

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

# **Технологія функціональних та наноповерхонь (ч1)**

**Навчальний посібник**

Краматорськ  
ДДМА  
2021

УДК 621.002:658.512

ББК 34.5

Н 73

### **Автори:**

*Ковалевський С. В.*, д-р техн. наук, професор (вступ, 1–3 розділи);

*Онищук С. Г.*, канд. техн. наук, доцент (1–3 розділи);

*Тулупов В. І.*, канд. техн. наук, старший викладач (2, 3 розділи);

### **Рецензенти:**

*Соколов В. І.*, д-р техн. наук, професор, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля;

*Костін В. В.*, д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського;

*Дрогобецький В. В.*, д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського.

Технологія функціональних та нано-поверхонь. Навчальний посібник / С. В. Ковалевський [та ін.]. – Краматорськ : ДДМА, 2021. – 196 с. ISBN 978-966-379-665-9.

Навчальний посібник присвячений спеціальним методам та методам комбінованого оброблення деталей машин. Розглянуті такі методи, як електроімпульсне вигладжування, точіння, фрикційно-зміцнювальне оброблення, електромагнітоабразивне оброблення, методи зміцнення з використанням СВЧ і коронного розряду та інші. Нейросітьовий аналіз використовується як інструмент для отримання адекватних математичних моделей процесів оброблення деталей машин.

Розраховано на науковців, студентів технічних вузів і фахівців, що розробляють технології та оптимізують виготовлення машин важкого машинобудування.

**УДК 621.002:658.512**

**ББК 34.5**

ISBN 978-966-379-665-9

© С. В. Ковалевський,

С. Г. Онищук,

В. І. Тулупов, 2021

© ДДМА, 2021

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1</b> .....	7
<b>КЛАСИФІКАТОР СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 2</b> .....	20
<b>ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ БАЗ ДАНИХ СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	20
<b>ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</b> .....	26
<b>3.1 Життєвий цикл виробу. Електроімпульсне вигладжування</b>	26
<b>3.2 Фрикційно-зміцнювальне оброблення</b> .....	39
<b>3.3 Електромагнітно-абразивне оброблення</b> .....	66
<b>3.4 Зміцнення поверхонь виробів у технологічному середовищі</b>	83
<b>3.5 Застосування енергії СВЧ-процесів</b> .....	101
<b>3.6 Електроімпульсне вигладжування з використанням СВЧ- реакцій</b> .....	120
<b>3.7 Оброблення поверхонь виробів у середовищі ПАР</b> .....	132
<b>3.8 Вібраційне оброблення в середовищі ПАР</b> .....	157
<b>3.9 Модифікування матеріалом електрода в середовищі коронного розряду</b> .....	166
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	182
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	183

## ВСТУП

Основне призначення робочих поверхонь деталей машин і механізмів – це забезпечення їх заданих параметрів, які забезпечують виконання необхідних робочих функцій. Увесь комплекс засобів проектування машин, наявний у розпорядженні конструктора, служить формулюванню таких вимог. Вони є наслідком уявлень конструктора про працездатність майбутньої машини і її прогнозовані споживчі властивості. Виконання заданих робочих функцій в загальному вигляді завжди може бути задане вимогами просторово-часових обмежень на координати кожної точки проєктованих машин або механізмів. Оскільки таке обмеження є нічим іншим, як системою взаємопов'язаних розмірних ланцюгів машини, що регламентують можливість виконання нею заданих функцій, то формування таких розмірних ланцюгів і збереження ними параметрів у заданих допусках межах є основним завданням технолога. Безумовно, регламентацію параметрів розмірних ланцюгів машин і механізмів, а також наявні в розпорядженні виготовлювачів машин технологічні методи необхідно підтримувати в актуальному стані і постійному розвитку. У зв'язку з цим створення нових ресурсозберігаючих технологічних методів формування необхідних характеристик робочих поверхонь деталей машин, заснованих на використанні різних фізичних ефектів і явищ, є актуальним. Метою монографії є систематизований виклад основ створення спеціальних методів оброблення робочих поверхонь деталей машин. Матеріалами монографії послуговували результати науково-дослідних робіт лабораторії спеціальних методів оброблення робочих поверхонь деталей машин, створеної під керівництвом д-ра техн. наук, професора С. В. Ковалевського і його колегами, аспірантами та студентами у Донбаській державній машинобудівній академії.

Теорія точності представлена великою кількістю робіт, які можна групувати за різними ознаками:

- за методами досягнення точності (метод пробних ходів і промірів, метод оброблення на заздалегідь налаштованому верстаті);

- за методами призначення допусків на розміри робочих поверхонь та забезпечення збирання виробу (метод повної взаємозамінності, метод неