi-mode regulator; controlled pump; nonlinear mathematical model.

Постановка проблеми.

В промисловості, в будівництві та на транспорті широко застосовуються маніпулятори з мехатронним приводом. Тенденцією розвитку маніпуляторів є перехід на мехатронні приводи. В сучасних мехатронних приводах з електрогідравлічним керуванням широко використовуються регульовані насоси, пропорційні клапани та програмовані контролери. Мехатронні приводи на основі таких компонентів мають хороші статистичні та динамічні характеристики, а також високу енергоефективність [1]. У Вінницькому національному технічному університеті (Україна) ведуться роботи по вдосконаленню схем мехатронних приводів. Їх характеристики багато в чому залежать від схеми та конструкції електрогідравлічних регуляторів, що забезпечують керування [2, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.



Проблемі вдосконалення мехатронних приводів на основі регульованих насосів присвячена значна кількість робіт [5-10].

У статті [5] розглядається гідравлічна система з регульованим насосом і електрогідравлічним регулятором. Було проведено порівняння між використанням ПІД-регулятора та регулятора FUZZY для керування гідравлічним приводом. У роботі [6] наведено вдосконалену конструкцію регулятора аксіально-поршневого насоса. Доведено, що регулятор забезпечує необхідну чутливість і швидкодію в порівнянні з промисловими двозолотниковими регуляторами для LS-керованих гідросистем. У статті [7] розглядається гідравлічна система на основі регульованого насоса та контролера. У застосованому ПІД-регуляторі проведено підбір коефіцієнтів, що забезпечують мінімізацію оцінки інтегральної точності. У роботі [8] представлено привод, чутливий до навантаження з удосконаленим регулятором насоса. Модернізація регулятора забезпечує покращення характеристик зниження втрат потужності та коливань. У статті [9] наведено математичну модель автоматичного двозолотникового регулятора для живлення аксіально-поршневого насоса. Розроблено рекомендації щодо вибору зазорів і перекриттів золотників, величин демпфуючих отворів.

Постановка задачі.

Проведений аналіз робіт дозволяє зробити висновок, що розроблення нових регуляторів для насосів з покращеними характеристиками є тенденцією розвитку мехатронних приводів. В даній роботі вирішується задача забезпечення стійкості роботи мехатронного привода з мультирежимним регулятором.

На рис. 1 наведено схему мехатронного привода на основі регульованого насоса з мультирежимним регулятором.

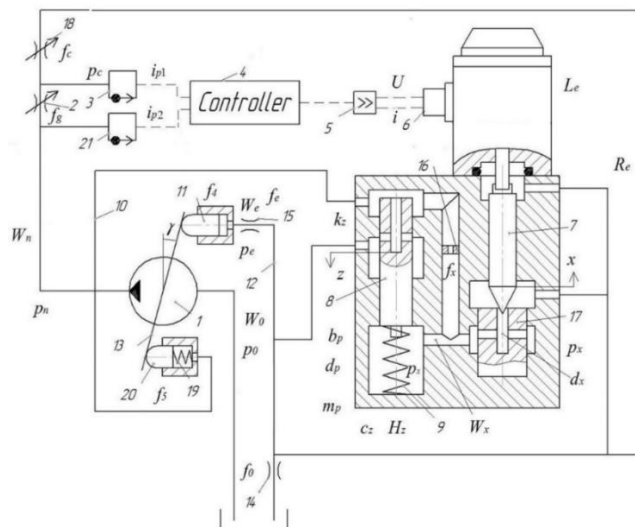


Рисунок 1 – Схема мехатронного привода

Мехатронний привод включає регульований насос 1, на виході якого послідовно встановлені регульовані дроселі 2 та 18. Регульований насос 1 оснащений електрогідравлічним мультирежимним регулятором, який включає золотник 8 та сервоклапан 7. Датчик тиску 3 підключений до

гідролінії, що з'єднує регульовані дроселі 2 та 18, а датчик тиску 21 підключений до гідролінії, що з'єднує насос 1 і регульований дросель 2 через контролер 4 та підсилювач 5. Працює мехатронний привод в трьох режимах: холостого ходу, регулювання подачі, захисту від перенавантаження. В режимі холостого ходу при відсутності сигналу від контролера 4 робоча рідина від насоса буде поступати в гідролінію нагнітання 10 і далі до золотника 8 та сервоклапана 7. Робоча рідина буде під невеликим тиском  $p_x$  поступати в бак, а на виході насоса 1 буде створено тиск  $p_n$ , величина якого буде визначатись тиском  $p_x$  та величиною зусилля, що створюється пружиною 9. Тиск  $p_n$  в цьому випадку буде невеликим (порядку 1,5 МПа). Робоча рідина через вікно золотника 8 буде поступати через дросель 14 в бак та через дросель 15 до сервоциліндра 11, створюючи тиск  $p_c$ . Під дією тисків  $p_n$ ,  $p_c$  та пружини 19 планшайба 1 буде знаходитись в положенні, при якому подача насоса 1 буде покривати лише витрату через золотник 8 та сервоклапан 7. В режимі регулювання подачі, при частковому перекиванні дроселя 18 та відкритому дроселі 2 будуть створюватись тиски  $p_n$  та  $p_c$ . Датчик 3 створює сигнал  $i_{p1}$ , пропорційний тиску  $p_c$ , а датчик 21 створює сигнал  $i_{p2}$ , пропорційний тиску  $p_n$ . Сигнали  $i_{p1}$  та  $i_{p2}$  поступають до контролера 4, який через підсилювач 5 формує сигнал  $i$ , що надходить до електромагніта 6. Електромагніт 6 створює на сервоклапані 7 зусилля пропорційне сигналу  $i$ . Сервоклапан 7 формує тиск  $p_x$ . Золотник 8 буде забезпечувати величину тиску  $p_n$  в гідролінії нагнітання 10. Величина тиску  $p_n$  буде перевищувати величину тиску  $p_c$  на постійну різницю  $\Delta p_g$ , величина якої визначається контролером 4. Це дозволяє змінювати площу робочого вікна дроселя 2 і таким чином змінювати величину подачі насоса. Величина подачі насоса  $Q_n$  буде підтримуватись постійною, незалежно від величини тиску  $p_c$ . В режимі захисту від перенавантаження, у випадку повного перекриття регульованого дроселя 18 тиск  $p_c$  буде різко зростати і відповідно будуть зростати сигнали від датчиків 3 та 21. В контролері програмно реалізовано обмеження сигналу  $i$ , що подається контролером 4 на електромагніт 6. В цьому випадку буде обмежено зусилля, що формується електромагнітом 6 на сервоклапані 7, а відповідно буде обмежена величина тиску  $p_x$ . Це в свою чергу обмежить зростання тиску  $p_n$  в гідролінії 10. Робоча рідина під тиском  $p_n$  буде поступати через робоче вікно золотника 8 і буде створювати тиски  $p_0$  та  $p_c$ . Під дією тисків  $p_c$ ,  $p_n$  та пружини 19 планшайба насоса 1 буде переведена в положення близьке до нульового кута  $\gamma$ . Подача насоса 1 зменшиться і буде компенсувати лише незначні витрати робочої рідини через робочі вікна сервоклапана 7 та золотника 8. Тиск  $p_n$  на виході насоса 1 буде встановлено на високому рівні. Значення тиску  $p_n$  буде визначатись максимальним значенням сигналу  $i$ , що подається контролером на електромагніт 6 та зусиллям пружини 9 золотника 8. Таким чином буде забезпечено захист насоса від перенавантаження.

Математична модель мехатронного приводу, що включає регульований насос з регулятором складається із рівнянь, до яких входять

рівняння моментів, що діють на планшайбу 13 насоса 1 (рівняння 1), рівняння сил, що діють на золотник 8 (рівняння 2) та на сервоклапан 7 (рівняння 3), а також рівняння нерозривності потоків для гідроліній між насосом 1, регульованим дроселем 2, золотником 8 та сервоклапаном 7 (рівняння 4), між золотником 8 та дроселями 14 і 15 (рівняння 5), між дроселем 15 та сервоциліндром 11 (рівняння 6), між дроселем 16 та сервоклапаном 7 (рівняння 7), між регульованими дроселями 2 та 18 (рівняння 8), рівняння, що описує роботу датчиків та контролера (рівняння 9), залежність моменту опору на планшайбі 13 насоса 1 від величини тиску на виході насоса та подачі насоса (рівняння 10). Математична модель розроблена при таких допущеннях та спрощеннях. Розглядаються зосереджені параметри насоса та регулятора; температура робочої рідини за час протікання перехідного процесу не змінюється; хвильові процеси в трубопроводах не враховуються; коефіцієнти потоку через дросельні та сервоклапан є постійними; режим роботи насоса – безкавітаційний; втрати тиску в гідролініях не враховуються; робота датчиків тиску та підсилювача моделюється пропорційними ланками, сили сухого тертя в золотнику та сервоклапані не враховувались.

$$I \frac{d^2\gamma}{dt^2} = p_n f_5 l - p_e f_4 l - b_\gamma \frac{d\gamma}{dt} - M_c; \quad (1)$$

$$p_n \frac{\pi d_p^2}{4} - p_x \frac{\pi d_p^2}{4} - c_z(z + H_z) - b_p \frac{dz}{dt} = 0; \quad (2)$$

$$p_x \frac{\pi d_x^2}{4} = \left( L_e \frac{di}{dt} + i R_e \right) \cdot k_e - b_x \frac{dx}{dt}; \quad (3)$$

$$F_7 d_8 k_1 n_n \operatorname{tg} \gamma = \mu f_x \sqrt{\frac{2|p_n - p_x|}{\rho}} \operatorname{sign}(p_n - p_x) + \mu f_g \sqrt{\frac{2|p_n - p_c|}{\rho}} \times \\ \times \operatorname{sign}(p_n - p_c) + \mu k_z z \sqrt{\frac{2|p_n - p_0|}{\rho}} \operatorname{sign}(p_n - p_0) + \beta_n W_n \frac{dp_n}{dt}; \quad (4)$$

$$\mu k_z z \sqrt{\frac{2|p_n - p_0|}{\rho}} \operatorname{sign}(p_n - p_0) + \mu \pi d_x x \cdot \sin \frac{\alpha_x}{2} \sqrt{\frac{2p_x}{\rho}} = \\ = \mu f_e \sqrt{\frac{2|p_0 - p_e|}{\rho}} \operatorname{sign}(p_0 - p_e) + \mu f_0 \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} + \beta_p W_0 \frac{dp_0}{dt}; \quad (5)$$

$$\mu f_e \sqrt{\frac{2|p_0 - p_e|}{\rho}} \operatorname{sign}(p_0 - p_e) = \beta_p W_e \frac{dp_e}{dt} - f_4 l \frac{d\gamma}{dt} \cdot \cos \gamma; \quad (6)$$

$$\mu f_x \sqrt{\frac{2|p_n - p_x|}{\rho}} \text{sign}(p_n - p_x) = \mu p d_x x \cdot \sin \frac{\alpha_x}{2} \sqrt{\frac{2|p_x - p_0|}{\rho}} \text{sign}(p_x - p_0) + \beta_p W_x \frac{dp_x}{dt}; \quad (7)$$

$$\mu f_g \sqrt{\frac{2|p_n - p_c|}{\rho}} \text{sign}(p_n - p_c) = \mu f_c \sqrt{\frac{2p_c}{\rho}} + \beta_n W_c \frac{dp_c}{dt}; \quad (8)$$

$$p_n k_4 F_{k2}(i_{p2}) p_c k_4 F_{k1}(i_{p1}) = L_e \frac{di}{dt} + i R_e; \quad (9)$$

$$M_c = m_0 + m_1 Q_n + m_2 p_n + m_3 Q_n^2 + m_4 p_n^2 + m_5 p_n Q_n; \quad (10)$$

$p_n, p_c, p_e, p_0, p_x$  – тиски на виході насоса 1, вході в дросель 18 в системі керування насосом 1, в гідроциліндрі 11 та на вході в сервоклапан 7;  $z, x$  – координати положення золотника 8, сервоклапана;  $\gamma$  – кут повороту планшайби насосу 1;  $f_0, f_e, f_g, f_c$  – площі дроселів 14 та 15, площі робочих вікон регульованих дроселів 2 та 18;  $d_p, d_g, d_x$  – діаметри золотника 8, діаметр кола контакту поршнів насоса с планшайбою насоса, діаметр отвору сідла 17;  $i, i_{p1}, i_{p2}$  – величини струму в обмотках електромагніта та на виході датчиків тиску;  $k_e, k_u, k_1$  – коефіцієнти пропорційності зусилля електромагніта, датчика тиску, кількість поршнів в насосі 1;  $L_e, R_e$  – індуктивність та активний опір обмоток електромагніта;  $c_z$  – жорсткість пружини золотника 8;  $\mu$  – коефіцієнт потоку через дросельні та золотникові елементи;  $\rho$  – густина робочої рідини;  $l$  – плече дії сервоциліндрів насоса 1;  $I$  – момент інерції планшайби насоса 1;  $W_n, W_0, W_c, W_e, W_x$  – об'єми гідроліній на виході насоса 1, між золотником 8 та дроселем 14, на вході дроселя 18, між дроселем 15 та сервоциліндром 11 насоса 1, між дроселем 16 та сервоклапаном 7;  $n_n$  – число обертів валу насоса 1;  $F_{k1}(i_{p1}), F_{k2}(i_{p2})$  – передавальна функція контролера 4;  $H_z$  – попереднє стиснення пружини золотника 8;  $m_0, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – коефіцієнти залежності моменту опору на планшайбі насоса 1 від величини подачі та тиску;  $M_c$  – момент опору на планшайбі насоса 1;  $\beta_p$  – приведений коефіцієнт податливості газорідинної суміші;  $\beta_n$  – приведений коефіцієнт гумо-металевих трубопроводів та газорідинної суміші;  $b_p, b_x$  – коефіцієнти демпфування золотника 8 та сервоклапана 7.

Розроблена математична модель мехатронного привода дозволяє визначати його характеристики. Першим етапом при розробці мехатронного привода є забезпечення умов його стійкої роботи. Математичного модель мехатронного привода оброблялось в середовищі MATLAB-Simulink. Для розв'язання рівнянь математичної моделі використано метод Розенброка. Абсолютна похибка при розв'язанні рівнянь не перевищувала  $10^{-6}$ , а відносна  $10^{-3}$ . Визначався перехідний процес в механотронному приводі при ступінчастій зміні площі дроселя 2. Знаходилась залежність змінних, що визначають роботу мехатронного привода від часу. За видом перехідного процесу визначалось, чи є робота привода стійкою. В процесі розрахунків на осцилограф виводились залежності від часу наступних змінних:  $p_n$  – тиск на виході насоса;  $i$  – струм на вході в електромагніт 6;  $\gamma$  – кут повороту планшайби насоса 1.

На рис. 2 представлено вплив подачі  $Q_n$ , насоса 1 та тиску  $p_c$  на вході в дросель 18 на стійкість роботи мехатронного привода. Результати досліджень показали, що нестійка робота мехатронного привода виникає при малих значеннях подачі  $Q_n < 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , при великих значеннях подачі  $Q_n > 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , також при великих значеннях тиску  $p_n > 15 \text{ МПа}$ .

В процесі досліджень знайдено можливість забезпечення стійкої роботи мехатронного привода при зміні значенні подачі  $Q_n$  в діапазоні  $Q_n = (0,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , та тиску  $p_n$  в діапазоні  $p_n = (1 \dots 16) \text{ МПа}$ . Стійка робота мехатронного привода забезпечується за рахунок раціонального вибору параметрів регулятора:  $f_0$  – площі дроселя 14,  $k_z$  – коефіцієнта підсилення робочого вікна золотника регулятора.

На рис. 3 представлено зображення зон стійкої і нестійкої роботи мехатронного привода в залежності від сполучення параметрів  $f_0$  та  $k_z$ . Визначено, що при виборі  $f_0$  з діапазону  $f_0 = (3 \dots 6) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $k_z$  з діапазону  $k_z = (8 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  забезпечується стійка робота в усьому діапазоні зміни  $p_n$  та  $Q_n$ .

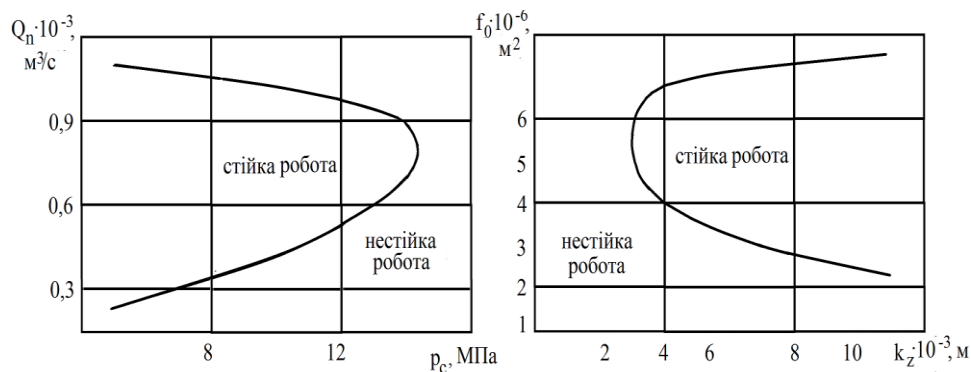


Рисунок 2 – Вплив режимів роботи на стійкість мехатронного привода

Рисунок 3 – Вплив параметрів регулятора на стійкість мехатронного привода

На рис. 4 представлені перехідні процеси розраховані для мехатронного привода при сполученні  $f_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $k_z = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  (рис. 4, а) та при сполученні  $f_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $k_z = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  (рис. 4, б). при останньому сполученні параметрів мехатронний привод працює стійко і має затухаючий перехідний процес.

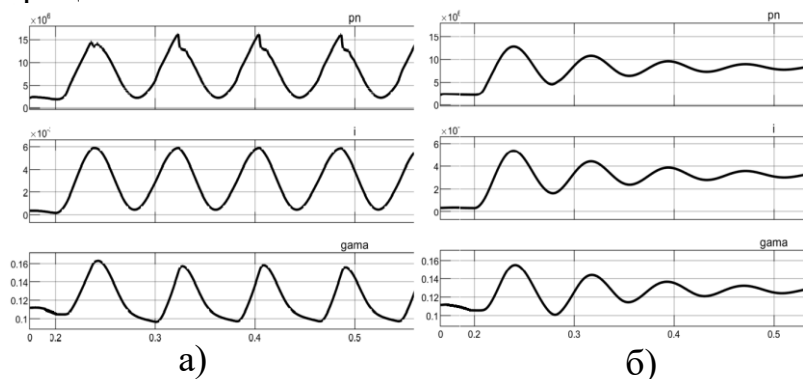


Рисунок 4 – Перехідні процеси мехатронного привода  
Висновок.

1. Забезпечення стійкої роботи мехатронного привода можливе за рахунок раціонального вибору конструктивних параметрів регулятора насоса.

2. Стійка робота мехатронного привода в діапазоні подач  $Q_n = (0,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  та при тиску  $p_n = (1 \dots 16) \text{ МПа}$  забезпечується при виборі регулятора насоса з діапазонів  $f_0 = (3 \dots 6) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $k_z = (8 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

#### Список литературы

1. Ding, R.; Zhang, J.; Xu, B.; Cheng, M.; Pan, M. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. *Energy Conversion and Management*, 188, pp. 447-461, (2019), doi:10.1016/j.enconman.2019.03.023

2. Leonid G. Kozlov, Volodymyr V. Bogachuk, Victor V. Bilichenko, Artem O. Tovkach, Konrad Gromaszek, and Samat Sundetov "Determining of the optimal parameters for a mechatronic hydraulic drive", *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080861 (1 October 2018), 10 pages; doi: 10.1117/12.25015280861

3. Volodymyr V. Bogachuk, Leonid H. Kozlov, Artem O. Tovkach, Valerii M. Badakh, Taras V. Tarasenko, Yevhenii O. Kobylanskyi, Zbigniew Omiotek, Gauhar Borankulova, Aigul Tungatarova «Influence of electrohydraulic controller parameters on the dynamic characteristics of a hydrosystem with adjustable pump», *Collective Monograph: "Mechatronic Systems I: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics, and Control*, pp. 267–278", 1st Edition // Leonid K. Polischuk, Waldamar Wojcik. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021 – 420 P.

4. Kozlov, L., Bilichenko, V., Kashkanov, A., Tovkach, A., Kovalchuk, V. *Parametric Synthesis of Electrohydraulic Control System for Variable Displacement Pump Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, pp. 48–57

5. Lovrec, D.; Detiček, E. Improvement of the statical behaviour of pressure controlled axial piston pumps. *J. Mech. Eng.*, 55(12), pp.766-774, (2009).

6. Mondal, N.; Saha, R.; Sanyal, D. A single stage spool valve for the pressure compensator of a variable displacement pump: design, dynamic simulation and comparative study with a real pump. *Sādhanā*, 47(4), p. 279, (2022), doi:10.1007/s12046-022-02038-3

7. Kumar Hati, S.; Pada Mandal, N.; Sanyal, D. Energy-saving design of variable-displacement bi-directional pump-controlled electrohydraulic system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(7), pp.1218-1236, (2021), doi:10.1177/0959651820973898

8. Quanyi, H.; Hong, Z.; Shujun, T.; Xuxin, Q. Performances analysis of a novel load-sensing hydraulic system with overriding differential pressure control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(23), pp. 4331-4343. (2017), doi:10.1177/0954406216667760

9. Mondal, N.; Saha, R.; Mookherjee, S.; Sanyal, D. A novel method to design pressure compensator for variable displacement axial piston pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), pp. 314-334, (2019), doi:10.1177/0954408918783409

10. Козлов Л. Г. Наукові основи розробки систем гідроприводів маніпулятора з адаптивним регулятором на основі нейромереж для мобільних робочих машин / дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец 05.02.02 // Вінницький національний техн. університет, Вінниця, 2015.

Третяк В. В., Квятковский М. Ю., Данаєв О. В. (Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна)

## ВИКОРИСТАННЯ СТРУКТУРНО-АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ МАРШРУТНО-ОПЕРАЦІЙНОГО ОПИСУ ДЕТАЛІ ТИПА «ВАЛ»

**Анотація:** Визначені особливості структурно-аналітичного методу розпізнавання подібностей для формування маршрутного і маршрутно-операційного плану технологічного процесу для деталей авіаційних двигунів. Наведена 3D модель деталі типу «Вал». Представлений план групового технологічного процесу деталі типу «Вал» і план одиничних технологічних процесів в залежності від конструкторсько-технологічних ознак. Виявлені компоненти таблиці емпіричних даних для формування маршрутного і маршрутно-операційного процесів.

**Ключові слова:** структурно-аналітичний метод; розпізнавання подібностей; маршрутний план; маршрутно-операційний план; авіаційні двигуни; деталь типу «Вал»; 3D моделювання; емпіричні дані.

**Abstract:** The features of the structural-analytical method of similarity recognition for the development of route and route-operational plans of the technological process for aircraft engine parts are defined. A 3D model of a "shaft-type" part is presented. The group technological process plan for the "shaft-type" part and individual technological process plans depending on design and technological features are provided. The components of the empirical data table for the formation of route and route-operational processes are identified.

**Keywords:** structural-analytical method; similarity recognition; route plan; route-operational plan; aircraft engines; shaft-type part; 3D modeling; empirical data.

В роботах [1, 2] представлені матеріали, в яких наведені переваги і доведена можливість отримання маршрутного опису деталей авіаційних двигунів за допомогою структурно-аналітичних моделей розпізнавання подібностей.

В сучасних САПР системах, які використовуються в лезвійному та інших технологічних методах не передбачені модулі для формування ТП з автоматичним класифікаційним аналізом даних, бо це досить складна задача і відповідальність за ці рішення може приймати лише спеціаліст. Тому частково або повністю такий класифікаційний аналіз виконує технолог, а потім розраховані дані він може включити окремим модулем роботу САПР.

В простих варіантах і при малих виборках це спрацьовує. Але коли даних багато і потрібно використовувати багато розрахунків і схем, потрібен математичний апарат, який би зміг виконати цю роботу за технолога з найменшими помилками. І це тільки для маршрутного опису.

Отримання маршрутно-операційного опису - більш складна, але дуже важлива задача при формуванні плану технологічного процесу і технологічної документації при автоматизації отримання проектних рішень. Тому вона потребує використання досить складних алгоритмів.

Для формування плану одиночного технологічного процесу методом структурно-аналітичних моделей спочатку необхідно сформувати таблицю імперичних даних для оцінки використання елементів ТП на першому рівні (наприклад при формуванні плану операцій), а вже потім за таким же алгоритмом в сформований план можуть бути додані інші елементи – переходи, оснащення, інструменти та ін.

Наведемо приклад для використання структурно-аналітичних моделей для отримання маршрутно-операційного опису з варіантом формування таблиці імперичних даних за допомогою формувача ТЕД для групового технологічного процесу деталі типа «Вал» (рис. 1).

План одиночного ТП в залежності від конструктивно-технологічних ознак можемо здійснити за допомогою розробленого на кафедрі 204 «ХАІ» програмного модуля «Формувач елементів ТП» для різних ознак деталі.

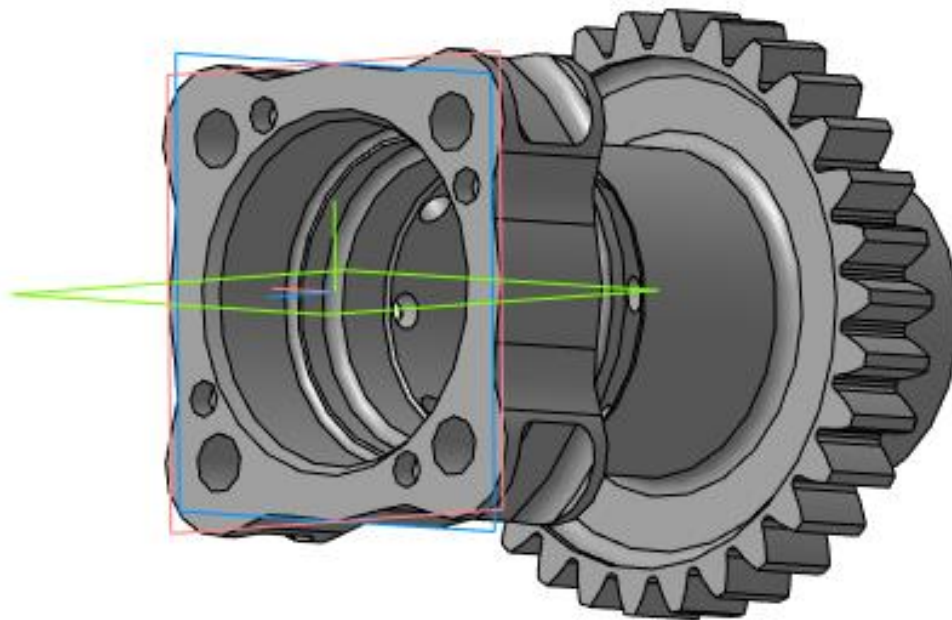


Рисунок 1. 3D вид деталі типа «Вал»

На рис. 2 показано план групового ТП типа «Вал» з використанням тільки маршрутного опису, який включає 35 операцій.

Для формування плану одиночного технологічного процесу (рис. 2) використовуються 35 вершин і 5 змінних: форма заготовки, методи нарізання зубців і шлиців, тип термооброблення і ступінь точності зубців .

Деревоподібна структура ТП вкладається в табличну форму - таблицю імперичних даних (ТЕД), яка в даному випадку для маршрутно – операційного опису складається з 6 стовбців і 86 рядків.

Таблиця може бути сформована за допомогою будівника формування ТЕД (рис. 3).



На рис. 4. показано результат автоматичного формування маршрутно-операційного опису деталі типу «Вал».

В першому стовпці (рис. 3) у вікні перегляду даних представлено номер вершини дерева. Номери вершин можуть співпадати з номерами операцій для

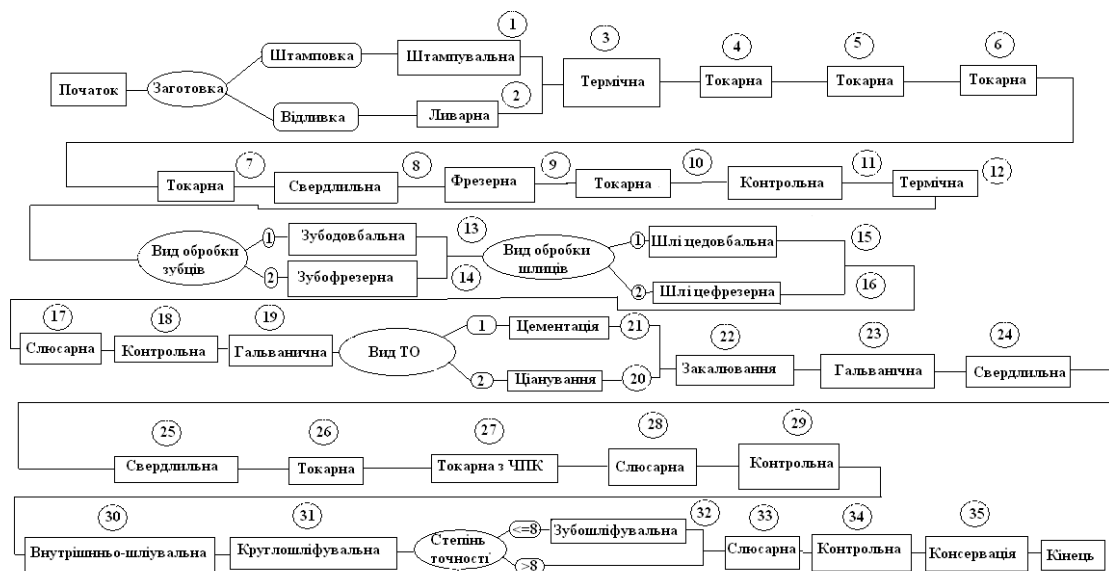


Рисунок 2. План групового технологічного процесу деталі типу «Вал»

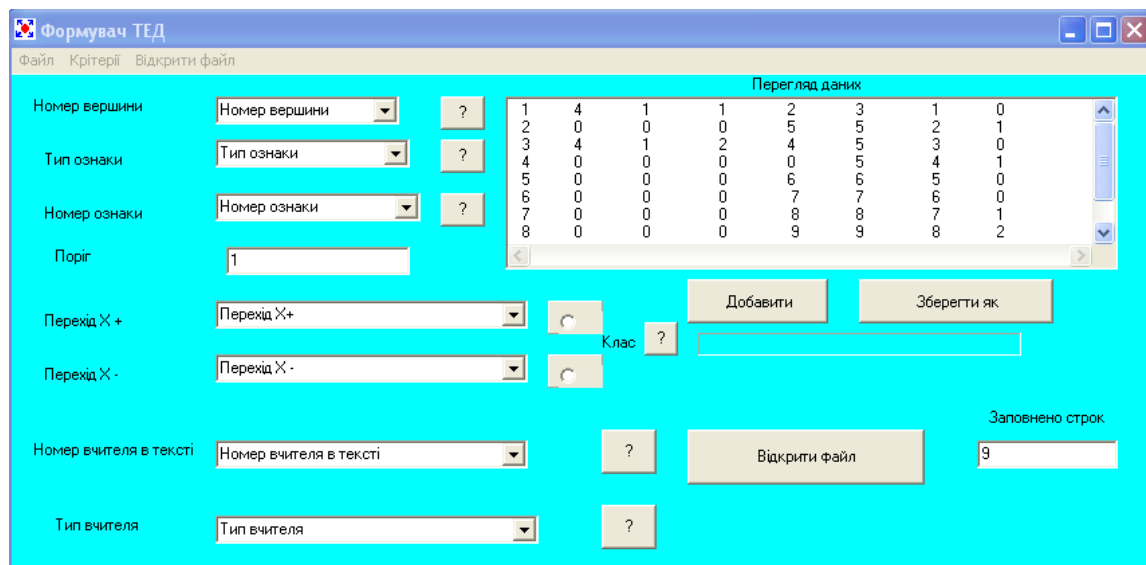


Рисунок 3. Полуавтоматичне формування дерева маршрутно-операційного опису групового ТП маршрутно-операційного опису деталі «Вал» в модулі «Формувач ТЕД»

ТЕД тільки з маршрутним описом [1] і не співпадають з маршрутно-операційним описом, бо в такій формі крім операцій в вершинах можуть бути вказані також варіанти переходів, оснащення, інструмент та ін.). У данному випадку для формування і маршрутного і маршрутно-операційного опису використано 86 вершин.

Другий стовпець вказує на тип ознаки за якою виконується перехід на іншу вершину. Вона може приймати 6 видів: незмінна – 0, бінарна – 1, порядку – 2, кількісна – 3, строкова – 4 і функціональна – 5.

В даному випадку для 5 ознак використовується тільки строковий тип ознаки - 4.

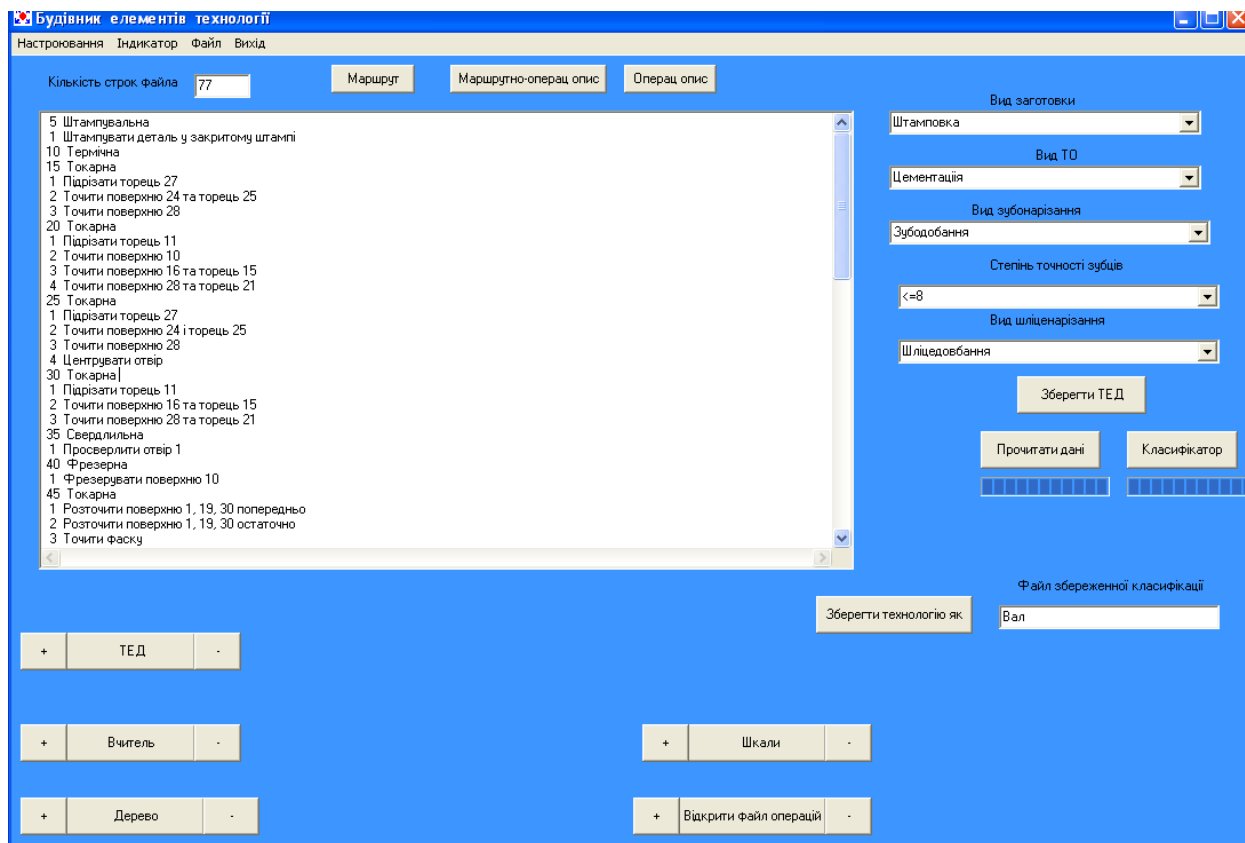


Рисунок 4. Результат автоматичного формування маршрутно-операційного опису деталі типа «Вал»

В третьому стовпці вказується номер ознаки, який відпрацьовується в вершині дерева. В нашому випадку по кожній ознаці їх тільки два (1 або 2). В четвертому стовпці вказується поріг, за яким оцінюється перехід на іншу вершину дерева (в нашому випадку для строкових ознак він може приймати значення по позиціям 1 або 2).

П'ятий і шостий стовпець вказує (в залежності від умов, вони вказані в стовцях 2-4) на можливість переходу в дереві на наступну вершину. У разі виконання умов передбачається перехід на вершину по 5 стовпцю, у разі невиконання – по 6 стовпцю. У разі виконання класифіційних робіт [1] передбачено також вказувати результат класифікації (кнопка «Клас»). В такому випадку до цифри вершини додається позначка «+», яка вказує на належність вершини до класу, який зашифрований цифрою після позначки «+».

Сьомий стовпець передбачає посилання на номер в списку даних вчителя (для маршрутного плану – номер в списку операцій, для

маршрутно-операційного – номер в загальному сформованому списку плану групового ТП з операціями, переходами та ін. Восьмий стовпець передбачає посилання на тип вчителя в загальному списку (0 - операція, 1..9 – переходи і т. п.).

Для виконання розрахунків в верхній частині вікна передбачені кнопки «Маршрут», «Маршрутний опис» і «Операційний опис».

Далі на рис. 5 і 6 представлені розрахунки маршрутного і маршрутно-операційного опису для двох пізніх варіантів конструктивно-технологічних ознак деталі.

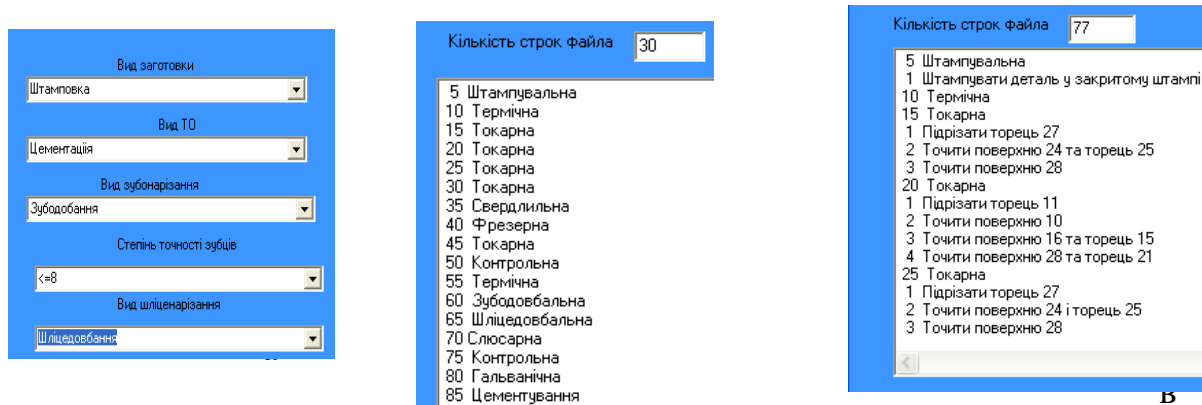


Рисунок 5. Результат формування маршрутного і маршрутно-операційного опису за варіантом 1: а – вимоги для формування технологічного опису; б – маршрутний опис ТП; в – маршрутно-операційний опис ТП за варіантом 1.

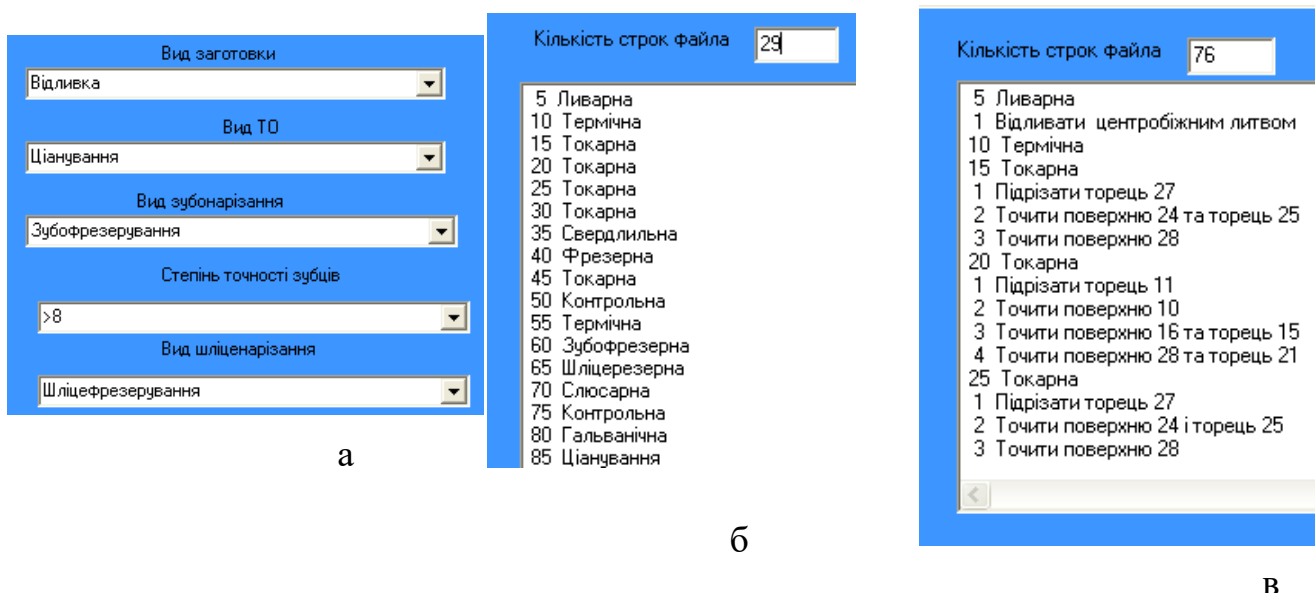


Рисунок 6. Результат формування маршрутного і маршрутно-операційного опису за варіантом 2: а – вимоги для формування технологічного опису; б - маршрутний опис ТП; в - маршрутно-операційний опис ТП за варіантом 2.

На рис. 7 представлена форма для оформлення карти ескізів з розрахованим прикладом ескіза для штампувальної операції.

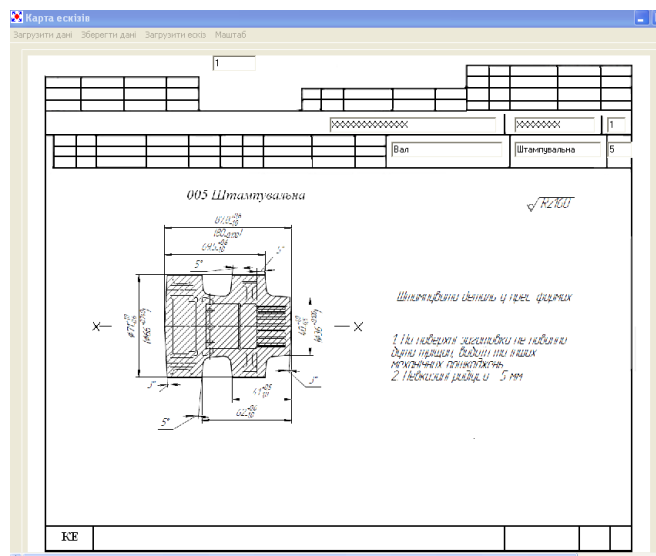


Рисунок 7. Форма для оформлення карти ескізів.

## ВИСНОВКИ

В статті представлені математичні моделі, що до адаптації структурно-аналітичних моделей для формування маршрутного і маршрутно-операційного опису деталі авіаційного двигуна типу «Вал» в варіантах групового і одиничного ТП. Автоматичний і напівавтоматичний метод прийняття рішень досягається за рахунок використання програмних модулів, розроблених на кафедрі «Технологій виробництва авіаційних двигунів» «ХАІ». Даний метод може бути заснований і легко адаптований в сучасних САПР системах для автоматизованого прийняття рішень в технологічному проектуванні. Розроблене програмне забезпечення може бути також використано в навчальному процесі при підготовці фахівців.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Третьяк В. В., Близнюк О. О. Синтез технологічних процесів для об'ємних деталей з використанням структурно-аналітичного методу розпізнавання подібностей // XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023 – С. 40.
2. Близнюк О. О. Автоматичне формування елементів і структури ТП за допомогою структурно-аналітичних моделей розпізнавання образів // Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування. Збірник наукових праць міжнародної молодіжної науково-технічної конференції 10-12 квітня 2024 р. За загальною редакцією д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and Hon. D .Sc., Prof. Predrag Dašić Краматорськ – Вінниця – Тернопіль, 2024 . – С. 118-125.

**Фик С.В.**, (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна)

## **ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОБЛАДНАННЯ**

**Анотація:** У тезах розглянуто актуальність підвищення ефективності виготовлення машин та механізмів переробного виробництва шляхом впровадження інноваційних технологічних процесів. Підкреслено зв'язок технологічності складальних компонентів із розширенням можливостей обладнання, що сприяє підвищенню якості та конкурентоспроможності продукції. Проаналізовано сучасні напрями впровадження інновацій, зокрема використання роботизованих технологічних комплексів, лазерної обробки поверхонь, удосконалення процесів глибокого свердління. Окреслено перспективи подальших досліджень щодо оптимізації технологічних процесів та забезпечення технологічності складальних компонентів машин і механізмів для переробних виробництв.

**Ключові слова:** інноваційні технологічні процеси; технологічність складальних компонентів; розширення можливостей обладнання; роботизовані технологічні комплекси; лазерна обробка; глибоке свердління; автоматизація виробництва; переробне виробництво.

**Abstract:** The paper addresses the relevance of improving the manufacturing efficiency of machines and mechanisms for processing industries through the implementation of innovative technological processes. The relationship between the manufacturability of assembly components and the expansion of equipment capabilities, which enhances product quality and competitiveness, is emphasized. Modern trends in innovation implementation are analyzed, including the use of robotic technological complexes, surface laser treatment, and the improvement of deep drilling processes. Prospects for further research on optimizing technological processes and ensuring the manufacturability of assembly components of machines and mechanisms for processing industries are outlined.

**Keywords:** innovative technological processes; manufacturability of assembly components; expansion of equipment capabilities; robotic technological complexes; laser processing; deep drilling; production automation; processing industry.

В умовах стрімкого розвитку сучасного машинобудування, зокрема в контексті інтеграції роботизації та нанотехнологій, питання підвищення ефективності виготовлення машин і механізмів для переробних виробництв набуває особливої актуальності. Дисертаційне дослідження, присвячене підвищенню ефективності виготовлення зазначеної продукції шляхом забезпечення технологічності їх складальних компонентів, безпосередньо корелює з необхідністю впровадження інноваційних технологічних процесів, що розширюють технологічні можливості наявного обладнання.

Сучасне виробництво характеризується зростаючими вимогами до якості та конкурентоспроможності продукції. Одним із ключових факторів забезпечення цих вимог є оптимізація технологічних процесів. Підвищення якості продукції є одним із завдань системи стандартизації України. У

контексті переробних виробництв, де часто використовуються складні машини та механізми, ефективність їх виготовлення значною мірою залежить від технологічності складальних компонентів. Підвищення технологічності дозволяє мінімізувати витрати ресурсів, скоротити тривалість виробничого циклу та покращити якість готової продукції.

Аналіз наукових публікацій свідчить про значний інтерес до питань оптимізації виробничих процесів та впровадження новітніх технологій у машинобудуванні. Зокрема, дослідження в галузі роботизованих технологічних комплексів та застосування промислових роботів демонструють потенціал автоматизації для підвищення продуктивності. Розглядаються питання використання двозахватних пристроїв для збільшення ефективності РТК.

Також, існують дослідження, присвячені вдосконаленню технологічних процесів обробки матеріалів, наприклад, методом поверхневої лазерної обробки для підвищення зносостійкості інструментів. Розробляються нетрадиційні методи вирішення технологічних проблем, таких як глибоке свердління, шляхом перерозподілу потоків потужності та навантаження.

У сфері переробки відходів спостерігається тенденція переходу до оптимізованого спалювання горючих фракцій з метою одночасного знешкодження та генерації енергії. Це відображає загальний напрямок на ефективне використання ресурсів у переробних виробництвах.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері оптимізації виробничих процесів, питання комплексного забезпечення технологічності складальних компонентів машин та механізмів переробного виробництва з урахуванням специфіки обладнання та можливостей впровадження новітніх технологій потребує подальшого поглибленого вивчення. Зокрема, недостатньо дослідженими залишаються аспекти системної інтеграції інноваційних технологічних процесів на етапі виготовлення складальних компонентів для досягнення максимальної ефективності виробництва.

Метою даної статті є обґрунтування важливості впровадження інноваційних технологічних процесів як ключового фактора розширення технологічних можливостей обладнання та забезпечення технологічності складальних компонентів машин і механізмів переробного виробництва.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення наступних задач:

- Проаналізувати зв'язок між технологічністю складальних компонентів та ефективністю виготовлення машин і механізмів переробного виробництва.

- Розглянути приклади інноваційних технологічних процесів, що можуть бути застосовані для розширення технологічних можливостей обладнання.

- Визначити перспективи подальших досліджень у напрямку забезпечення технологічності складальних компонентів.

Впровадження інноваційних технологічних процесів є ключовим напрямком розширення технологічних можливостей обладнання. Ці процеси можуть включати використання нових матеріалів, прогресивних методів обробки поверхонь, а також оптимізацію існуючих технологій за рахунок застосування сучасного програмного забезпечення та автоматизованих систем керування. Застосування промислових роботів у складі РТК є перспективним напрямком автоматизації металообробного обладнання, що забезпечує необхідну гнучкість. Підвищення продуктивності РТК може бути досягнуто, зокрема, за рахунок використання двозахватних пристроїв.

У руслі теми дисертації, впровадження інноваційних технологічних процесів слід розглядати як засіб підвищення технологічності складальних компонентів машин та механізмів переробного виробництва. Це може включати розробку нових методів виготовлення деталей з покращеними експлуатаційними характеристиками, оптимізацію процесів складання за рахунок застосування гнучких виробничих систем та роботизованих технологічних комплексів.

Важливим аспектом є також прагнення до мінімальної кількості технологічних стадій та застосування безперервних процесів для ефективного використання сировини та енергії.

У контексті машинобудування, підвищення точності обробки на металорізальних верстатах за рахунок застосування приводів з можливістю перерозподілу або управління навантаженням робочих органів є прикладом інноваційного технологічного процесу, що розширює можливості обладнання. Також, вирішення проблем глибокого свердління нетрадиційними методами, що ґрунтуються на перерозподілі потоків потужності та навантаження між приводами верстата, демонструє потенціал інновацій для подолання технологічних обмежень.

Впровадження інноваційних технологічних процесів є визначальним фактором для розширення технологічних можливостей обладнання переробних виробництв та забезпечення технологічності їх складальних компонентів. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню ефективності виготовлення машин і механізмів, покращенню їх якісних характеристик та зростанню конкурентоздатності продукції на ринку.

Подальші дослідження в даному напрямку мають бути спрямовані на розробку та оптимізацію конкретних інноваційних технологічних процесів, що враховують специфіку переробних виробництв та забезпечують максимальну технологічність складальних компонентів. Важливим є також дослідження питань економічної доцільності та впровадження цих технологій на промислових підприємствах.

**Черкашин М.О., Бондаренко А.О.** (НТУ «Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна)

## **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ**

**Анотація:** У статті розглянуто перспективи використання вертикальних гідравлічних класифікаторів для переробки техногенної будівельної сировини, що утворюється внаслідок масових руйнувань. Визначено основні типи класифікаторів за принципом дії, конструктивними особливостями та ефективністю. Проведено порівняльний аналіз прямоструминних, вихрових і регульованих моделей. Особливу увагу приділено впливу гідродинамічних параметрів на якість сортування. Запропоновано рекомендації щодо вибору класифікатора для конкретних умов експлуатації. Зроблено висновки про доцільність впровадження таких систем у практику переробки будівельних відходів. Акцентовано увагу на перевагах переробки такої техногенної сировини й зменшення екологічного навантаження.

**Ключові слова:** техногенні відходи; гідравлічний класифікатор; вертикальні класифікатори; переробка будівельних відходів; гідродинамічні параметри;

**Abstract:** The article discusses the prospects of using vertical hydraulic classifiers for the processing of technogenic construction raw materials generated by mass destruction. The main types of classifiers are identified based on their operating principles, design features, and efficiency. A comparative analysis of straight-flow, vortex, and adjustable models is conducted. Special attention is given to the influence of hydrodynamic parameters on sorting quality. Recommendations are proposed for selecting a classifier according to specific operating conditions. Conclusions are drawn regarding the feasibility of implementing such systems in the practice of construction waste recycling. The advantages of processing technogenic raw materials and reducing environmental impact are emphasized.

**Keywords:** technogenic waste; hydraulic classifier; vertical classifiers; construction waste recycling; hydrodynamic parameters;

### **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами:**

Руйнування інфраструктури України внаслідок воєнної агресії російської федерації призвело до накопичення значних обсягів будівельних відходів. Приблизні підрахунки свідчать про утворення понад 120 млн тонн техногенної сировини лише внаслідок руйнування багатоквартирних будинків. Традиційні методи утилізації відходів — захоронення на полігонах — створюють додаткове екологічне навантаження. У цьому контексті гостро постає проблема ефективної переробки будівельного сміття, в тому числі, дрібнодисперсних фракцій. Зважаючи на важливість повторного використання ресурсів, значну увагу науковців і практиків привертають гідравлічні класифікатори, особливо вертикального типу, які дозволяють виділяти корисні фракції матеріалу з високою точністю [1].



### ***Аналіз останніх досліджень і публікацій:***

Питання повторного використання техногенної сировини висвітлювалися у працях українських і зарубіжних учених: В.І. Полякова, І.В. Слесаренка, J. Müller, T. Schmidt, які досліджували шляхи оптимізації класифікації дрібнодисперсних матеріалів. В роботах зазначено, що вертикальні гідравлічні класифікатори здатні забезпечити високу якість очищення частинок діаметром до 5 мм [2-5]. Попри це, більшість публікацій зосереджена на застосуванні класифікаторів у гірничій справі або металургії, тоді як їх потенціал у переробці будівельних відходів залишається недостатньо розкритим.

### ***Формулювання невирішених частин загальної проблеми:***

Попри визнану ефективність гідравлічних класифікаторів, відсутній системний аналіз конструктивних рішень вертикальних класифікаторів, їх порівняльних характеристик, а також не розкрито вплив окремих параметрів на загальну продуктивність та якість класифікації при роботі з забрудненою техногенною сировиною. Наявні дослідження фрагментарно висвітлюють конструктивні аспекти та не пропонують універсальних рекомендацій щодо вибору типу класифікатора під конкретні умови експлуатації.

### ***Цілі статті та постановка задачі:***

Метою статті є всебічний аналіз вертикальних гідравлічних класифікаторів як технологічного засобу переробки будівельної техногенної сировини. Основні завдання дослідження:

- переваги та недоліки основних типів вертикальних класифікаторів;
- провести порівняльний аналіз конструкцій;

### ***Виклад основного матеріалу дослідження:***

Збройна агресія російської федерації проти України спричинила масштабні руйнування як інфраструктурних об'єктів, так і житлових будівель. За офіційними даними, у період з 2022 по 2024 рік було пошкоджено або зруйновано понад 143 тисячі приватних і понад 24 тисячі багатоквартирних будинків. Враховуючи також пошкодження у тимчасово окупованих населених пунктах, для яких відсутня офіційна статистика, можна припустити, що реальна кількість зруйнованих чи пошкоджених будівель значно перевищує наявні показники.

Для зведення одного дев'ятиповерхового будинку з чотирма під'їздами зазвичай використовують від 5 до 12 тисяч тонн бетону, а у разі монолітного будівництва — до 17 тисяч тонн. Згідно з найскромнішими підрахунками, загальний обсяг техногенних матеріалів, які виникають внаслідок руйнування зазначеної кількості багатоквартирних будівель, може сягати 120 мільйонів тонн. Якщо ж враховувати всі пошкоджені та зруйновані об'єкти, ці обсяги можуть бути набагато більшими [1].

Наразі такі відходи, за умови можливості їх транспортування, переважно зберігаються на спеціалізованих полігонах для будівельного сміття або на відповідних звалищах (рис. 1).



Рисунок 1 – Полігон будівельних відходів в м. Київ

Зберігання будівельних відходів на полігонах, окрім постійного розширення їхньої площі, створює серйозну екологічну загрозу для довкілля [2, 3]. Особливо шкідливими вважаються дрібнодисперсні та пиловаті частинки, які чинять низку негативних впливів:

- забруднення повітря: найменші частинки пилу легко піднімаються в повітря і можуть переноситись на значні відстані, що підвищує ризик виникнення респіраторних захворювань у населення.
- забруднення водних ресурсів: цементний пил, потрапляючи у воду, підвищує рівень рН, що може негативно впливати на стан водної флори і фауни.
- погіршення якості ґрунтів та рослинності: пилові опади та солі спричиняють деградацію ґрунтів, знижують біорізноманіття та призводять до загибелі мікроорганізмів, які забезпечують родючість землі.
- загроза для здоров'я людей і тварин: найдрібніший пил легко проникає в дихальні шляхи, спричиняючи запальні процеси, алергічні реакції, підвищення ризику онкологічних захворювань, а також проблеми з травленням.

Переробка такої техногенної сировини дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження, а й отримати корисні будівельні матеріали та наповнювачі [5]. Використання переробленої сировини доцільне у таких напрямках:

- дорожнє будівництво: як основа під асфальт або бетонне покриття.
- виробництво нового бетону: вторинні компоненти можуть частково замінювати природні наповнювачі в конструкційних бетонних виробках.
- виготовлення будівельних сумішей: для розчинів, штукатурок та кладок.

- виробництво будівельних виробів: тротуарна плитка, бордюри, газобетонні блоки, панелі для тимчасових споруд тощо.
- будівництво шумозахисних і протиударних бар'єрів: для транспортної інфраструктури та промислових зон.

Обробку техногенної будівельної сировини з доведенням розміру частинок до 5 мм здійснюють із застосуванням добре відомого та перевіреного дробильно-сортувального обладнання [6]. Серед нього



Рисунок 2 – Вертикальний класифікатор

використовуються щоківі, конусні, відцентрові, роторні дробарки, а також різноманітні типи грохотів — колосникові, інерційні, самобалансні та інші.

Найбільш складним етапом у процесі переробки такої сировини є відокремлення дрібних фракцій, розмір яких менший за 2–5 мм, та очищення їх від надмірної кількості пилових частинок [7].

Серед широкого спектра обладнання, призначеного для класифікації забруднених пилом матеріалів, застосовуються механічні, відцентрові, гравітаційні та інші гідравлічні системи класифікації.

У будівельній галузі найбільше поширення отримали гідравлічні або гідродинамічні класифікатори, які забезпечують промивку твердих частинок за допомогою струминних потоків води [4, 5]. Ці пристрої

вирізняються високою ефективністю розділення матеріалів, простотою конструкції, легкістю експлуатації, обслуговування та ремонту, а також низькими експлуатаційними витратами, що робить їх перспективними для широкого використання (рис. 2).

У цьому контексті важливо розглянути типи вертикальних гідравлічних класифікаторів, їх конструктивні особливості, функціональні переваги, недоліки та вплив геометричних параметрів на кінцеву ефективність процесу класифікації.

Залежно від особливостей гідродинаміки, подачі води та геометричних характеристик робочої камери, вертикальні гідравлічні класифікатори поділяють на кілька конструктивно-функціональних типів, кожен з яких має свої переваги, недоліки та сферу доцільного застосування. Основна класифікація базується на формуванні потоку всередині камери — прямолінійного або вихрового — а також на наявності або відсутності

систем управління потоком [4, 5]. Тип конструкції класифікатора безпосередньо впливає не лише на ефективність поділу фракцій, але й на надійність, енергоємність, стабільність процесу, чутливість до зміни властивостей сировини та потребу в обслуговуванні. Розглянемо основні типи вертикальних класифікаторів більш детально.

Прямострумні класифікатори є найпростішими за конструкцією. Вони складаються з вертикального циліндричного або конічного корпусу, в якому знизу вгору подається вода через центральні або периферійні форсунки. Потік води створює висхідну силу, що протидіє гравітації. Це дозволяє легшим частинкам підніматися і виводитися через верхню частину, тоді як важчі — осідають. Основною перевагою такого типу є конструктивна простота, низька вартість виробництва, енергоощадність та надійність. Однак у середовищі з великою кількістю пилу або тонкодисперсних домішок ефективність поділу знижується через відсутність активного завихрення, що ускладнює винесення легких частинок.

Вихрові або турбулентні класифікатори функціонують за принципом створення циклонічного або спіралеподібного потоку. Форсунки розташовуються під кутом до осі, завдяки чому вода обертається всередині робочої зони класифікатора, формуючи вихрове поле. Це підсилює гідродинамічний вплив на частинки, забезпечує більш точне розділення фракцій за густиною і краще видаляє пил. Така система дозволяє досягти високої селективності класифікації, особливо у разі складного гранулометричного складу сировини. Недоліком є складніша конструкція, підвищені вимоги до точності виготовлення та регулярне обслуговування для запобігання нерівномірному зносу внутрішніх елементів.

Класифікатори з регульованим потоком — це сучасний варіант, в якому реалізовано можливість зміни швидкості, напрямку або інтенсивності подачі води. Здебільшого це досягається шляхом використання електронно-керованих клапанів, змінних форсунок або частотного регулювання насосів. Такі системи мають високу продуктивність, дозволяють адаптуватися до різного типу сировини, забезпечують точний контроль над процесом класифікації [4, 8]. Але водночас вони є енергоємними, дорогими у виготовленні, вимагають високої кваліфікації персоналу та часто — інтеграції з системами автоматизації та моніторингу. Порівняльну характеристику вертикальних гідравлічних класифікаторів приведено в табл.1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика типів вертикальних гідравлічних класифікаторів за конструкцією, перевагами та недоліками

Тип конструкції	Переваги	Недоліки
Прямострумний	Простота конструкції, невелика вартість, надійність у роботі	Низька ефективність при великій кількості пилу, обмежена точність поділу

Вихровий (турбулентний)	Висока точність розділення, інтенсивне очищення від пилу	Складна конструкція, підвищені вимоги до обслуговування
З регульованим потоком	Гнучкість, можливість налаштування під конкретні умови, висока продуктивність	Висока енергоємність, складність управління, потреба в автоматизації

Аналіз конструктивних параметрів вертикальних гідравлічних класифікаторів свідчить про тісну залежність ефективності їх роботи від геометрії пристрою та динаміки водного потоку. Так, діаметр класифікаційної камери визначає кількість матеріалу, що може оброблятися одночасно. Зі збільшенням діаметра підвищується продуктивність, але зростають вимоги до потужності насосного обладнання. Висота робочої зони впливає на тривалість дії висхідного потоку на частинки — чим вища камера, тим більше часу мають частинки для гідродинамічного сортування, що підвищує селективність. Особливо важливими є кількість, розташування і форма форсунок, які мають забезпечити рівномірний розподіл потоку, уникнення застійних зон і стабільну турбулентність. Не менш значущим є режим подачі води, зокрема швидкість потоку. Оптимальним вважається діапазон 0,6–1,2 м/с, який забезпечує баланс між винесенням легких частинок та осіданням важчих [4, 8].

Моделювання потоків та результати практичних випробувань класифікаторів показують, що правильно спроектована система з адаптивним регулюванням параметрів здатна досягати ефективності очищення понад 85–90 %, що істотно перевищує традиційні методи сухого сортування. Особливо успішними виявилися вихрові вертикальні класифікатори з автоматичним контролем кута подачі води, які дозволяють точно розділяти фракції навіть за складного і нестабільного гранулометричного складу. З огляду на це, впровадження вертикальних гідравлічних класифікаторів до систем переробки техногенних будівельних відходів є не лише ефективним, а й економічно обґрунтованим кроком.

### ***Висновки та перспективи подальших досліджень:***

Вертикальні гідравлічні класифікатори демонструють високий потенціал як ефективна технологія для очищення та переробки дрібнодисперсної будівельної сировини, що утворюється внаслідок масових руйнувань інфраструктури, а найрезультативнішими серед них є вихрові моделі з можливістю регулювання гідродинамічних параметрів потоку. Саме конструктивні характеристики класифікаторів — такі як діаметр камери, висота робочої зони, швидкість потоку та геометрія форсунок — визначають якість поділу фракцій та адаптацію системи до різних видів відходів. Перспективи подальших наукових досліджень полягають у розробці числових моделей руху потоку всередині класифікаторів, вдосконаленні автоматизованих систем управління процесом класифікації, а також створенні мобільних модулів для оперативного використання безпосередньо на місцях руйнувань, що дозволить максимально ефективно

інтегрувати такі установки в загальну систему екологічно безпечного відновлення України.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Підняти з руїн: що робити із залишками розбомблених будинків і чому будівельне сміття не можна просто «поховати» на звалищі / *бізнес-портал MIND*. – 07.06. 2022, [Електронний ресурс]. [https://mind.ua/publications/20242694-pidnyati-z-ruyin-shcho-robiti-iz-zalishkami-rozbomblenih-budinkiv?fbclid=IwAR1R1w6bUd4jxLItMexU\\_Far054BqYRN9NV4UHwXBJWLPwLe2nbUs1Ux64s](https://mind.ua/publications/20242694-pidnyati-z-ruyin-shcho-robiti-iz-zalishkami-rozbomblenih-budinkiv?fbclid=IwAR1R1w6bUd4jxLItMexU_Far054BqYRN9NV4UHwXBJWLPwLe2nbUs1Ux64s)
2. Каратєєва О. І., Коваль О. А., Гроза В. І. Технологія переробки побутових відходів та відходів сільського господарства : курс лекцій для здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» / О. І. Каратєєва. – Миколаїв : МНАУ, 2018. – 190 с. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4379/1/Tekhnolohiia%20pererobky%20pobutovykh%20vidkhodiv.pdf>
3. Перероблення будівельних відходів: виклики та можливості для України [Електронний ресурс] // *Укрінформ*. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3826490-pereroblenna-budivelnih-vidhodiv-vikliki-ta-mozlivosti-dla-ukraini.html>
4. «Основи технології силікатних матеріалів. Загальні відомості виробництва кераміки, скла та ситалів» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: І.С. Суббота, Л.М. Спасьонова, Т.І Булка – Електронні текстові дані (1 файл: 2,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 103 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/73acf491-3b9e-4845-a705-e22709529208/content>
5. М. С. Лемешев, К. К. Сівак, М. Ю. Стаднійчук, і Р. В. Сівак, «Сучасні підходи комплексної переробки промислових техногенних відходів», *СучТехнБудів*, вип. 31, вип. 2, с. 37–44, Чер 2022. <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/739>
6. Bondarenko, A. O., Jamil Haddad, O. O. Tytov, Fadi Alfaqs (2021). Complex for Processing of Rubble Wastes of Stone Dressing, *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, Vol. 15, N. 1, 44-50. <https://doi.org/10.15866/ireme.v15i1.20205>.
7. [Andrii Bondarenko, Viktor Kukhar and Assel Nurmanova \(2024\). Innovative technology and equipment for stone processing sludge recycling. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348, 012037. DOI 10.1088/1755-1315/1348/1/012037.](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012037)
8. Шевченко В.В., Тимчик Г.С. Основни автоматизація технологічних процесів : Навчальний посібник за спеціальностями 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / В.В. Шевченко, Г.С. Тимчик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 111 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/97358d2f-ecf9-44a1-a78f-6510ffef424c/content>

**Шуліка М.С.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна), **Кузьменко П.А.** (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна)

## ТЕОРІЯ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МЕХАНООБРОБКИ – РЕСУРСИ І МОЖЛИВОСТІ

**Анотація.** Теорія подібності є важливим інструментом аналізу та оптимізації технологічних систем механообробки. Вона дозволяє узагальнювати експериментальні дані та створювати безрозмірні моделі, що забезпечують прогнозування ефективності процесів обробки. У роботі розглянуто основні подібнісні критерії, такі як число Рейнольдса, число Фруда та критерій енергетичної ефективності, що використовуються для опису механообробних процесів. Впровадження цих критеріїв у виробничі системи дозволяє підвищити продуктивність, зменшити енергетичні витрати та покращити якість оброблених поверхонь. Запропоновано методологію адаптації подібнісних моделей до мехатронних систем механообробки. Проведені дослідження підтверджують ефективність застосування подібнісного аналізу для оптимізації режимів різання, прогнозування зношування інструменту та цифрового моделювання механообробних процесів.

**Ключові слова:** Теорія подібності, механообробка, безрозмірні критерії, мехатронні системи, оптимізація, цифрове моделювання, прогнозування зносу інструменту.

**Abstract.** The theory of similarity is an important tool for analyzing and optimizing technological systems of machining. It allows for the generalization of experimental data and the development of dimensionless models that enable the prediction of processing efficiency. This paper examines key similarity criteria such as the Reynolds number, the Froude number, and the energy efficiency criterion, which are used to describe machining processes. The implementation of these criteria in production systems enhances productivity, reduces energy consumption, and improves the quality of machined surfaces. A methodology for adapting similarity models to mechatronic machining systems is proposed. The conducted research confirms the effectiveness of similarity analysis for optimizing cutting regimes, predicting tool wear, and digitally modeling machining processes.

**Keywords:** Similarity theory, machining, dimensionless criteria, Reynolds number, Froude number, energy efficiency, mechatronic systems, optimization, digital modeling, tool wear prediction.

Механообробка є невід’ємною частиною виробничих процесів машинобудування, забезпечуючи формування точних геометричних характеристик деталей із заданими механічними та експлуатаційними властивостями. Технологічні системи механообробки включають широкий спектр процесів, таких як токарна, фрезерна, шліфувальна, свердлильна та електрофізичні методи обробки. Вони характеризуються складною взаємодією між ріжучими інструментами, заготовками та допоміжними технологічними факторами, включаючи мастильно-охолоджувальні рідини, режимні параметри та конструкційні особливості обладнання.

Сучасні технологічні системи механообробки стикаються з викликами підвищення точності та зниження шорсткості поверхонь, забезпечення енергоефективності процесів різання, шліфування і свердління, а також проблемами швидкого зношення ріжучих інструментів через високі навантаження і температурні ефекти. Одночасно виробництво вимагає інтеграції цифрових двійників і інтелектуальних систем у межах концепції Індустрії 4.0 для моніторингу та оптимізації стану технологічних процесів.

Теорія подібності є потужним методологічним підходом для аналізу фізичних і технологічних процесів, оскільки дозволяє упорядковувати емпіричні дані у вигляді безрозмірних критеріїв, визначати масштабні співвідношення, прогнозувати ефективність процесів і знаходити оптимальні режими обробки. У технологічних системах механообробки застосування подібнісних критеріїв, таких як число Прандтля, число Фруда та критерій енергетичної ефективності, забезпечує глибоке розуміння взаємозв'язків між різальними силами, температурами та динамікою утворення стружки. Таким чином, застосування теорії подібності в механообробці є перспективним напрямком, що забезпечує науково обґрунтоване моделювання та оптимізацію технологічних процесів. Подальший розвиток цього підходу дозволить підвищити ефективність механообробки шляхом адаптації математичних моделей до реальних умов виробництва.

Теорія подібності знайшла широке застосування у фізиці, механіці та інженерних науках для аналізу масштабних ефектів, оптимізації процесів та побудови безрозмірних критеріїв оцінки різних явищ. У контексті механообробки вона забезпечує фундаментальний підхід до математичного моделювання технологічних процесів, що значно знижує необхідність у великомасштабних експериментах.

Роботи вчених [Помилка! Джерело посилання не знайдено.,Помилка! Джерело посилання не знайдено.,Помилка! Джерело посилання не знайдено.] демонструють, що застосування безрозмірних чисел, таких як критерій Тейлора, дозволяє оцінювати взаємозв'язки між швидкістю різання, подачею та температурним режимом у зоні різання. Дослідження показують, що існують подібнісні співвідношення між геометричними параметрами стружки та механічними характеристиками оброблюваного матеріалу. Зокрема, аналіз наукової літератури підтверджує високу ефективність застосування теорії подібності для механообробки. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку нових узагальнених подібнісних критеріїв, що враховують специфічні особливості сучасних високоавтоматизованих технологічних систем.

Незважаючи на значний прогрес у застосуванні теорії подібності, існують нерозв'язані питання щодо її адаптації до складних технологічних систем механообробки. Основними проблемами, що потребують подальшого дослідження, є нелінійність процесів різання та змінність фізико-механічних властивостей матеріалів. Процеси механообробки мають динамічний і нелінійний характер через змінну жорсткість матеріалу в зоні



різання, неоднорідний розподіл напружень та флуктуації силових характеристик унаслідок зношування інструменту. Існуючі подібнісні критерії переважно ґрунтуються на лінійних моделях, що не враховують зміну параметрів у реальному часі, тому виникає потреба у створенні адаптивних критеріїв з урахуванням нелінійності процесу.

Додаткову складність створює змінність властивостей оброблюваного матеріалу під дією температурних градієнтів, фазових перетворень, деформаційного зміцнення та мікроструктурних неоднорідностей. Ці чинники призводять до коливань сил різання, зміни швидкості зношування інструменту та впливають на стабільність процесу формування стружки і якість обробленої поверхні. Тому, теорія подібності має бути розширена, щоб враховувати зміну фізико-механічних властивостей матеріалів та їхній вплив на режими різання та процеси формування стружки.

Вібраційні ефекти істотно впливають на стабільність механообробних процесів. Самозбуджувані коливання в системі «інструмент-заготовка-верстат» можуть знижувати точність обробки, тоді як резонансні явища призводять до інтенсивного зносу інструменту. Особливо критичним є вплив вібрацій у режимах високошвидкісного різання через значне збільшення динамічних навантажень. Оскільки існуючі критерії подібності не враховують вібрацій у повному обсязі, постає необхідність розробки нових безрозмірних параметрів для адекватного прогнозування поведінки технологічних процесів.

Теплові ефекти також мають визначальний вплив на механообробку. Підвищення температури змінює механічні властивості матеріалу в зоні різання, сприяючи формуванню стружки через пластичне деформування. Високі температури прискорюють зношування інструменту через дифузійні та окислювальні процеси, а термічні напруження в оброблюваній поверхні можуть спричинити появу мікротріщин і залишкових деформацій, погіршуючи якість виробу.

Головною метою даної статті є розробка комплексного підходу до використання теорії подібності у технологічних системах механообробки для оптимізації параметрів процесу, підвищення його ефективності та зниження енергетичних витрат. Зокрема, досліджується можливість узагальнення механообробних процесів за допомогою безрозмірних критеріїв, що дозволить формалізувати їх математичний опис та здійснити масштабування експериментальних і промислових умов. В свою чергу, теорія подібності відкриває широкі можливості для оптимізації процесів механообробки. Вона дозволяє знижувати енергетичні витрати за рахунок раціонального вибору режимів різання, підвищувати продуктивність завдяки оптимізації силових взаємодій у зоні різання, а також прогнозувати знос ріжучого інструменту на основі спеціальних подібнісних критеріїв. Крім того, вона сприяє вдосконаленню якості обробленої поверхні через контроль динамічних навантажень та забезпечує можливість масштабування результатів лабораторних досліджень до промислових умов.

Для реалізації цих можливостей необхідно визначити ключові безрозмірні комплекси, що описують основні фізичні процеси

механообробки, такі як теплопередача, течія охолоджуючих рідин, утворення стружки, силове навантаження та зношування інструменту. Використання критеріїв подібності, зокрема чисел Прандтля, Рейнольдса, Фруда, а також спеціалізованих критеріїв силового навантаження і зношування, дозволяє створити універсальну методологію оптимізації різних видів обробки – токарної, фрезерної, шліфувальної, свердлильної та комбінованої. Застосування подібного підходу також відкриває перспективи для прогнозування якості обробки, оцінки шорсткості поверхні через залежності параметра  $Ra$  від безрозмірних чисел, аналізу впливу тертя і теплових ефектів у зоні різання, а також вивчення температурних полів і пов'язаних з ними мікроструктурних змін у матеріалі.

На основі визначених критеріїв подібності можливо сформувати систему рівнянь для моделювання динамічних, силових та теплових процесів механообробки шляхом побудови диференціальних рівнянь руху стружки, енергетичних моделей ефективності різання та узагальнених залежностей між параметрами обробки, що дозволить створити узагальнену математичну модель процесу, оптимізувати режими різання за безрозмірними критеріями, підвищити ефективність і довговічність інструменту та розробити систему цифрового моніторингу для контролю процесу в реальному часі. Тому, застосування теорії подібності у механообробці дозволяє сформувати науково-обґрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності механообробних процесів та їх адаптації до вимог сучасного виробництва.

## ВИСНОВКИ

Використання теорії подібності для оптимізації механообробки дає змогу суттєво підвищити якість і продуктивність технологічних процесів шляхом зменшення енергоспоживання, збільшення довговічності ріжучого інструменту та поліпшення якості оброблюваних поверхонь за рахунок аналізу критеріальних чисел ( $Re$ ,  $Fr$  та енергетичних критеріїв). Практична реалізація цього підходу передбачає визначення відповідних критеріїв для конкретного процесу, їх аналіз, експериментальну перевірку оптимальних режимів та коригування технологічних параметрів, що в підсумку забезпечує підвищення ефективності виробництва і відповідність сучасним

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1.Новіков Ф. В. *Теплові та механічні процеси металообробних технологій [Електронний ресурс] : монографія. – Дніпро : ЛІРА. – 2022. – 412 с.*

Шаповалов М. В., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. *Вплив результатів виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів, зміцнених ОІМП, на підвищення ефективності технологічного процесу різання // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. № 4(6). С. 84–92. DOI: 10.30837/2522-9818.2018.6.084.*

3.Пчелінцев, В.О. *Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів [Текст]: навч. посіб. / В.О. Пчелінцев, А.І. Дегула. - Суми: СумДУ, 2012. - 247 с. + Гриф МОН.*

УДК: 621.9.048.5:004.8

**Бадюкова М.** (ЗЗСО № 6, м. Слов'янськ, Україна), науковий керівник: к.т.н., доц. **Кінденко М.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна), науковий співкерівник: **Бобрик О.С.** (ЗЗСО № 6, м. Слов'янськ, Україна)

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ОБРОБКИ ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ІЗ ШВИДКОРІЗУЧОЇ СТАЛІ В ІМПУЛЬСНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

**Анотація:** У роботі досліджено використання методів штучного інтелекту для управління режимами магнітно-імпульсної обробки осьового інструменту із швидкорізальної сталі. Визначено фізичні основи процесу магнітної обробки, особливості зміни дислокаційної структури сталі після обробки, класифіковано методи магнітної обробки та охарактеризовано технологічне устаткування. Розроблено концепцію інтелектуальної системи управління режимами магнітно-імпульсної обробки на основі генетичних алгоритмів і нейромережевих моделей з нечіткою логікою. Проведений аналіз доводить, що запропонована система дозволяє оптимізувати режими обробки, підвищити стійкість інструменту та скоротити витрати енергії. Отримані результати мають практичне значення для підвищення якості та надійності машинобудівних виробів.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, швидкорізальна сталь, осьовий інструмент, штучний інтелект, генетичні алгоритми, нечітка логіка, нейронні мережі, оптимізація режимів.

**Abstract:** The study investigates the use of artificial intelligence methods for controlling the processing modes of axial tools made from high-speed steel under magnetic pulse treatment. The physical fundamentals of magnetic processing, the changes in the dislocation structure of steel after treatment, the classification of magnetic processing methods, and the technological equipment used are outlined. An intelligent control system for magnetic pulse treatment modes based on genetic algorithms and fuzzy logic neural networks is developed. The conducted analysis proves that the proposed system allows for the optimization of processing modes, increases tool durability, and reduces energy consumption. The obtained results are practically significant for enhancing the quality and reliability of manufacturing products.

**Keywords:** magnetic pulse treatment, high-speed steel, axial tool, artificial intelligence, genetic algorithms, fuzzy logic, neural networks, mode optimization.

Проблема зносостійкості і довговічності металообробного інструменту придбала в машинобудуванні надзвичайно велике значення. Актуальність її зростає в сучасних умовах ринкової економіки, коли в машинобудуванні особливу роль має відігравати якість інструментів, в першу чергу ріжучих, що визначають багато в чому продуктивність верстатів і собівартість обробки в цілому.

Поліпшення якості інструментів принципово можна досягти легуванням матеріалу, а також застосуванням усіх відомих механізмів об'ємного зміцнення при термічній обробці. Дорогі методи об'ємного зміцнення не можуть бути виправдані ще і з тих позицій, що причини відмов інструментів найчастіше пов'язані не з їх поломкою, а з втратою ними своєї первісної поверхневої конфігурації внаслідок зносу, відколів, зминання, розтріскування, тобто в зв'язку з руйнуванням або деформацією тонких поверхневих шарів металу.

Саме цими обставинами пояснюється інтенсивний розвиток останнім часом чисельних методів і розробок в області поверхневого зміцнення інструментів.

Одним з основних напрямків фізичної технології є магнітна обробка матеріалів. Особливе місце в магнітній обробці відводиться способам поліпшення фізико-механічних властивостей швидкорізальних сталей. Поля локальних перенапруг в таких сталях з'являються в результаті магніострикції. У цих умовах частки карбідної фази виявляються концентраторами напружень, які зменшуються за рахунок додаткових джерел дислокацій.

В цілому результат магнітної обробки розглядається як прояв ефектів післядії в матеріалах, що знаходяться на межах стабільності їх властивостей і піддаються впливу зовнішнього силового поля.

Магнітне зміцнення на основі методу магнітно-імпульсної обробки (МІО) має низку переваг, зокрема: низька собівартість оброблення, збереження геометрії оброблених деталей, відсутність витратних матеріалів, простота технологічного оснащення та екологічна чистота.

Водночас слід зазначити, що ключовим моментом забезпечення ефективності МІО є правильний вибір режимів обробки. Вибір режимів є складним технічним завданням, що потребує індивідуального підходу до вирішення для кожної конкретної галузі застосування. Успішне розв'язання задачі вибору режимів МІО може бути досягнуто шляхом створення інтелектуальних систем керування цим процесом.

Об'єкт дослідження: осьовий інструмент - свердла та мітчики із швидкорізальних сталей, методи та засоби штучного інтелекту, інтелектуальні системи керування.

Мета роботи: збільшення стійкості інструменту шляхом створення інтелектуальної системи управління магнітно-імпульсної обробки для розв'язання задачі оптимального керування режимами МІО.

Методи дослідження: математичне й фізичне моделювання, статистичний аналіз. Використовувалися стандартні вимірювальні прилади та прилади для оцінки ефективності зміцнення поверхневих шарів.

Відповідно до мети у науковій роботі поставлені й вирішені наступні завдання:

1. Проаналізувати фізичну сутність процесу магнітної обробки.
2. Показати технологічне устаткування магнітно-імпульсної обробки.
3. Розглянути методи адаптивного управління.
4. Проаналізувати сучасні інтелектуальні технології в системах управління.
5. Застосувати методів штучного інтелекту для управління магнітно-імпульсною обробкою за допомогою інтелектуальної системи управління.

У різних сферах практичної діяльності, пов'язаних з вирішенням завдань управління та контролю, оптимізації та моделювання, пошуку та вибору, розпізнавання та класифікації, гостро постала необхідність інтелектуальної підтримки для подолання труднощів в складних ситуаціях і при обмежених ресурсах.

Сьогодні використання сучасних інтелектуальних технологій, таких як нейронні мережі, глибоке навчання та штучний інтелект, є передумовою проактивного розвитку всіх сфер діяльності людини.

Методи та засоби штучного інтелекту доходять до споживача у вигляді інтелектуальних технологій, які практично інваріантні до тієї чи іншої проблемної області. Традиційно до ІТ відносять нечітку логіку (НЛ), генетичні алгоритми (ГА) і нейронні мережі (НМ). ІТ успішно використовуються для створенні складних систем управління. Вимоги до пристроїв управління – забезпечувати надійне управління об'єктом в різних режимах його роботи [1].

До експертних систем (ЕС) відносять системи, що базуються на знаннях, тобто системи, обчислювальна можливість яких є наслідком їх нарощуваної бази знань. Базовими компонентами будь-якої ЕС є: вирішувач (інтерпретатор), робоча пам'ять, яка може мати назву база даних, база знань, елементи набуття знань, діалоговий і пояснювальний блоки.

Розглянемо систему нечіткого виводу. Головне місце в нечіткій логіці та відповідних системах керування посідає нечіткий висновок. Процес нечіткого виведення являє собою послідовність здобуття нечітких висновків з урахуванням нечітких умов або передумов за допомогою використання понять і принципів нечіткої логіки. Цей процес об'єднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації та нечіткі композиції. Системи нечіткого виводу використовуються для реалізації процесу нечіткого виведення і служать світоглядним базисом усієї існуючої нечіткої логіки. Досягнуті успіхи в застосуванні цих систем для вирішення значного класу задач керування стали основою становлення нечіткої логіки. Системи нечіткого виводу дозволяють вирішувати задачі автоматичного управління, групування даних, розрізнення образів, прийняття рішень, роботизованого навчання та багато інших.

Нейронна мережа – це розподілений паралельний процес, що складається з елементарних одиниць обробки інформації, що накопичують експериментальні знання та надають їх для подальшої обробки. Нейронна мережа отримує інформацію з навколишнього середовища і використовує її в процесі навчання [1,2].

Розвиток технологій та створення високо продуктивних мікропроцесорів з великим об'ємом пам'яті, можливість організації мульти мереж для реалізації паралельних обчислень, з одного боку, та потреба обробки великих масивів інформації, використання баз знань для генерації направленої діяльності – з іншого, призвели до створення інтелектуальних систем. Під інтелектуальною системою розуміють об'єднану інформаційним процесом структуру технічних засобів і програмного забезпечення, котрі працюють у взаємозв'язку з оператором або незалежно від нього; здатну на основі відомостей і знань при наявності мотивації синтезувати, генерувати рішення про дію та знаходити ефективні шляхи вирішення завдань. Інтелектуальні системи [3,1] здатні генерувати мету, приймати рішення до дії, забезпечувати дію для досягнення мети, прогнозувати значення параметрів результату дії і зіставляти їх з реальними, утворюючи зворотний зв'язок, коригувати мету або управління. Відмінною особливістю інтелектуальних систем керування є їх класифікаційне віднесення до класу динамічних систем, які працюють в режимі реального часу і мають в своєму складі підсистеми взаємодії з зовнішнім світом (датчики, виконавчі пристрої).

Доцільність застосування генетичних алгоритмів під час оптимізації режимів МІО обґрунтовано тим, що на практиці складно зафіксувати властивості функціональної залежності вихідних параметрів режимів МІО від вхідних величин, ще складніше зробити аналітичний опис такої залежності. Генетичний метод утворює клас алгоритмів пошукової оптимізації, заснованих на математичному моделюванні біологічних механізмів і процесів у живій природі за допомогою принципів популяційної генетики, що дають змогу знаходити оптимальні або близькі до них (субоптимальні) рішення [4].

Доцільність застосування нечіткої нейромережі в системі управління МІО зумовлена необхідністю класифікації даних, що використовуються під час обробки [4,5]. Ефективно вирішити задачу моделювання та прогнозування результатів МІО. Використовувати апріорну інформацію, здобувати нові знання і бути для користувача логічно прозорими. Значну роль при управлінні процесом МІО має технологія об'єктивізації процесу прийняття рішень. Інформаційна невизначеність і непередбачувані умови зумовлюють раціональність застосування методів теорії нейро-нечітких систем для управління складним процесом МІО. На рис.1 представлено узагальнену структурну схему управління МІО, що містить у собі: блок оптимізації параметрів МІО; блок навчання і прогнозування результатів МІО.

Перед початком обробки вводяться параметри оброблюваної деталі - матеріал заготовки і геометричні параметри деталі. Після отримання цих даних комп'ютер визначає потрібну комбінацію параметрів оброблюваної деталі з бази даних (БД). Якщо така інформація знайдена, з бази даних витягають діапазони параметрів режимів оброблення (напруженість магнітного поля  $H$ , числом імпульсів у серії  $n$ , часом імпульсу в серії  $\tau$ , інтервалом між імпульсом у серії  $t$ , числом серій імпульсів  $\Theta$ ). Якщо інформація не знайдена, проводиться пошук деталі з максимально близькими параметрами.

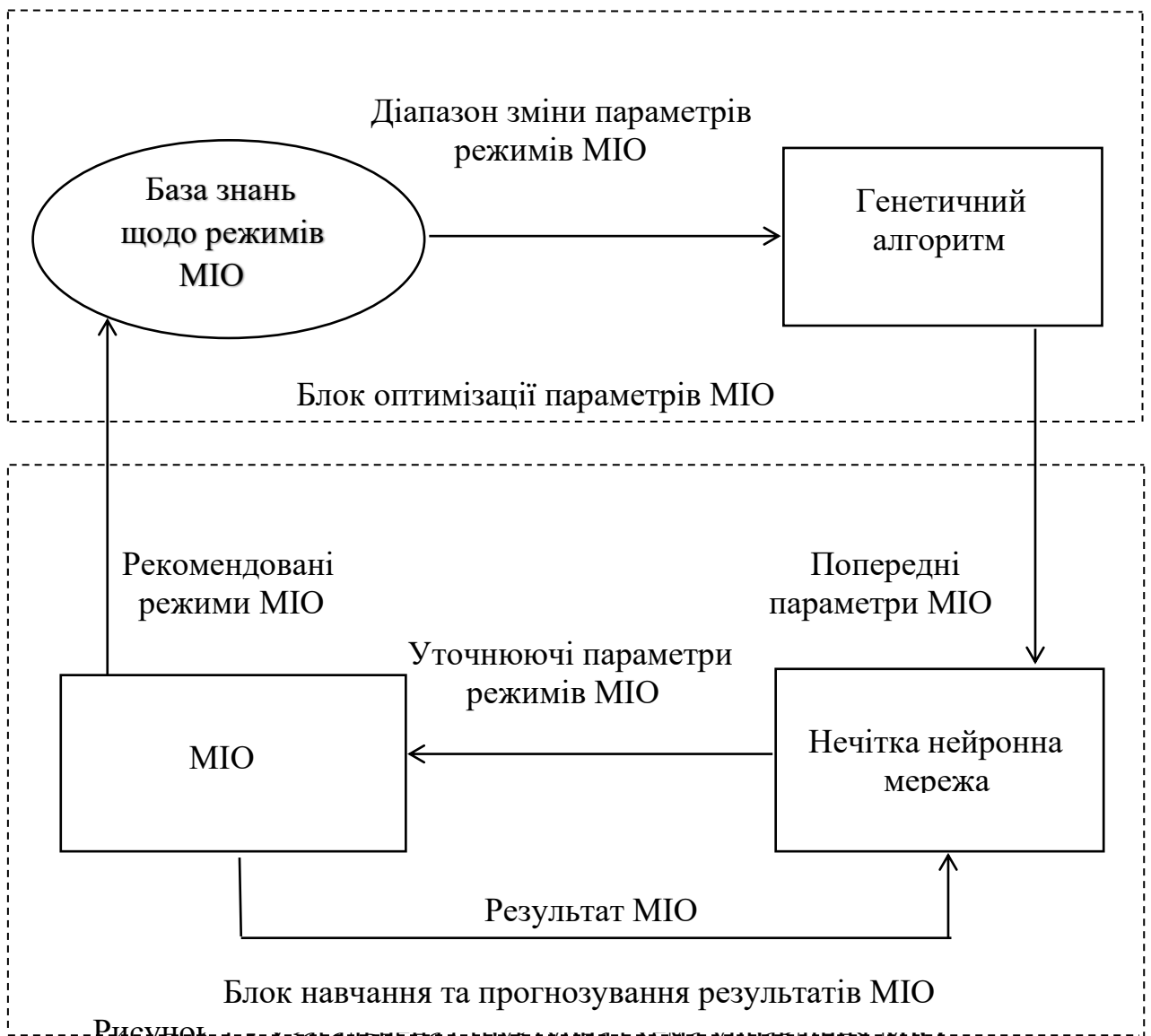


Рисунок 1 - загальна структурна схема управління МІО

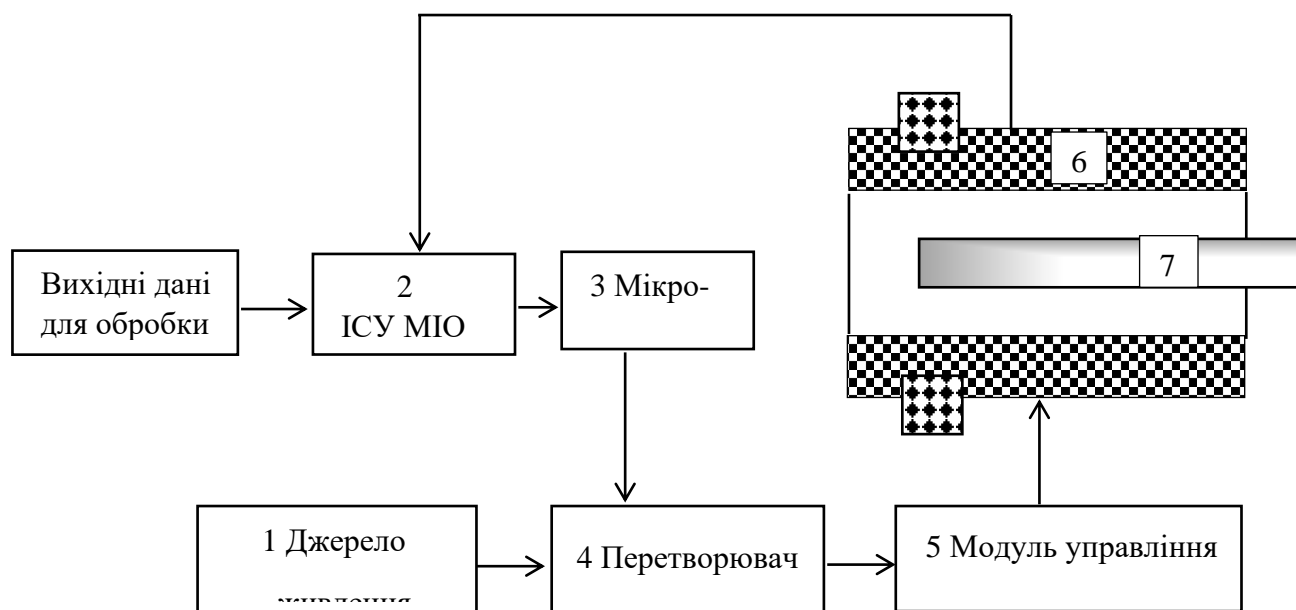
Після того, як визначено діапазон параметрів режимів обробки, він оптимізується за допомогою генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм оперує сукупністю параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ ), за яких після МІО деталей певного матеріалу і геометрії, отримують задану твердість поверхні.

Після того, як визначено параметри режимів обробки, вони подаються через нечітку нейронну мережу. Параметри режимів МІО проходять чотири блоки системи нечіткого логічного виведення:

- блок фазифікації, що перетворює чисельні параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ );
- база даних, що містить набір нечітких правил щодо зміни режимів оброблення;
- блок ухвалення рішень, що здійснює операції виведення на підставі наявних правил;
- блок дефазифікації, що перетворює результати виведення в чисельні значення параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ ).

Уточнені параметри подаються на модуль керування соленоїдом, після чого здійснюється процес МІО. Після обробки проводиться оцінка продуктивності, і якщо отриманий результат не задовольняє заявленому, результати обробки відправляються на навчання нечіткої нейромережі. Під час навчання нечіткої нейронної мережі відбувається зміна параметрів режимів обробки, і змінені режими подаються на МІО. Цикл повторюється, до отримання необхідних результатів, після чого режими обробки записуються в базу даних і базу даних нечіткої нейромережі.

Установка з інтелектуальною системою управління (рис.2) функціонує наступним чином: у робочу порожнину соленоїда (6) розміщують деталь (7), що підлягає МІО. Оператор вводить дані про оброблювану деталь у базу даних інтелектуальної системи управління МІО (2). Отримана інформація обробляється системою управління (2), яка за отриманими даними задає параметри режимів обробки. Після цього сигнал подається на мікроконтролер (3), через перетворювач (4) і модуль управління (5). У соленоїді виникає магнітний потік, який концентрується на виробі.





## Рисунок 2 - Функціональна схема установки з інтелектуальною системою управління МІО

Розроблена система має такі можливості:

1. Вибір параметрів режимів МІО під конкретний виріб з використанням інформації щодо початкових режимів оброблення, що містяться в базі даних системи.

2. Уточнення оптимальних режимів МІО з використанням нечіткої нейронної мережі.

3. Збереження результатів обробки конкретних виробів у базі даних і реалізація механізму самонавчання.

Програмну реалізацію алгоритму функціонування ІСУ МІО можна здійснити за допомогою інструментальних засобів пакета прикладних програм MATLAB 7 - Genetic Algorithm Tool (пакет генетичні алгоритми) і Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечіткої логіки).

### Висновки

1. Застосування інтелектуальної системи управління МІО дасть змогу змінювати параметри режимів обробки залежно від матеріалу і геометрії оброблюваного виробу. Це дасть змогу швидко переналаштовуватися на обробку виробів різних типів і матеріалів.

2. Застосування нечітких нейронних мереж в управлінні дасть змогу точно оптимізувати параметри режимів МІО для конкретного типу інструменту або виробу.

3. Застосування запропонованого підходу до управління МІО дасть змогу скоротити час на обробку виробів, підвищити якість МІО і скоротити витрату електроенергії, що витрачається на процес МІО.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Субботін С.О. *Нейронні мережі. Навчальний посібник* /С.О. Субботін - Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. 132 с.

2. *Інтелектуальні системи автоматизації : монографія* / Аврунін О. Г., Владов С. І., Петченко М. В., Семенець В. В., Татарінов В. В., Тельнова Г. В., Філатов В. О., Шмельов Ю. М., Шушляпіна Н. О. – Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2021. – 322 с.

3. Корабльов М.М. *Адаптація моделей нечіткого виводу з використанням штучних імунних систем* / М.М. Корабльов, І.В. Овчаренко 2007. С. 73–76. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/dec/7246/15.pdf>

4. Нестеренко О.В., Савенков О.І., Фаловський О.О. *Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: навч. посібн. / за ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління. 2016. 188 с.*

5. Перепелиця О.О. *Проектування інтелектуальної системи на основі нечітких знань. 2019. URL: [http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/5972/1/Perepelija\\_Projektuvannja\\_intelektualnoj\\_system.pdf](http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/5972/1/Perepelija_Projektuvannja_intelektualnoj_system.pdf)*

**Бороденко П.М., Миронова А.О., Сойнікова С.Д., Черемісова Т.В. (ЗОШ №26, м. Краматорськ, Україна) науковий керівник: Бабаш А.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна)**

## **ВИКОРИСТАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ TEACHABLE MACHINE ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ПОДАЛЬШИМ ВИКОРИСТАННЯМ У МОБІЛЬНИХ ДОДАТКАХ**

***Анотація.** Наведено опис можливостей сервісу Teachable Machine для створення моделей машинного навчання, які дозволяють розпізнавати об'єкти на фото або на зображенні з камери мобільного пристрою. Показано приклад розпізнавання жестів (палець вгору та вниз) та усмішки на зображенні з веб, або камери мобільного пристрою. Наведено особливості створення датасету для класифікації жестів та посмішки. Наведено послідовність дій для експорту отриманої моделі машинного навчання у формат TensorFlow Lite для її подальшого використання у мобільному додатку. Описано процедуру інтеграції можливостей CameraX у проект за допомогою gradle. Наведено процедуру інтеграції моделі машинного навчання для розпізнавання об'єктів з зображень у проект мобільного додатку. Показано результати роботи моделі машинного навчання у проекті мобільного (Android) додатку.*

***Ключові слова:** Teachable Machine, клас CameraX, Gradle, модель машинного навчання, мобільний додаток, дозволи, TensorFlow Lite*

***Abstract.** A description of the capabilities of the Teachable Machine service for creating machine learning models that allow you to recognise objects in a photo or image from a mobile device's camera is provided. An example of gesture recognition (finger up and down) and smile recognition in an image from the web or a mobile device camera is shown. The features of creating a dataset for the classification of gestures and smiles are given. The sequence of actions for exporting the resulting machine learning model to the TensorFlow Lite format for its further use in the mobile application is given. The procedure for integrating CameraX capabilities into a project using gradle is described. The procedure for integrating a machine learning model for recognising objects from images into a mobile application project is presented. The results of the machine learning model in the mobile (Android) application project are shown.*

***Keywords:** Teachable Machine, CameraX Classroom, Gradle, Machine Learning Model, Mobile App, Permissions, TensorFlow Lite*

### **ВСТУП**

Використання засобів штучного інтелекту дозволяє вирішити багато різних задач. Наприклад, можна розпізнавати об'єкти зі статичних фотографій або відео потоку. Можна розпізнавати настрій людини та її жести та міміку.

Також за допомогою нейромереж можна перетворювати чорно-біле зображення у кольорове. Сучасні охоронні системи використовують штучний інтелект для розпізнавання обличчя.

У сучасних смартфонах засоби штучного інтелекту використовуються для покращення якості зображень, отриманих з фотокамер (зменшення шуму та ін.).

Для розпізнавання об'єктів, жестів та міміки людини використовуються моделі машинного навчання.

Таку модель можна створити з використанням сервісу Teachable Machine [1]. Далі отримана модель машинного навчання може бути перетворена у формат TensorFlow Lite [2]. Така модель легко інтегрується в проєкт Android додатку.

**Мета роботи** – аналіз, дослідження та використання засобів штучного інтелекту у Android додатках для визначення жестів та міміки людини, захоплених камерою мобільного пристрою.

Задачі дослідження:

- вивчення можливостей сервісу Teachable Machine для створення моделей машинного навчання для розпізнавання об'єктів, жестів та міміки людини та ін;

- вивчення можливостей CameraX для захоплення зображень з камери мобільного пристрою;

- підключення та використання отриманої від Teachable Machine моделі машинного навчання для розпізнавання жестів та міміки людини з зображень, захоплених камерою мобільного пристрою;

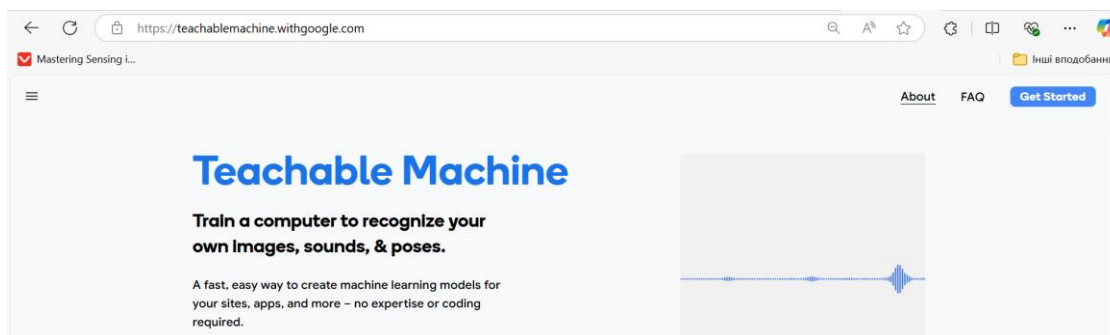
- розробка Android додатку для демонстрації роботи моделі машинного навчання для розпізнавання жестів та міміки людини.

**Об'єкт дослідження** – модель машинного навчання TensorFlow Lite, яка отримана з використанням сервісу Teachable Machine.

**Предмет дослідження** – аналіз, дослідження та використання моделі у проєкті Android додатку для розпізнавання жестів та міміки з зображень, захоплених камерою мобільного пристрою.

## 1. ОПИС МОЖЛИВОСТЕЙ СЕРВІСУ TEACHABLE MACHINE ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З РОЗПІЗНАВАННЯ ЖЕСТІВ ТА МІМІКИ ЛЮДИНИ

Для створення моделі машинного навчання потрібно скористатися сервісом Teachable Machine за посиланням <https://teachablemachine.withgoogle.com/> (рис. 1).



Рисунк1 – Сервіс для створення моделей машинного навчання Teachable Machine

Далі необхідно обрати “Get Started” для початку роботи з сервісом (рис. 2)

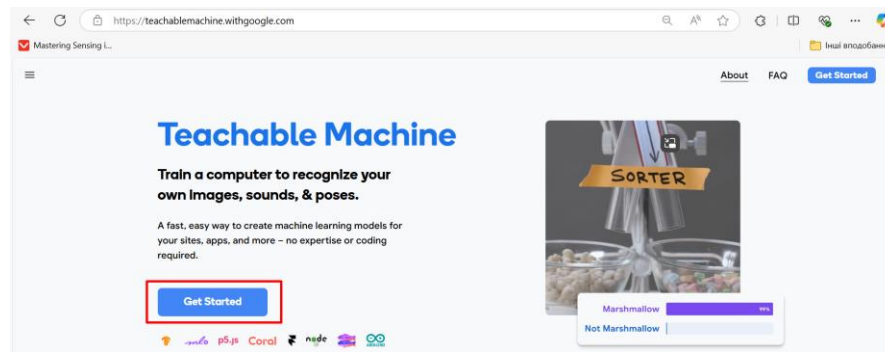


Рисунок2 – Початок роботи з Teachable Machine

Для задач розпізнавання жестів та міміки людини або об’єктів та їх станів треба обрати “Image Project”. Далі треба обрати “Standard image model” (рис. 3)

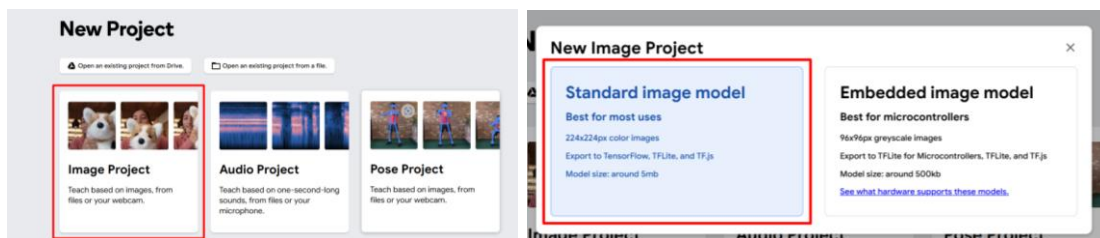


Рисунок 3 – Проект для роботи з зображеннями з файлів або веб камери та створення стандартної моделі

Teachable Machine від Google у своїй основі має недовчену неймережу. Користувач може її довчити для своїх задач. Для подальшого навчання в якості вхідних даних (датасету) можна передавати зображення у вигляді файлів зображень, або захоплювати зображення з веб камери. Для задач розпізнавання жестів та міміки або об’єктів замість Class 1, Class 2 вказуються назви необхідних для розпізнавання об’єктів. Для додавання класу треба обрати “Add a class” (рис. 4)

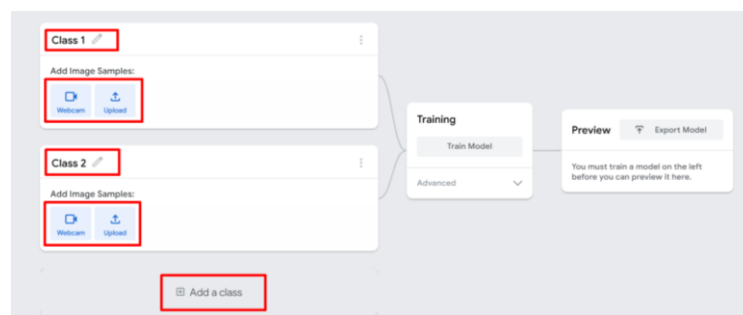


Рисунок 4 – Створення та додавання нового класу жестів або міміки

В конкретному прикладі модель машинного навчання буде розпізнавати жести (палець вгору та вниз). Також буде розпізнавати міміку (чи є посмішка чи немає). Будуть створені наступні класи: “Нічого”,

“Палець вгору”, “Палець вниз”, “Посмішка”, “Без посмішки”. Вхідні дані (датасет) у вигляді фото буде зібраний з використанням вебкамери. Для захоплення фото з вебкамери треба натиснути “Hold to Record”. Після додавання датасету (зображень для кожного класу) треба натиснути “Train Model” для здійснення процесу навчання моделі (рис. 5)

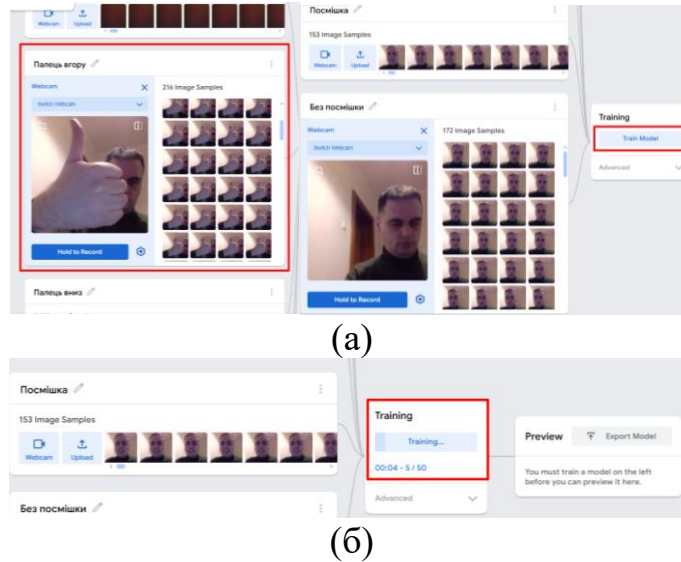


Рисунок 5 – Підготовка датасету (а) та навчання моделі (б)

Запуститься процес навчання моделі. Після закінчення процесу навчання можна перевірити роботу отриманої моделі. Після тестування роботи моделі машинного навчання, для її подальшого використання у мобільному додатку, треба зробити експорт. Для цього треба натиснути “Export Model”. Для подальшого використання у мобільному застосунку треба обрати “Tensorflow Lite” (також обрати Quantized). Далі “Download my model” (рис. 6).

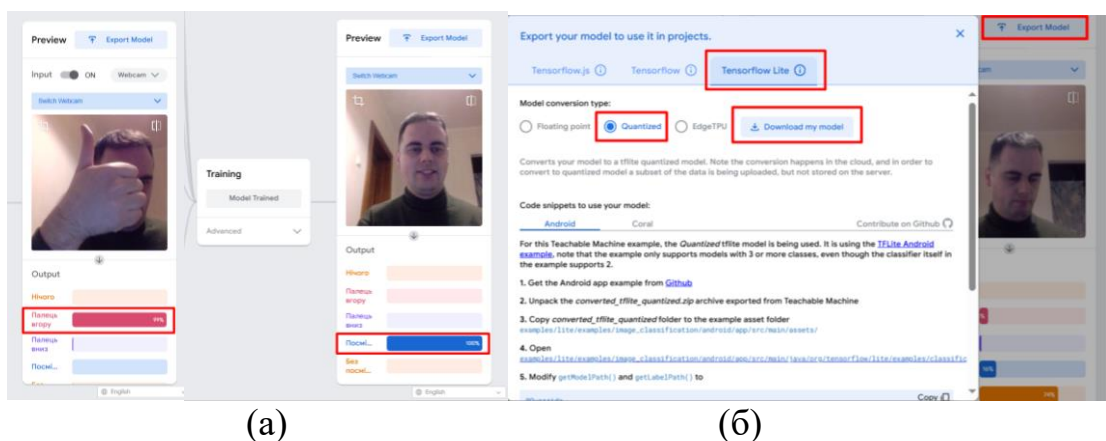


Рисунок 6 – Підготовка датасету (а) та навчання моделі (б)

Запуститься процес конвертації моделі та вона буде завантажена у вигляді архіву. Для використання у проекті мобільного додатку треба розпакувати архів (рис. 7)

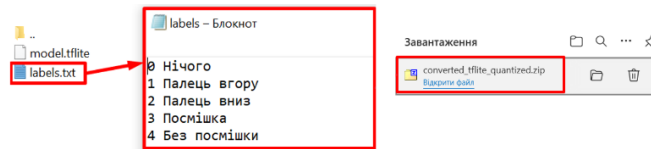


Рисунок 7 – Завантаження та розпаковка моделі машинного навчання TensorFlow Lite

## 2. ОПИС МОЖЛИВОСТЕЙ КЛАСУ CAMERAX

Клас CameraX [3] має багато можливостей для захоплення та обробки зображень з камери. Він значно спрощує процес розробки та є ефективним рішенням для отримання та обробки зображень з камери у реальному часі. CameraX підтримує декілька можливостей для роботи з зображеннями. Для розпізнавання об'єктів було використано режим роботи Image Analysis (отримання та обробка зображення у реальному часі). Для використання можливостей CameraX у проекті мобільного додатку з використанням середовища IntelliJIdea [4] необхідно у збирачі Gradle додати наступні залежності синхронізувати проект (рис. 8 а). Програмний код на Java для захоплення зображення та його обробки наведено на рис. 8 б.



Риунок 8 – Підключення CameraX (а) та захоплення зображення з подальшою обробкою (б)

## 3. ІНТЕГРАЦІЯ МОДЕЛІ У ПРОЕКТ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ

Для розпізнавання жестів та міміки, захоплених з камери мобільного пристрою, була використана модель машинного навчання model.tflite, створена за допомогою сервісу Teachable Machine. Необхідно додати файл моделі в теку ml проекту мобільного додатку. Також необхідно додати опис класів міміки та жестів в теку assets (рис. 9).

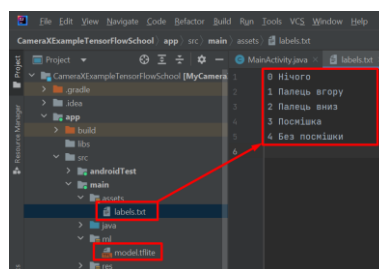


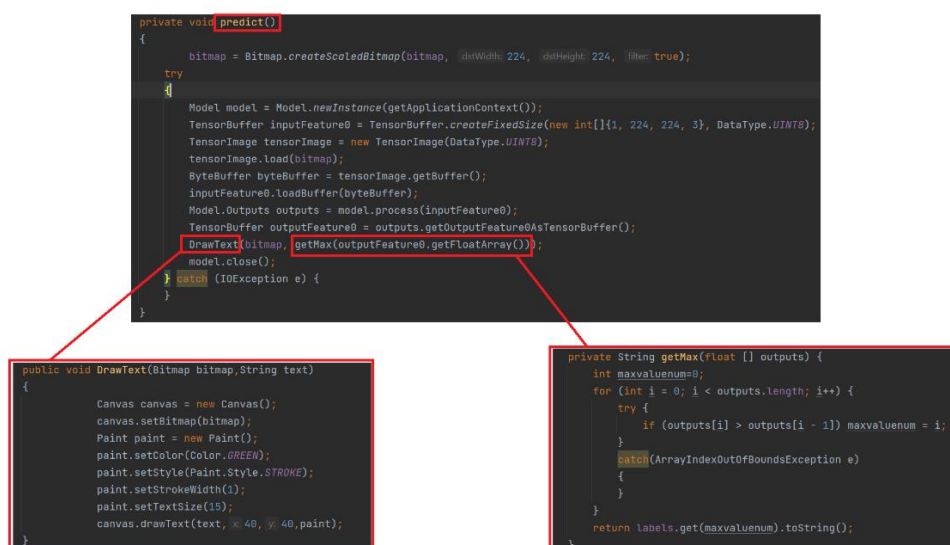
Рисунок 9 – Підключення моделі машинного навчання до проекту Android додатку

## 4. ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ У МОБІЛЬНОМУ ДОДАТКУ

Для розпізнавання жестів на зображеннях та усмішки та відображення відповідного опису використовується predict.

Додатково ця функція викликає DrawText для відображення опису розпізнаного жесту чи міміки (чи є посмішка чи немає).

Також для отримання опису найбільш вірогідного розпізнаного класу (жест вгору або вниз, посмішка або без посмішки) використовувалася функція getMax (рис. 10).



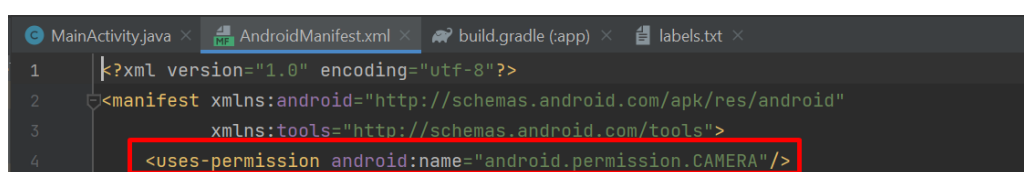
```
private void predict()
{
    bitmap = Bitmap.createScaledBitmap(bitmap, 224, 224, true);
    try
    {
        Model model = Model.newInstance(getApplicationContext());
        TensorBuffer inputFeature0 = TensorBuffer.createFixedSize(new int[]{1, 224, 224, 3}, DataType.UINT8);
        TensorImage tensorImage = new TensorImage(DataType.UINT8);
        tensorImage.load(bitmap);
        ByteBuffer byteBuffer = tensorImage.getByteBuffer();
        inputFeature0.loadBuffer(byteBuffer);
        Model.Outputs outputs = model.process(inputFeature0);
        TensorBuffer outputFeature0 = outputs.getOutputFeature0AsTensorBuffer();
        DrawText(bitmap, getMax(outputFeature0.getFloatArray()));
        model.close();
    } catch (IOException e) {
    }
}

public void DrawText(Bitmap bitmap, String text)
{
    Canvas canvas = new Canvas(bitmap);
    canvas.setBitmap(bitmap);
    Paint paint = new Paint();
    paint.setColor(Color.GREEN);
    paint.setStyle(Paint.Style.STROKE);
    paint.setStrokeWidth(1);
    paint.setTextSize(15);
    canvas.drawText(text, 40, 40, paint);
}

private String getMax(float [] outputs) {
    int maxvalueum=0;
    for (int i = 0; i < outputs.length; i++) {
        try {
            if (outputs[i] > outputs[i - 1]) maxvalueum = i;
        } catch (ArrayIndexOutOfBoundsException e) {
        }
    }
    return labels.get(maxvalueum).toString();
}
```

Рисунок 10 – Функції для розпізнавання жестів чи міміки людини та виведення опису (predict, getMax, DrawText)

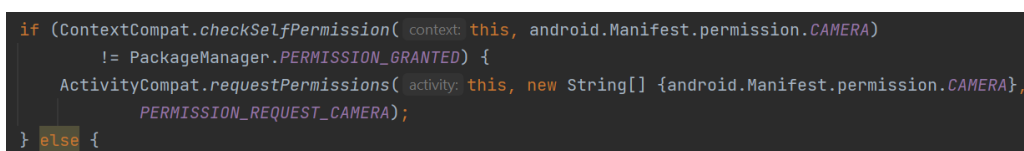
Також для коректої роботи мобільного додатку необхідно додати дозвіл на використання камери в AndroidManifest.xml (рис. 11)



```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<manifest xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
    xmlns:tools="http://schemas.android.com/tools">
    <uses-permission android:name="android.permission.CAMERA"/>
</manifest>
```

Рисунок 11 – Запит дозволу на використання камери

Необхідно також запитати дозвіл на використання камери у користувача у runtime режимі (рис. 12).



```
if (ContextCompat.checkSelfPermission( context: this, android.Manifest.permission.CAMERA)
    != PackageManager.PERMISSION_GRANTED) {
    ActivityCompat.requestPermissions( activity: this, new String[] {android.Manifest.permission.CAMERA},
        PERMISSION_REQUEST_CAMERA);
} else {
```

Рисунок 12 – Запит дозволу на використання камери

Результати розпізнавання жестів та міміки з камери мобільного пристрою у реальному часі наведені на рис. 13.

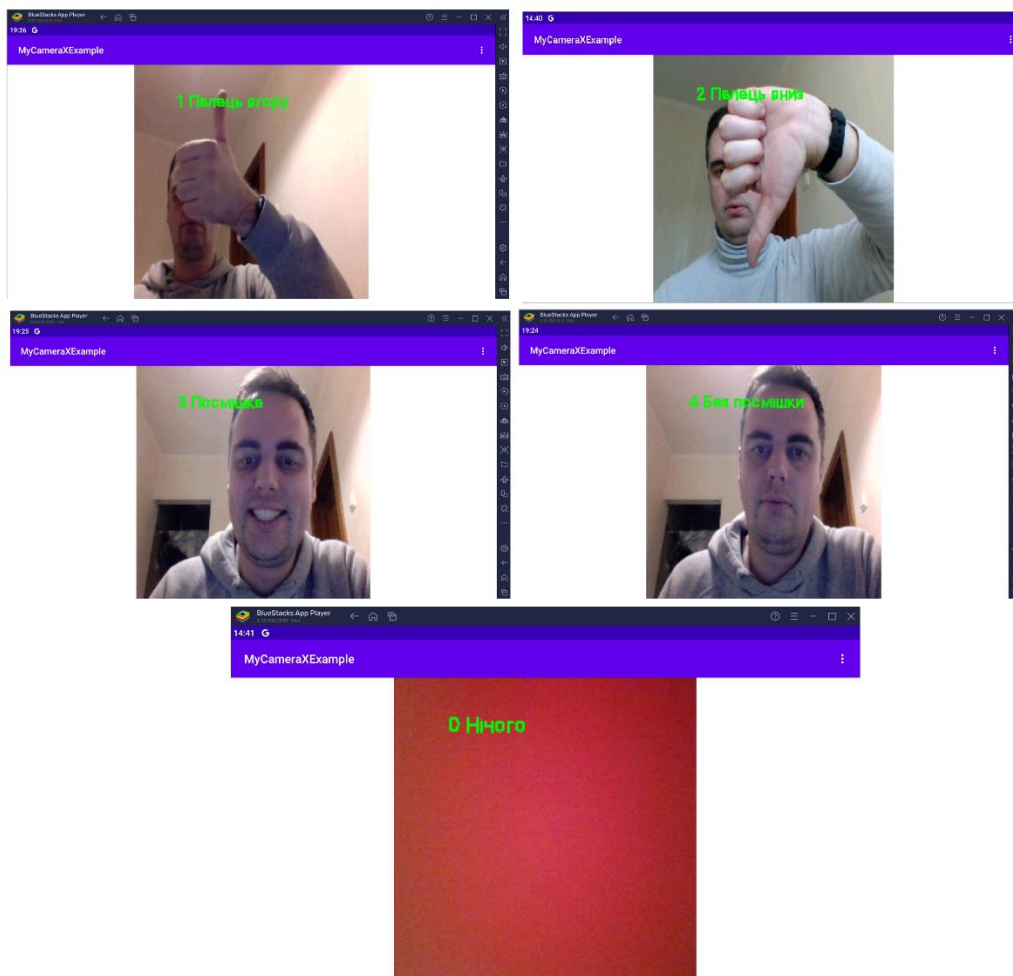


Рисунок 13 – Результати розпізнавання жестів та міміки з камери (палець вгору, вниз, посмішка, без посмішки і взагалі, коли затулили камеру мобільного пристрою)

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи було розроблено мобільний (Android) додаток. Цей додаток здатен захоплювати та обробляти зображення з камери у реальному часі. Для захоплення зображень був використаний клас CameraX. Для одночасного розпізнавання жестів та міміки використовувалася модель машинного навчання, яка була створена за допомогою сервісу Teachable Machine.

Також наведено результати розпізнавання на зображеннях з камери у реальному часі.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Teachable Machine [Electronic resource] – Available at: <https://teachablemachine.withgoogle.com/>*
2. *TensorFlow Lite [Electronic resource] – Available at: [https://www.cloudskillsboost.google/course\\_templates/17/video/504915?locale=uk](https://www.cloudskillsboost.google/course_templates/17/video/504915?locale=uk)*
3. *CameraX Overview [Electronic resource] – Available at: <https://developer.android.com/training/cameraX>*
4. *IntelliJ IDEA – the Leading Java and Kotlin IDE [Electronic resource] – Available at: <https://www.jetbrains.com/idea/>*



Думенко О.В., науковий керівник Суліма В.В. (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна)

## СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ ПЛАВНОГО ПРОБУДЖЕННЯ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO

**Анотація:** У статті досліджено процес розробки системи технологій плавного пробудження на базі мікроконтролера Arduino. Розглянуто актуальність створення автоматизованого будильника-світанку для покращення якості сну і пробудження. Описано вибір компонентів, проектування схеми системи, програмування та особливості енергозабезпечення пристрою. Розроблена система поєднує доступність, простоту використання та високу ефективність, що дозволяє застосовувати її як у побутових, так і в медичних умовах. Наведено основні етапи реалізації проекту та обґрунтовано вибір платформи Arduino Nano для забезпечення компактності та енергоефективності пристрою.

**Ключові слова:** мікроконтролер Arduino, будильник-світанок, технології плавного пробудження, автоматизація, системи керування, енергоефективність

**Abstract:** The article explores the development of a smooth awakening technology system based on the Arduino microcontroller. The relevance of creating an automated sunrise alarm clock to improve sleep quality and awakening processes is discussed. The study covers the selection of components, system circuit design, programming, and specific features of the device's power supply. The developed system combines affordability, ease of use, and high efficiency, making it applicable both for domestic and medical purposes. The main implementation stages are presented, and the choice of the Arduino Nano platform for ensuring device compactness and energy efficiency is substantiated.

**Keywords:** Arduino microcontroller, sunrise alarm clock, smooth awakening technologies, automation, control systems, energy efficiency

У сучасному світі, де стрес і нестача сну стають все більш поширеними проблемами, пошук ефективних методів поліпшення якості сну та пробудження набуває особливої актуальності. Одним із таких методів є використання будильників-світанків, які імітують природний схід сонця, сприяючи плавному та природному пробудженню.

**Актуальність дослідження.** Виконаний проект системи управління технологіями плавного пробудження на сучасній та некоштовній елементній базі.

**Мета:** Розробити систему технологій плавного пробудження на базі мікроконтролера Arduino.

**Завдання:** Розробити проект системи технологій плавного пробудження на базі платформи Arduino.

Проектування та створення такого будильника не тільки сприяє покращенню якості сну, але й надає можливість вивчити та застосувати на практиці сучасні технології та методи програмування мікроконтролерів. В результаті виконання цього проекту буде створено пристрій, який може

бути використаний як у домашніх умовах, так і у різних медичних та оздоровчих закладах. Очікується, що розроблений будильник-світанок сприятиме покращенню якості сну та загального самопочуття користувачів. Щоб на власному досвіді зрозуміти, як працює автоматизований будильник-розсвіт, можна створити його самостійно та випробувати. Оскільки справжні автоматизовані будильники-розсвіти коштують досить дорого як для середньостатистичного студента, ми будемо збирати модель з доступних та відносно дешевих компонентів. Ми побудуємо модель, використовуючи контролер Arduino Uno, оскільки він є недорогим та простим у використанні. З його допомогою можна комбінувати різні електронні компоненти та конструювати пристрій під необхідні завдання. До того ж, існує багато навчальних матеріалів для роботи з Arduino Uno.

Що взагалі таке "Будильник світанку"? Навіть сама назва говорить про функціонал, це світильник який імітує природний схід сонця, поступово збільшуючи яскравість світла у кімнаті. Цей метод допомагає прокидатися більш природно та плавно, зменшує стрес та покращує настрій протягом дня. Тобто під час сну зорові рецептори реагують на рівень освітленості та відсилають сигнали в мозок, який керує виробленням гормонів, необхідних для сну та пробудження. Під ранок, разом із світанком, організм перестає виробляти гормон сну, а рівень гормону бадьорості підвищується. В результаті такого настроювання організму ви поступово прокидаєтесь і починаєте ранок без сонливості та поганого настрою, а ранок задає темп як мінімум першій половині дня. Взимку та восени кількість світла вранці значно знижується і біоритми організму не відповідають нашому робочому графіку. Виходить, щоб забезпечити собі бадьорість зранку, потрібно більше світла. Але просто включити яскраве світло після пробудження – не найкращий вихід. Ваш організм ще не підготувався до пробудження, ви піддали його стресу від звуку будильника, а потім ще й різко увімкнули світло після повної темряви. Вихід один - світло потрібно вмикати плавно ще до того, як почати прокидатися. Є компанії, які вже кілька років продають будильники-світанку, конкретні приклади це Strome Sunrise Wake-up Light та Dekala Arches Smart Alarm Clock. Далі буде надана загальна схема Dekala Arches Smart Alarm Clock.

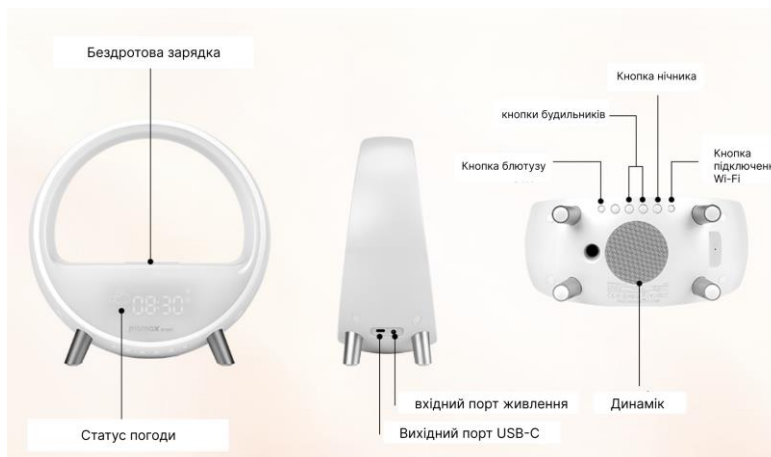


Рисунок 1

На відміну від загальної картини, які саме існують функції у будильників світанків, у Dekala Arches Smart Alarm Clock є одна відмінність, це є бездротова зарядка для телефонів. Найчастіше цією функцією нехтують і більше вкладаються в необхідний функціонал як для будильника світанку. І якщо не враховувати цю особливість, то інші функції досить звичні і прості. Тут є статус погоди на дисплеї, вхідний порт живлення, вихідний порт USB-C, кнопка блютуза для підключення телефону до пристрою та кнопка вайфая щоб підключити сам будильник до інтернету, кнопка нічника для використання його, власне, як простий нічник, так само присутні кнопки будильників які налаштовуються за допомогою телефону та спеціального додатка встановленого на ньому, з їх допомогою можна швидко встановити час пробудження.



Рисунок 2

У моделі показаної на рис.2 (Strome Sunrise Wake-up Light) присутні майже ті ж функції, що і в Dekala Arches Smart Alarm Clock, однак у цієї моделі відсутній статус погоди і бездротова зарядка, але є функція яскравості світла дисплея. Але в основному особливої відмінності у моделей, які я показав, а так само ні - несуттєві і основний принцип у них однаковий.

Власне аналог цих будильників ми сьогодні й робитимемо з дешевих китайських компонентів. Нам знадобиться: платформа ардуїно, яка керуватиме іншими компонентами, а саме: дисплей на 7 сегментних індикаторах мікросхемі TM1637. Керувати налаштуваннями будемо за допомогою енкодера. Обов'язково потрібний годинник реального часу, який вважає секунди навіть після обриву живлення, тому що у них є своя батарея, наприклад ми візьмемо RTC DS3231. [1]. Хоча створення будильника світанку своїми руками досить економічно вигідний проект, проте недоліки системи яку ми робитимемо так само суттєві. Один із них це дизайн: Магазинні будильники зазвичай мають сучасний дизайн, що добре вписується в інтер'єр спальні. Але так само варто згадати, що магазинні моделі економічно нерозумні в порівнянні з моделлю, яку ми збираємося зробити.

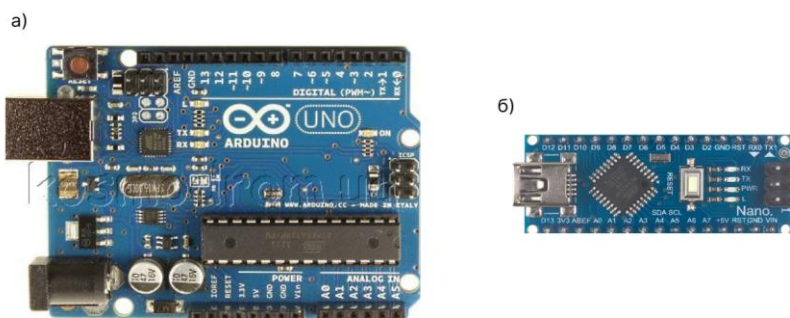
Своїми руками зібраний будильник може виглядати грубо і не завжди відповідати естетичним уподобанням. Ще в нашій моделі відсутня можливість налаштування по телефону і, звичайно ж, не буде бездротової зарядки та показу погоди. Також у комерційних моделей присутній вбудований якісний світлорозсіювач, що сприяє ніжності світла.

Обираємо платформу Arduino, яка буде керувати всіма іншими компонентами. Для цього ми досліджуємо характеристики сучасних Arduino і вибираємо відповідну для потреб нашого курсового проекту

Для нашого проекту обираємо джерело живлення. Вибираючи, ми будемо враховувати сам світловипромінювач який ми будемо використовувати, в нашому випадку це блок живлення 12V. Обираємо світловипромінювач, вибираючи враховуватимемо харчування, яке вибрали, а також бажаний естетичний вигляд.

Для регулювання яскравості світловипромінювача оберемо польовий транзистор, для простоти візьмемо готовий китайський мосфет модуль. Вибираємо семисегментний індикатор за розміром бажаного будильника, враховуючи ціну та найпростіші та швидко доступні такі елементи як піщалку та світлодіод для будильника. Для підрахунку часу навіть за відсутності харчування, виберемо годинник реального часу, вибираємо найдешевший і перевірений варіант. Енкодер вибираємо за тим же принципом, що і часи реальної години так само беремо надешеву і найнадійнішу модель. Обираємо контролери Arduino через їх відносну дешевизну, простоту використання, універсальність для різних проектів та здатність до підключення з різними компонентами. Є безліч моделей Arduino: Uno, Mega, Nano, Leonardo, Due, YUN, Micro, Esplora, LilyPad та інші. Вони відрізняються формами, схемами, мікроконтролерами, кількістю портів, призначенням портів та додатковими можливостями. Моделі Arduino поділяються за призначенням: універсальні Uno, Mega та Nano, для текстильних проектів LilyPad, для використання як USB-пристроїв Leonardo та Esplora, та Due для складних проектів.

Arduino Uno, Mega і Nano мають різні переваги. Основна різниця між Arduino Uno та Arduino Nano полягає у формі: Nano (рис.3,а) є меншою за Uno (рис.3,б), однак обидва контролери підходять для проектів однакової складності. Порівняння характеристик обох моделей наведено в табл. 1, щоб визначити, який контролер краще підходить для нашого проекту. Дані взяті за посиланням [2].



a) Arduino Uno, б) Arduino Nano

Рисунок 3 – Видгляд плат контролерів Ардуіно

Таблиця 1 –Характеристики мікроконтролерів Uno та Nano

	Arduino UNO R3	Arduino Nano
1	2	3
Напруга живлення, В	5	5
Постійний струм через вхід та вихід, мА	40	40
Тактова частота, МГц	16	16
Мікроконтролер	ATmega328P	ATmega168/ATmega328
Флеш-пам'ять, кб	32	16/32
Статична ОЗУ, кб	2	1/2
ЕСППЗУ, кб	1	0.5/1
Інтерфейс USB	так	так
Цифрові порти, шт.	14	14
Аналогові порти, шт.	6	8
Інтерфейс UART	так	так
ШИМ-порти, шт	6	6
Інтерфейс FCC Approved	так	так
SPI/I2C	так	так

Вибираємо модель Nano, тому що завдяки меншим розмірам вона ідеально підходить для проєктів, де простір обмежений. Її легко інтегрувати в малі корпуси, що у нашому випадку величезний плюс. Так само варто відзначити Nano часто дешевше UNO, що робить його більш економічно вигідним варіантом. І останнє, і найважливіше, незважаючи на свій розмір, Nano має усі необхідні технічні функції для реалізації нашого проєкту.

Наша запланована система вимагає підключення трьох джерел живлення, це світлодіодна стрічка, дисплей тм 163 та сама Arduino Nano .

Для світлодіодної стрічки необхідне живлення джерелом 6-12В. та 500-1000 мА. дані значення залежно від кількості світлодіодів на метр, в нашому випадку буде 120 світлодіодів на метр при цьому враховуємо вибирати прилад із запасом потужності приблизно 30-35% щоб забезпечити надійну роботу системи та уникнути перевантаження в критичні моменти. [4]

У нас є стрічка типу SMD 2835 довжиною 3 метри. Відомо, що кожен метр такої стрічки споживає 7,5 Вт. Оскільки довжина становить 3 метри, загальна споживана потужність буде:

$$7.5\text{Вт}/\text{м} \times 3\text{м} = 22.5\text{Вт}$$

Оптимальна напруга для світлодіодної стрічки, яка має 120 світлодіодів на метр становить 12 В.

Для розрахунку струму використовуємо формулу:

$$P = V \times I, \quad (1)$$

Підставляючи відомі значення, отримуємо:

$$22.5\text{Вт} = 12\text{В} \times I$$

$$I = 22.5\text{Вт} / 12\text{В} = 1875 \text{ мА}$$

Так само не забуваємо про ТМ1637 у якої струм споживання 80 мА [5] та Arduino Nano 20 мА [6]. Тепер коли ми дізналися споживання всіх компонентів, залишилося лише скласти їх разом і підібрати блок живлення. Все разом виходить 1975 мА, трохи менше 2 Амперів. Тобто беремо блок живлення на 12 Вольт та 2 або 2.5 Ампера

АТmega328P за посиланням [3] має наступні характеристики пам'яті:

- Ємність флеш-пам'яті - 32 КБ - призначена для зберігання програмного коду
- Ємність статичної оперативної пам'яті - 2 КБ - використовується для зберігання та обробки змінних.
- Ємність EEPROM - 1 КБ - використовується для зберігання постійних значень.

На рис.4 зображені порти МК.

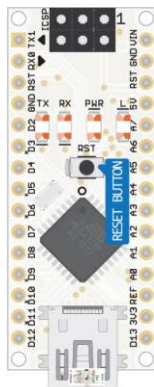


Рисунок 1.4- порти Arduino Nano

Зовнішні пристрої підключаються до мікроконтролера через відповідні порти. Аналогові та цифрові порти керуються мікроконтролером. Якщо пристрій потребує ШІМ-сигналу, його слід підключати до портів, що підтримують вивід таких сигналів. Зазвичай, пристрої з двома станами підключаються до цифрових портів, хоча можливо і до аналогових. Пристрої, які змінюють значення напруги в діапазоні, підключаються до аналогових портів. Далі інформацію узято за посиланням [4] Arduino Nano надає ряд можливостей для здійснення зв'язку з комп'ютером, ще одним Ардуїном або іншими мікроконтролерами. В ATmega168 і ATmega328 є приймач UART, що дозволяє здійснювати зв'язок за послідовними інтерфейсами за допомогою цифрових висновків 0 (RX) і 1 (TX). Мікросхема FTDI FT232RL забезпечує зв'язок приймача з USB-портом комп'ютера, і при підключенні до ПК дозволяє Ардуїно визначатися як віртуальний COM-порт (драйвера FTDI включені в пакет програмного забезпечення Ардуїно). У пакет програмного забезпечення Ардуїно також входить спеціальна програма, що дозволяє зчитувати та відправляти на Ардуїно прості текстові дані. Під час передачі даних комп'ютеру через USB на платі блимають світлодіоди RX і TX. (При послідовній передачі даних у вигляді висновків 0 і 1 дані світлодіоди не задіяні). Для завантаження та перезавантаження нашого мікроконтролера необхідно підключитися до комп'ютера. Для цього на комп'ютері слід встановити наступне програмне забезпечення: Arduino IDE версії 2.3.3, яке доступне в Інтернеті безкоштовно. Це ПЗ дозволяє писати код та підключати бібліотеки на мові програмування C/C++ з використанням бібліотеки AVR Libc. У системі розробка системи автоматизованого будильника-світанку застосовуються наступні модулі: Комп'ютер, Блок живлення 12В, Енкодер, Мікроконтролер, Дисплей TM1637, Годинник реального часу RTC DS3231, Мосфет модуль, Світлодіодна стрічка.

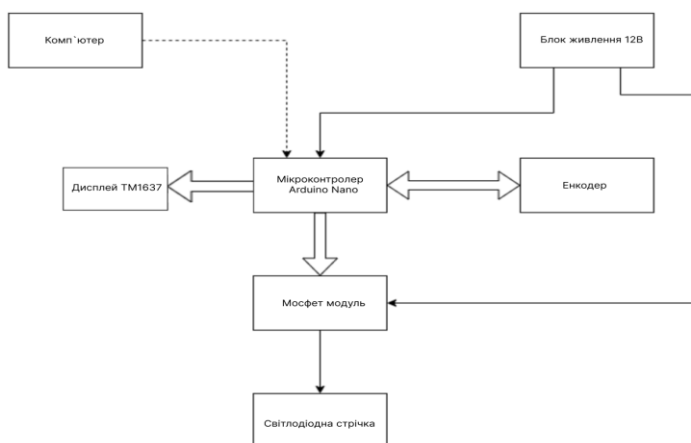


Рисунок 5 - Структура системи

Мікроконтролер підключаємо до комп'ютера тільки для завантаження або перезавантаження програми. Тому на структурній схемі зв'язок з мікроконтролером зображено пунктирною лінією, оскільки в процесі роботи система не буде з'єднана з комп'ютером. Мікроконтролер передає сигнали до дисплея, які з'являються після читання картки. Мікроконтролер пов'язаний з енкодером через інтерфейс, тому передача даних відбувається в обидві сторони. Мікроконтролер керує положенням мосфет модуля. Якщо мосфет модуль включено, тоді живлення від БЖ йде на світлодіодну стрічку. Блок живлення до світлодіодної стрічки підключається через мосфет модуль, і цей зв'язок показано тонкою лінією. Мікроконтролер живиться від блоку живлення.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Основна різниця між Arduino Uno та Arduino Nano (<https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-the-Arduino-Nano-and-the-Arduino-Uno>)
2. Живлення для світлодіодної стрічки (<https://svetum.com.ua/blog/sovety-pokupatelyam/kak-vybrat-blok-pitaniya-dlya-svetodiodnoy-lenty/>)
3. Споживання TM1637 (<https://arduino.ua/ru/prod1629-posledovatelnyy-4-razryadnyy-semisegmentnyy-led-indikator-s-i2c-draiverom-tm1637>)
4. Споживання Arduino Nano (<https://alexgyver.ru/lessons/arduino-power/>)
5. Порти мікроконтролера та їх характеристика (<https://all-arduino.ru/product/arduino-nano/>)
6. Зв'язок Arduino Nano з комп'ютером (<https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Nano>)



**Мазур Є.В.** науковий керівник **Крюка С. В.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна)

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРІНГУ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO**

**Анотація:** У статті представлено розробку автоматизованої системи моніторингу та оцінки якості повітря у промислових приміщеннях на основі платформи Arduino. Проект орієнтований на створення доступного і точного пристрою для виявлення забруднення повітря, включаючи контроль вмісту твердих частинок та газових сполук. Описано використання сенсорів SDS011, MQ-5, DHT11 та інших компонентів для збору даних, а також модулів для відображення інформації на LCD-дисплеї та передачі даних через Bluetooth. Запропонована система здатна не тільки моніторити якість повітря, але й автоматично керувати вентиляційною системою для покращення умов перебування у закритих просторах. Реалізація проекту сприятиме підвищенню екологічної безпеки працівників та оптимізації промислових процесів.

**Ключові слова:** моніторинг якості повітря, Arduino, сенсор SDS011, сенсор MQ-5, автоматизація, вентиляція, промислові приміщення

**Abstract:** The article presents the development of an automated system for air quality monitoring and assessment in industrial premises based on the Arduino platform. The project focuses on creating an affordable and accurate device for detecting air pollution, including monitoring particulate matter and gas concentrations. The use of SDS011, MQ-5, DHT11 sensors, and other components for data acquisition is described, along with modules for displaying information on an LCD screen and transmitting data via Bluetooth. The proposed system not only monitors air quality but also automatically controls the ventilation system to improve conditions in enclosed spaces. The implementation of the project will enhance the environmental safety of workers and optimize industrial processes.

**Keywords:** air quality monitoring, Arduino, SDS011 sensor, MQ-5 sensor, automation, ventilation, industrial premises

Забруднення атмосферного повітря є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності, що має значний вплив на здоров'я людей, функціонування екосистем і зміни клімату. Зростання чисельності населення, індустріалізація, розвиток транспорту та урбанізація призводять до збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, що підвищує ризики виникнення серйозних екологічних та медичних проблем. Відповідно до даних Всесвітньої організації охорони здоров'я, щорічно мільйони людей у всьому світі страждають від наслідків поганої якості

повітря, що є причиною розвитку респіраторних, серцево-судинних та онкологічних захворювань.

Основними джерелами забруднення повітря є автомобільний транспорт, промислові підприємства, виробництво енергії, а також сільське господарство. Ці джерела виділяють в атмосферу широкий спектр забруднюючих речовин, серед яких оксиди азоту, діоксид сірки, вуглекислий газ, тверді частинки та леткі органічні сполуки. Негативний вплив цих речовин на навколишнє середовище включає руйнування озонового шару, підвищення температури через парниковий ефект, підкислення ґрунтів і водойм, а також порушення біорізноманіття. У світлі цих викликів моніторинг якості повітря стає критично важливим інструментом для оцінки екологічної ситуації та розробки заходів щодо зменшення забруднення.

З розвитком технологій з'являється можливість створювати ефективні та доступні рішення для моніторингу стану повітря, які можна використовувати як у масштабі цілих міст, так і для окремих локальних зон. Сучасні прилади для вимірювання якості повітря дозволяють в режимі реального часу відслідковувати концентрації небезпечних речовин та оцінювати ступінь забруднення. Це є важливим аспектом не тільки для контролю поточної екологічної ситуації, але й для прийняття своєчасних заходів щодо її покращення.

Досліджено будову платформи Arduino, на базі якого розроблена система управління моніторингу та оцінки якості повітря у промислових приміщеннях.

**Актуальність дослідження.** Виконаний проєкт системи управління моніторингу та оцінки якості повітря у промислових приміщеннях на сучасній та некоштовній елементній базі..

**Мета:** Розробити систему управління моніторингу та оцінки якості повітря у промислових приміщеннях на базі мікроконтролера Arduino.

**Завдання:** Розробити проєкт системи управління моніторингу та оцінки якості повітря у промислових приміщеннях на базі платформи Arduino.

У даній роботі розглядається розробка приладу для моніторингу якості повітря, який дозволить ефективно відстежувати рівні забруднюючих речовин в атмосфері. Основною метою є створення доступного, надійного та точного пристрою, що може використовуватися як для наукових цілей, так і для громадського моніторингу стану повітря у місцевих спільнотах. Вирішення проблеми забруднення повітря через моніторинг є кроком до більш екологічно свідомого суспільства, яке здатне швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі та приймати рішення, спрямовані на захист здоров'я людей та природи.

Призначення проєктованої системи полягає у тому, щоб виконати моніторинг аналізу якості повітря, та автоматизації вентиляційної системи на базі мікроконтролера Arduino.

Головне призначення цього проєкту полягає в тому, щоб забезпечити безпеку знаходження працівників підприємств у замкнутому приміщенні, так як циркуляції повітряних мас там може не бути зовсім, це призведе до накопичення шкідливих сполук у повітрі, при цьому звичайну вентиляцію люди можуть забути увімкнути, або не вмикати усвідомлено, не знаючи як ці сполуки впливають на їх самопочуття, та здоров'я.

Проектована система буде являти собою комплекс датчиків для аналізу якості повітря. Ця модель буде повністю працездатна, розрахована на прецизійне вимірювання. Програма для системи буде написана на мові C++.

У цьому проєкті крім самого контролера Arduino Uno R3, також будуть задіяні такі модулі: NPS(Nova Pm Sensor) SDS011, DHT11, MQ-5, I2C LCD1602, HC-5. За допомогою всіх цих модулів, наш монітор якості повітря буде перевіряти повітря у навколишньому середовищі, обробляти данні отримані з датчиків, інформувати людей про погіршення якості повітря для прийняття намірів для покращення, та автоматично керувати системою вентиляції за допомогою додаткового модулю релейного керування.

Також в монітор може подавати загальні сигнали тривоги, при перевищенні безпечного рівня пилу в повітрі, або чадного газу, що є уже небезпечними факторами, які дуже погано впливають на здоров'я, та якість життя людей.

При цьому автоматичне ввімкнення системи вентиляції також присутнє. Програма прописана таким чином, що сигнал загальної тривоги не можливо прибрати, вона вимкнеться сама, коли рівень забруднення впаде до безпечного, це зроблено для того, щоб користувачі не змогли проігнорувати небезпеку.

Данні про якість повітря можна буде продивлятися на рідкокристалічному дисплеї, або через мобільний додаток по Bluetooth. Такі монітори повинні бути не тільки на підприємствах, але й в кожному будинку. Роздивимось схеми підключення модулів до мікроконтролера (рис.1):

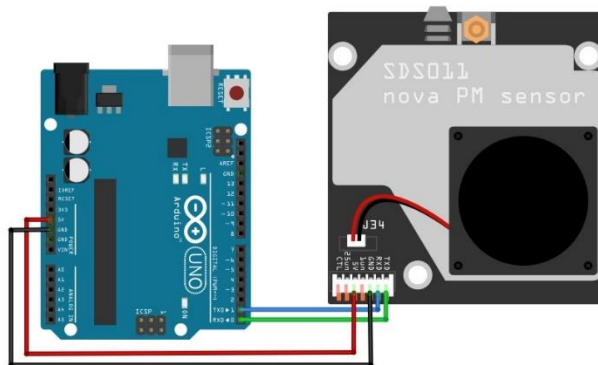


Рисунок 1- схема підключення NPS(Nova Pm Sensor) SDS011[1]

Високоточний лазерний датчик якості повітря Nova PM SDS011. Виявляє дуже крихітні частинки пилу у повітрі, та рахує їх концентрацію.



Рисунок 2 - показник розміру частинок [2]

На рис.2 зображені розміри частинок, вони являються дуже небезпечними для здоров'я людини, тому за їх рівнем дуже важливо слідкувати.

Ці частинки (PM — particulate matter) є поширеним забруднювачем атмосферного повітря, що включає суміш твердих і рідких частинок, які знаходяться в повітрі в зваженому стані. Показники, які зазвичай використовуються для характеристики PM і мають значення для здоров'я, включають масову концентрацію частинок діаметром менше 10 мкм (PM10) і частинок діаметром менше 2,5 мкм (PM2,5). PM2,5, або дрібнодисперсні частинки, включають також ультрадрібні частинки діаметром менше 0,1 мкм. У більшості регіонів Європи PM2,5 становлять 50–70% від PM10.

PM діаметром від 0,1 мкм до 1 мкм можуть перебувати в атмосферному повітрі кілька днів або навіть тижнів, і переноситися на значні відстані. Склад і властивості PM змінюються залежно від місцевості. Серед найбільш поширених компонентів PM — сульфати, нітрати, аміак, інші неорганічні йони (натрій, калій, кальцій, магній, хлориди), органічний та елементарний вуглець, мінерали, метали (ванадій, кадмій, мідь, нікель, цинк) і поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАУ). До складу PM також входять біологічні компоненти, такі як алергени та мікроорганізми. [2]

На рис.3 показано як працює сенсор SDS011. Повітря за допомогою вентилятора затягується в камеру через вхідний отвір, проходить через лазерний промінь, який світить на фотодіодну матрицю, яка фіксує кількість переривань лазерного променя, та передає данні на мікросхему, яка аналізує розміри, та тривалість переривань, після чого формує сигнал, і передає на мікроконтролер.

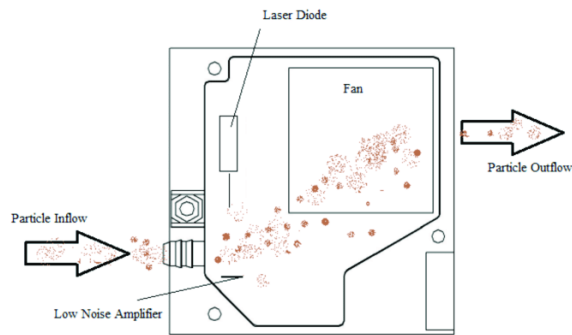


Рисунок 3 - принцип дії SDS011

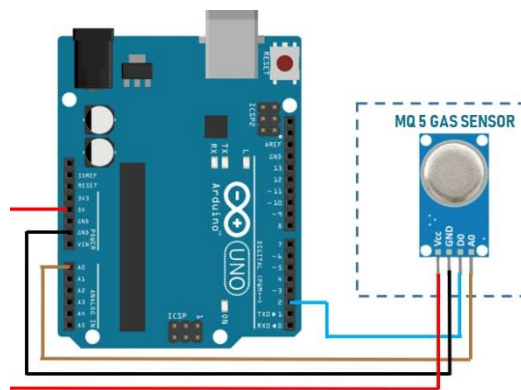


Рисунок 4 - схема підключення сенсору газу, CO<sub>2</sub>

Цей сенсор буде аналізувати та передавати на МК данні про наявність, та рівень CO<sub>2</sub> у повітрі, це дуже вадливий показчик, тому за цим рівнем дуже важливо стежити. [4] Рівень CO<sub>2</sub> (вуглекислого газу) в умовах виробництва може значно впливати на здоров'я працівників та стан обладнання. У більшості випадків проблеми виникають через підвищену концентрацію CO<sub>2</sub>, особливо в замкнутих або погано вентиляваних приміщеннях. Принцип роботи газового датчика MQ-5 полягає в наступному: датчик має чутливу нитку, виготовлену із SnO<sub>2</sub>. При попаданні пального газу, наприклад зрідженого нафтового газу, провідність нитки збільшується, і величину зміни її провідності/опору можна використовувати для вказівки еквівалентної концентрації газу. [5]

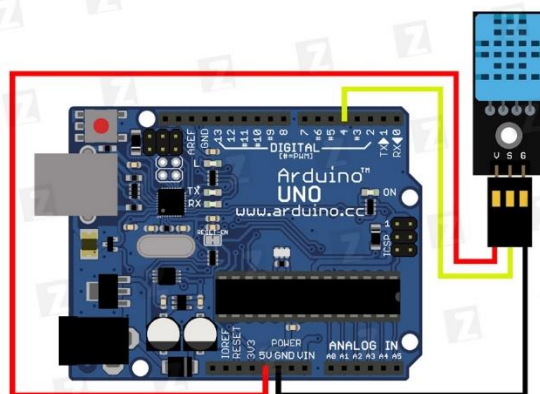


Рисунок 5 - схема підключення DHT11

Температура повітря на виробництві відіграє важливу роль для здоров'я працівників і стану обладнання.

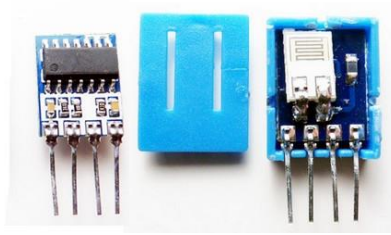


Рисунок 6 - як влаштований датчик [6]

DHT11 - це базовий, цифровий датчик температури та вологості. Він використовує ємнісний датчик вологості та термістор для вимірювання навколишнього повітря та видає цифровий сигнал на контакт даних (аналогові вхідні контакти не потрібні). Він досить простий у використанні, але потребує ретельного розрахунку часу збору даних. [6]

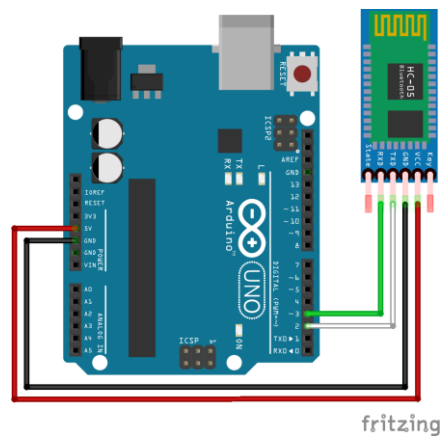


Рисунок 7 - схема підключення модуля Bluetooth

Завдяки цьому модулю, наш пристрій має змогу передавати данні до мобільного застосунку, чи застосунку на персональний комп'ютер.

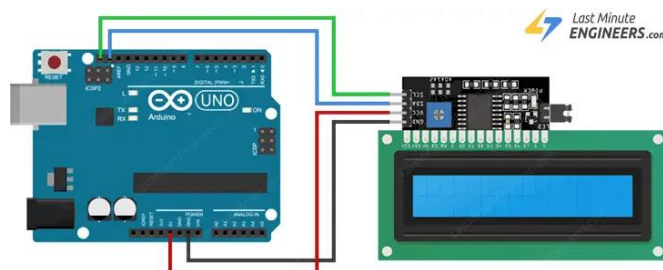


Рисунок 8 - схема підключення LCD рідкокристалічного дисплею з I2C модулем. Завдяки дисплею, можна швидко подивитися аналіз повітря, без додаткових пристроїв.

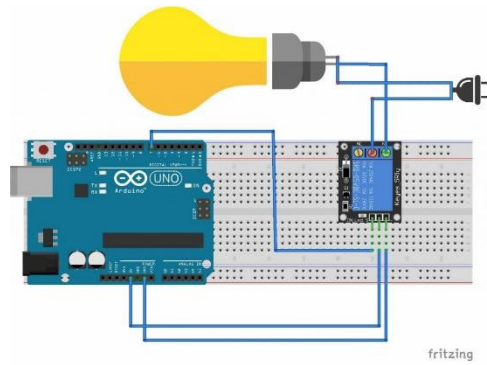


Рисунок 9 - схема підключення модулю реле

Модуль реле дозволяє нашому пристрою керувати системою вентиляції, без додаткових, смарт пристроїв.

Структурна схема має наступний вигляд:

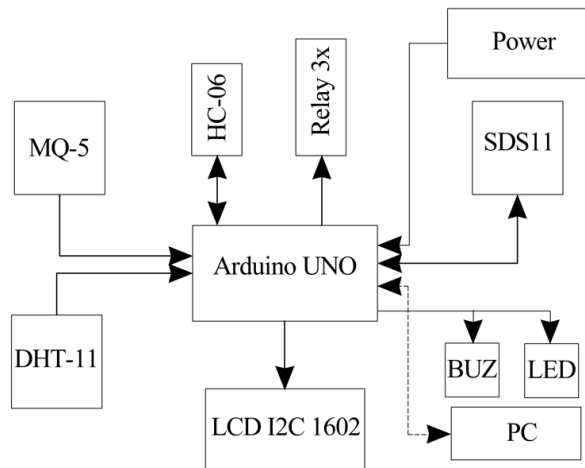


Рисунок 10 – Структурна схема

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. <https://www.electronicclinic.com/dust-sensor-sds011-interfacing-with-arduino-air-quality-monitoring/>
2. <https://www.msulab.ru/knowledge/air/microscopic-threat-particles-pm10-and-pm2-5/>
3. <https://www.hackster.io/elbertshahzaib/mq5-gas-sensor-with-arduino-61351e>
4. <https://rozetka.com.ua/ua/445759934/p445759934/>.
5. <https://www.rajguruelectronics.com/ProductView?tokDatRef=MTA5OQ==&tokenId=Mzk=&product=MQ5%20Gas%20Sensor>
6. <https://arduino.ua/ru/prod185-datchik-vlajnosti-i-temperatyri-dht11>

**Мирошниченко О.В.** науковий керівник **Топор К.О.** (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна)

## СИСТЕМА МОНІТОРІНГУ ТА ВІДОБРАЖЕННЯ ПРОГНОЗУ ПОГОДИ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO

**Анотація:** У роботі представлено розробку системи моніторингу та відображення прогнозу погоди на базі мікроконтролера Arduino. Описано структуру системи, що включає Wi-Fi модуль для отримання даних з Інтернету та OLED-дисплей для їх візуалізації. Особливу увагу приділено питанню підвищення обізнаності користувачів про потенційно шкідливі кліматичні відхилення, зокрема рівень ультрафіолетового випромінювання. Проект реалізовано з використанням доступної та енергоефективної елементної бази. Запропонована система має практичну цінність для інформування населення про погодні ризики в реальному часі та може бути використана в особистих та громадських цілях.

**Ключові слова:** моніторинг погоди, Arduino, Wi-Fi модуль, OLED-дисплей, ультрафіолетовий індекс, мікроконтролер, прогноз погоди.

**Abstract:** The paper presents the development of a weather monitoring and forecasting display system based on the Arduino microcontroller. The structure of the system is described, including a Wi-Fi module for retrieving data from the Internet and an OLED display for visualization. Special attention is given to raising user awareness about potentially harmful climatic deviations, particularly the ultraviolet radiation index. The project is implemented using affordable and energy-efficient components. The proposed system has practical value for informing the population about weather risks in real time and can be used for personal and public purposes.

**Keywords:** weather monitoring, Arduino, Wi-Fi module, OLED display, ultraviolet index, microcontroller, weather forecast.

У сучасному світі з'являється все більше кліматичних проблем через що страждає як навколишнє середовище так і тварини, рослини і люди. Щоб виправити це треба докласти багато зусиль і часу, але так як ми вже відчуваємо наслідки такі як підвищення середньої температури, індексу ультрафіолету та індексу якості повітря нам треба більше звертати увагу на попередження різних погодних ресурсів. Тому я пропоную прилад який буде попереджувати про різні кліматичні відхилення які можуть нашкодити здоров'ю людини.

Вчені попереджають, що якщо ми не внесемо істотних змін, щоб утримати підвищення глобальної температури нижче 1,5 °C, результати будуть катастрофічними. Раніше вважалось, що боротьба зі зміною клімату потребуватиме величезних фінансових витрат, що може пояснити, чому багато країн і людей не бажали нічого робити. Це більше не так, оскільки економічний вплив зміни клімату буде величезним. Зміна клімату – це безпрограшна ситуація для всіх. В наших інтересах не допустити цього.[1]



Призначення проектованої системи полягає у тому, щоб виводити данні погоди та попереджувати про шкідливі кліматичні відхилення. Система зпроектована для попередження про шкідливі або навіть небезпечні кліматичні відхилення, що зменшить ризики які можуть нашкодити людині у звичайному житті особливо якщо у людини підвищена чутливість до тих або інших подразників. Наприклад: людей з підвищеною чутливістю шкіри, такі як альбіноси, яким треба постійно бути захищеними від ураження ультрафіолетом, і особливо підвищеним індексом ультрафіолету (УФ-індекс). Ультрафіолетовий індекс, УФ-індекс, УФІ (англ. UV Index) — показник, що характеризує рівень ультрафіолетового випромінювання (УФ-випромінювання) в спектрі сонячного світла. УФ-індекс дозволяє оцінити небезпеку ультрафіолетового випромінювання Сонця для шкіри людини. Повідомлення УФ-індексу є засобом попередження населення про небезпеку від УФ-випромінювання і про необхідність використовувати сонцезахисні засоби [2].

**Актуальність дослідження.** Виконаний проект системи управління моніторингу та відображення прогнозу погоди на сучасній та некоштовній елементній базі.

**Мета:** Розробити систему управління моніторингу та відображення прогнозу погоди на базі мікроконтролера Arduino.

**Завдання:** Розробити проект системи управління моніторингу та відображення прогнозу погоди на базі платформи Arduino.

Проектована система буде отримувати данні погоди через Wi-Fi – модуль (рис.1), відправляти на мікроконтролер (МК) (рис.2), після чого буде виводити данні на OLED (I2C) дисплей (рив.3, 4).

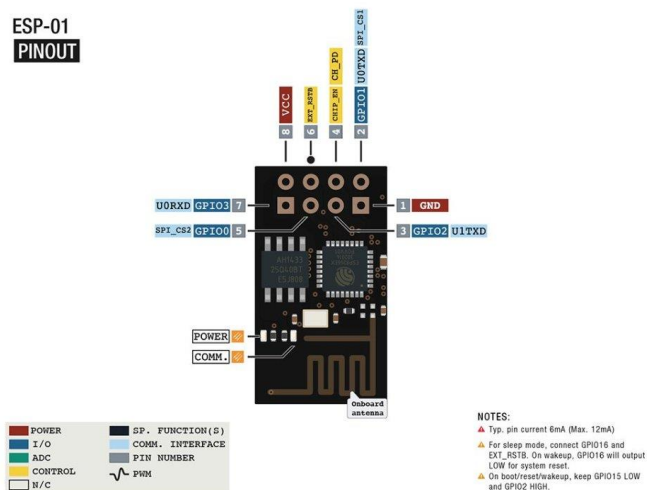


Рисунок 1 – Розпіновка Wi-Fi – модуль.[3]

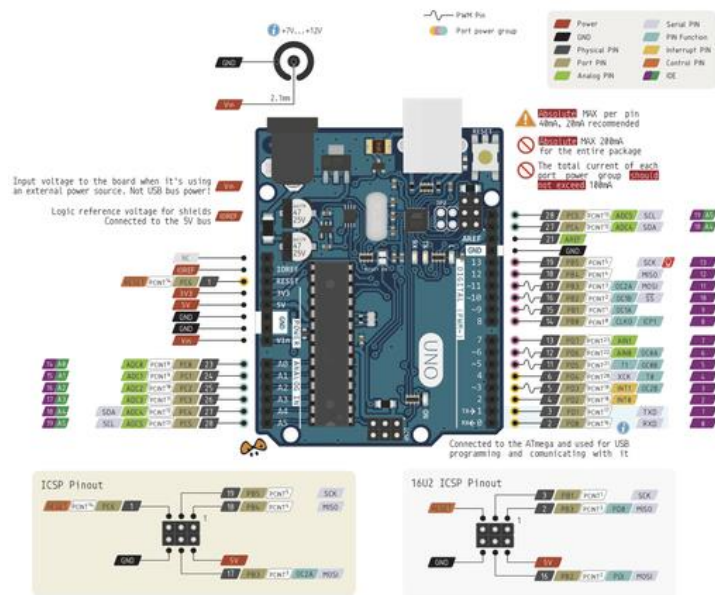


Рисунок 2 Розпіновка плати Arduino UNO [4]



Рисунок. 3- OLED displeja modulis 0.96" 128x64 I2C balts NFP1315-61AY з інтерфейсом I2C [5]



Рисунок 4- OLED displeja modulis 0.96" 128x64 I2C balts NFP1315-61AY та його піни [5]

Основна різниця існуючих систем та мого проєкту полягає у наявності Wi-Fi – модуля який використовується не для підключенню інших модулів таких як Sensor SWS 9898 WiFi та WS2910 WiFi Ecowitt USA, та інших, а для взяття інформації з сайту, що дозволить системі знати про плановані на день показники.

Вибираємо (мікроконтролер) МК. Для вибору МК порівнюємо характеристики та доступність. Вибираємо джерело живлення. В залежності від потреб можемо обрати або стаціонарне або портотивне живлення в обох випадках для вибору будемо розглядати характеристики елементів. З характеристик МК дізнаємося тип та об'єм пам'яті. За способом зберігання інформації розрізняють статичні і динамічні ОЗП. Статичні ОЗП, як і регістри, будуються на базі звичайних тригерних структур із двома стійкими станами. У динамічних ОЗП елементами пам'яті є конденсатори невеликої ємності: конденсатор заряджений - зберігання сигналу 1, розряджений – 0.

У процесі функціонування апаратури ПЗП працюють лише у двох режимах: зберігання і зчитування інформації. Під час вимкнення живлення інформація, що зберігається в ПЗП, зберігається зберігається, тому мікросхеми ПЗП є енергонезалежними.

Вибираємо мікроконтролер Arduino UNO (рис.5):

Мікроконтролер ATmega328

Робоча напруга 5В

Напруга живлення (рекомендована) 7-12В

Напруга живлення (гранична) 6-20В

Цифрові входи/виходи 14 (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи)

Аналогові входи 6

Максимальний струм одного виводу 40 мА

Максимальний вихідний струм виводу 3.3V 50 мА

Flash-пам'ять 32 КБ (ATmega328) з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем

SRAM 2 КБ (ATmega328)

EEPROM 1 КБ (ATmega328)

Тактова частота 16 МГц [6]



Рисунок 5 - Arduino UNO вид зверху та знизу

Наша проєктована система потребує джерело живлення для роботи МК.

Для живлення МК нам необхідне джерело 5В, або 7-12В. Інші елементи схеми ми будемо жити від Ардуіно через її піни живлення. Для програмування та живлення Arduino UNO 5В використовується комп'ютер який передає інформацію та живлення необхідний дрот USB type B (рис.6-10). Надалі ми можемо жити МК від батареї типу «Крона» для забезпечення або портативності схеми без перебійного живлення схеми у разі відсутності світла або інших причин.



Рисунок 6 – Елементи на платі Arduino UNO [7]

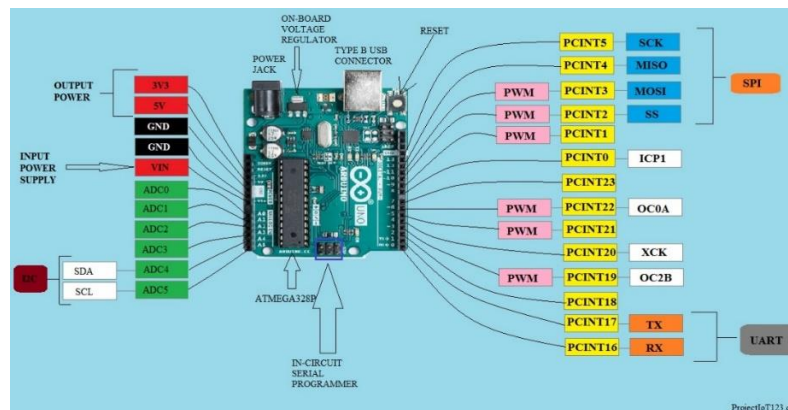


Рисунок 7 – Піни Arduino UNO [8]



Рисунок 8 – Порт та дрот USB type B для Arduino UNO [8]

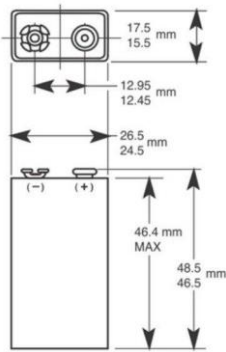


Рисунок 9 – Креслення батареї типу «Крона» [9]



Рисунок 10 – Дріт для батареї типу «Крона» [9]

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. <https://www.ekoenergy.org/uk/extras/climate-change>.
2. <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
3. [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQyLlwwwePQ7n4Lbt\\_20ibz\\_TYgPd29IMqneUfi84pZE2hINWOyNM6YwnmeluB4cloBqM0&usqp=CAU](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQyLlwwwePQ7n4Lbt_20ibz_TYgPd29IMqneUfi84pZE2hINWOyNM6YwnmeluB4cloBqM0&usqp=CAU).
4. [https://images.prom.ua/1936445029\\_1936445029.jpg?PIMAGE\\_ID=1936445029](https://images.prom.ua/1936445029_1936445029.jpg?PIMAGE_ID=1936445029).
5. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fflabumi>.
6. <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>.
7. <https://itmaster.biz.ua/directory/kits-nabory/arduino-uno.html>.
8. <https://projectiot123.com/2019/04/07/arduino-uno-for-beginners>.
9. <https://vitox.com.ua/ua/p1363613058-batarejka-560mah-enerlight.html>.

**Удовиченко Д.А., науковий керівник Федотова О.П. (ВСП «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії, м. Дружківка, Україна) СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОЛИВУ РОСЛИН НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ ARDUINO**

**Анотація:** У статті досліджено процес розробки системи автоматизованого поливу рослин на базі мікроконтролера Arduino Nano. Описано структуру системи, яка включає датчик вологості ґрунту, електромеханічне реле та водяний насос для реалізації функції краплинного поливу залежно від рівня вологості. Визначено основні компоненти, їх функціональні особливості та переваги використання даної автоматизованої системи в побутових умовах. Зазначено економічні та екологічні переваги запропонованого рішення, а також його здатність підвищувати стійкість рослин до хвороб і шкідників. Система є прикладом доступного і практичного застосування технологій Arduino для розв'язання прикладних завдань в умовах обмежених ресурсів.

**Ключові слова:** автоматизований полив, Arduino Nano, мікроконтролер, датчик вологості, водяний насос, краплинний полив, система управління.

**Abstract:** The article explores the development of an automated plant watering system based on the Arduino Nano microcontroller. The structure of the system is described, including a soil moisture sensor, an electromechanical relay, and a water pump, which enable drip irrigation depending on soil moisture levels. The main components, their functional features, and the advantages of using this automated system in domestic environments are outlined. The economic and ecological benefits of the proposed solution are highlighted, along with its ability to enhance plant resilience against diseases and pests. The system serves as an example of affordable and practical application of Arduino technologies for solving real-world problems under resource constraints.

**Keywords:** automated watering, Arduino Nano, microcontroller, soil moisture sensor, water pump, drip irrigation, control system.

Домашні рослини є не лише прикрасою у квартирі. Вони виділяють у зовнішнє середовище кисень, усувають запиленість приміщень, а також знешкоджують токсичні домішки, що перебувають у повітрі. Тому так важливо, щоб рослина завжди залишалася здоровою, а для цього потрібно правильно її поливати. Часто господарі не знають, як правильно це робити, або просто забувають. Така безвідповідальність призводить до різноманітних хвороб рослин. Це конструкторське проектування присвячено вивченню питань, пов'язаних із розробкою роботизованих пристроїв на платформі Arduino Uno, зокрема пристрою, здатного забезпечувати рослини водою залежно від її виду та умов середовища. [1].

**Актуальність дослідження.** Виконаний проєкт системи управління автоматизованого поливу рослин на сучасній та некоштовній елементній базі.

**Мета:** Розробити систему автоматизованого поливу рослин на базі мікроконтролера Arduino.

**Завдання:** Розробити проєкт системи автоматизованого поливу рослин на базі платформи Arduino.

Наш автополив самостійно перевірятиме вологість ґрунту і в разі потреби включатиме краплинний полив рослини. Це дуже зручно для тих, хто любить квіти, але періодично надовго їде або просто не хоче займатися поливом рослин у "ручному" режимі. [2].

Якщо раніше створення складних електронних пристроїв було доступне лише невеликій кількості людей зі спеціальними знаннями та навичками, то з появою Arduino це стало доступнішим для широкого загалу. Ця платформа для створення електронних пристроїв з'явилася вже більше десяти років тому і стала популярною серед розробників і ентузіастів з усього світу. Призначення проєктованої системи полягає в тому, щоб розробити принцип роботи та розповісти всю гідність та зручності автоматичного поливу на базі мікроконтролера Arduino. Автоматичний краплинний полив на Arduino рисунок 1.1 є автоматизованою системою моніторингу параметрів ґрунту та навколишнього середовища. Залежно від отриманих даних здійснюється керування виконавчими машинами.



Рисунок 1 – Автоматичний полив квітів на основі Arduino nano.

Така система відмінно підходить для автономного поливу квітів будинку і в саду, коли господарі у відпустці, або для тих хто просто хоче перекласти частину своїх завдань на роботів. Більш досконалі системи клімат-контролю містять у собі датчики вимірювання концентрації вуглекислого газу в повітрі, датчики температури та вологості повітря, а для підтримки певного рівня перерахованих вище показників у них можуть використовуватися різні вентилятори та обігрівачі.

Переваги автополиву полягають в економії нашої енергії та часу, скороченні витрати води (на 20-50%) та забезпеченні оптимального її використання рослинами – за рахунок їх систематичного поливу та регулювання кількості води відповідно до потреб конкретних видів. В результаті вони міцніші і менш уразливі для хвороб (особливо грибкових) і атак шкідників. Коли системою керує автоматичний контролер, про полив можна не згадувати - він запуститься автоматично. Варто пам'ятати, що поливальні пристрої повинні бути встановлені таким чином, щоб відстані

між ними були трохи меншими, ніж діапазони їх поливу (поверхні поливу повинні трохи перекривати один одного).[3].

Мікроконтролер Arduino в системі поливу представляє "мозок" всього пристрою, що здійснює збір даних про навколишнє середовище, їх аналіз та генерацію електричних імпульсів на своїх висновках для управління виконавчими пристроями (водяний насос). Визначимося з необхідними компонентами для збирання автоматизованого поливу.

Arduino Nano – це налагоджувальна плата невеликого розміру, яка входить до трійки лідерів за популярністю серед радіоаматорів-програмістів. Незважаючи на свій скромний розмір, вона практично нічим не поступається гучній Arduino Uno за функціоналом і може використовуватися в проектах, де габарити відіграють істотну роль.

Ранні версії Arduino Nano базувалися на основі мікроконтролера ATmega168. Починаючи з версії 3.0, у них встановлені більш просунуті ATmega328, зі збільшеним обсягом FLASH та EEPROM-пам'яті, а також з більшою тактовою частотою. На Рисунку 1.2 показано зовнішній вигляд плати Arduino Nano V3.0.

У системі автоматичного поливу важливі три складові: контролер, що управляє, пристрої зчитування даних про навколишнє середовище і виконавчі пристрої. З першим пунктом ми вже розібралися - у цьому плані буде використовуватися плата Ардуїно (у наступних частинах циклу мова вже піде про роботу з Wi-Fi контролерами типу ESP8266 і ESP32).

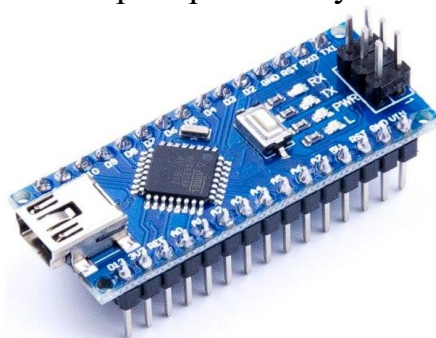


Рисунок 2 – Arduino Nano.

Для зчитування даних нам потрібен аналоговий датчик вологості ґрунту (гігрометр), а для того, щоб здійснювати краплинний полив, потрібен невеликий водяний насос (помпа на рисунку 1.3), що працює від 5 вольт (на рисунку 1.4). До контролера Ардуїно можна підключити величезну кількість електронних пристроїв, але не всі з них безпечно підключати: якщо такий модуль може споживати силу струму більше 40 мА, варто утриматися від підключення безпосередньо. Датчик вологості ґрунту споживає невеликий струм, а водяний насос краще підключити через модуль реле - пристрій для управління високопотужним навантаженням, що має опторозв'язку для захисту контролера від перепадів струму.





Рисунок 3 – Водяной насос (помпа). Рисунок 4 – Блок живлення 5В

Також важливі деякі нюанси:

1. Реле (на рисунку 1.5) може бути твердотілими чи електромеханічними. Останні є найбільш популярними, мають низьку вартість і видають характерне клацання при замиканні/розмиканні ланцюга (сама зміна в електричному ланцюгу відбувається за допомогою поданого з контролера Arduino цифрового сигналу напругою 0 або 5 вольт залежно від того, який стан роботи реле потрібно встановити). Твердотільні вважаються безшумними, більш надійними та дорогими. Зупинимося у цьому проекті на електромеханічних реле. При необхідності ви легко зможете замінити одне на інше: на програмному коді це відобразиться незначно. Водяний насос має на увазі, що до нього буде підведена трубка для забору води з певної ємності і для того, щоб цю воду спрямовувати у бік нашої рослини. Досить просто це реалізувати за допомогою крапельних трубочок (крапельниці);

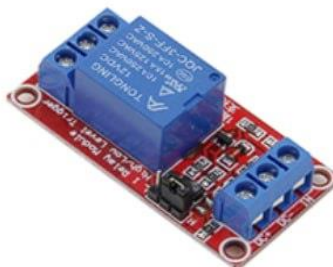


Рисунок 5 - Одноканальне електромеханічне реле.

2. Датчик вологості ґрунту (на рисунку 1.6) постійно перебуватиме у ґрунті та взаємодіяти з дуже агресивним для його металевих обкладок середовищем. Щоб знизити ймовірність корозії (яка, безсумнівно, призведе до зниження ефективності модуля, а надалі до його виходу з ладу), можна використовувати кілька методів: застосування датчика з додатковим захисним шаром та його живлення імпульсами з періодичністю 1 раз на 30 хвилин або 1 раз на 6 годин (це значення ви можете потім змінити в програмному коді): чим рідше, тим краще, адже процес корозії настає тільки в процесі активної роботи датчика під напругою. Датчик, що використовується в проекті, має ємнісний метод вимірювань, який забезпечує йому цілком високу точність. На самому корпусі контактного щупа відзначено білу лінію, до якої рекомендується занурювати датчик у землю;



Рисунок 6 – Датчик вологості ґрунту.

3. Та кабель для Arduino Nano miniUSB-USB (на рисунку 1.7). А для підключення до неї модулів необхідні з'єднувальні дроти (перемички).



Рисунок 7 – Кабель USB

Щоб зібрати схему для автополиву нам потрібно:

1. Плата Arduino Nano та кабель до неї для підключення до комп'ютера;
2. Безпайкова макетна плата для швидкого складання схем;
3. Блок живлення 5В або відсік для 4-х батарейок АА (+ самі батарейки);
4. Датчик вологості ґрунту із захисним покриттям;
5. Одноканальне електромеханічне реле, що працює від 5 вольт;
6. Водяний насос для поливу, 5В;
7. Сполучні дроти (мама-тато, тато-тато).

Після того, як всі компоненти будуть, можна приступати до збирання системи автополиву. Для цього скористайтеся макетною платою. Завдяки цій платі легко можна збирати робочу електричну схему без використання паяльника та інших інструментів, можна все протестувати і заздалегідь усунути помилки при підключенні, перш ніж все це спаяти. І коли все вірно зробимо, то вийде авто полив (на рисунку 1.8) на основі Arduino Nano в домашніх умовах, і буде працювати на благо людства.

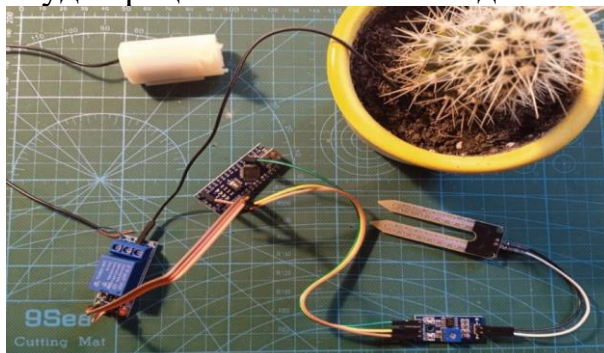


Рисунок 8 – Автополив на основі Arduino Nano.



Рисунок .9 – Схема автополива на дворі газона.

Схема:

- 1-датчик дощу,
- 2-ємність накопичувальна,
- 3-пульт керування;
- 4-трубопровід;
- 5-роторний спринклер;
- 6-магнітний клапан;
- 7-фітинги з'єднання трубопроводу;
- 8 - дощувач віяловий.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1]<https://stemua.science>
- [2]<https://giant4.ru/blog/sovetypokupatelyam/avtopolivstatya/>.
- [3]<https://xn--80ahq0afz7a3a.xn--p1ai/inzhenernye-sistemy-ograzhdeniya/ustrojstvo-avtomaticheskogopoliva/preimushhestvaavtomaticheskogopoliva>
- [4]<https://www.avtopoliv-rainbird.ru/articles/glavnye-pljusy-i-minusy-aktualnyh-sposobov-avtopoliva>
- [5]<https://alexgyver.ru/lessons/aboutarduino/>
- [6]<https://amperka.ru/page/whatisarduino>
- [7]<https://myproject.com.ua/ru/arduinochtoetoizachemru>

Шудро Е.А., Мельник Т.В. науковий керівник Скрипник С.В. (Загально-освітня школа №3, м. Краматорськ, Україна)

## РОЗРОБКА ВЕБ-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ФІЗИЧНОГО СТАНУ КОРИСТУВАЧІВ ЧЕРЕЗ ВІДЕОРЕКОМЕНДАЦІЇ РЕАБІЛІТАЦІЙНИХ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ

**Анотація:** У роботі представлено результати розробки веб-застосунку "Healthy" для покращення фізичного стану користувачів за допомогою персоналізованих відеорекомендацій реабілітаційних фізичних вправ. Мета роботи полягала у створенні зручного інструменту для підбору вправ, спрямованих на реабілітацію різних груп м'язів. Проведено аналіз реабілітаційних методик, розглянуто технології створення веб-застосунків, розроблено інтерфейс і функціонал сайту, здійснено інтеграцію відеоконтенту через платформу YouTube. Застосунок забезпечує простий доступ до відеоуроків та орієнтований на широкий спектр користувачів. У висновках відзначено ефективність запропонованого рішення та окреслено перспективи його подальшого розвитку шляхом розширення функціоналу і впровадження системи зворотного зв'язку.

**Ключові слова:** веб-застосунок, реабілітаційні фізичні вправи, фізичний стан, відеорекомендації, інтерфейс користувача, Healthy, YouTube-інтеграція.

**Abstract:** The article presents the results of developing the "Healthy" web application aimed at improving users' physical condition through personalized video recommendations of rehabilitation exercises. The goal of the study was to create a convenient tool for selecting exercises targeting the rehabilitation of various muscle groups. The analysis of rehabilitation methods was conducted, web application development technologies were studied, the site's interface and functionality were designed, and video content integration via the YouTube platform was implemented. The application provides easy access to video tutorials and is targeted at a wide range of users. The conclusions highlight the effectiveness of the proposed solution and outline future development prospects, including the expansion of exercise categories and the introduction of a feedback system.

**Keywords:** web application, rehabilitation exercises, physical condition, video recommendations, user interface, Healthy, YouTube integration.

**Мета дослідження:** створити веб-застосунок, який допомагатиме користувачам покращувати свій фізичний стан за допомогою персоналізованих відеорекомендацій реабілітаційних вправ.

**Завдання дослідження:**

1. Провести аналіз фізичних вправ для реабілітації, які підходять для різних груп м'язів.
  2. Вивчити технології створення веб-застосунків.
  3. Розробити інтерфейс і функціонал сайту для простого доступу до рекомендацій.
  4. Інтегрувати відеоконтент із вправами у застосунок.
  5. Перевірити зручність використання й ефективність застосунку.
- Біографічна довідка про технологію.

Аналіз було проведено на базі сучасних наукових і практичних джерел, зокрема монографії А. Герцика, присвяченої теоретико-методичним основам фізичної реабілітації при порушеннях діяльності опорно-рухового апарату, матеріалів I Всеукраїнської науково-практичної конференції (2023), а також електронних ресурсів JotForm і YouTube, які забезпечують інтеграцію сучасних технологій у процес розробки веб-застосунків. Додатково використано навчальний посібник І. П. Чекмарьова, який висвітлює основи лікувальної фізичної культури та реабілітації [1-5].

Для створення проєкту використовувалися такі технології:

- HTML, CSS, JavaScript для створення структури та дизайну сайту.
- Інтеграція відеоконтенту через платформу YouTube для зручного доступу до вправ.
- Сервіс Figma використовувався для розробки дизайну інтерфейсу.

Сутність проєкту: з астосунок "Healthy" реалізує функцію підбору реабілітаційних вправ, спрямованих на конкретні групи м'язів:

- Головна сторінка містить опис мети застосунку та кнопки переходу до різних розділів.
- Рекомендації надаються у вигляді відеоуроків із вправами, які можна виконувати вдома.
- Інтерфейс розроблений із використанням яскравих кольорів і чіткої навігації, щоб користувачі могли легко знайти потрібний контент.

## ВИСНОВКИ

Розроблений веб-застосунок "Healthy" допомагає користувачам отримувати ефективні відеорекомендації для покращення фізичного стану. Унікальність проєкту полягає в персоналізованому підході до вибору вправ. Подальший розвиток передбачає додавання нових категорій вправ та інтеграцію системи зворотного зв'язку для оцінки прогресу користувачів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Герцик А. Теоретико-методичні основи фізичної реабілітації / фізичної терапії при порушеннях діяльності опорно-рухового апарату : монографія / Андрій Герцик. - Львів : ЛДУФК, 2018. - 388 с.
2. Збірник тез I Всеукраїнської науково-практичної конференції (електронне видання), 14 квітня 2023 року. Харків : Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2023. 220 с.
3. JotForm: Online Form Builder & Form Creator. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jotform.com>
4. YouTube: Video Sharing Platform. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com>
5. Чекмарьов І.П. Основи ЛФК і реабілітації. – Львів: Освіта, 2021.

*Наукове видання*

# **МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО-ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Збірник наукових праць**

**Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
16-18 квітня 2025 р.**

За загальною редакцією

д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and

Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić

Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 21,13.  
Обл.-вид. арк. 21,97. Тираж 100 пр. Зам. № 5

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №1633 від 24.12.2003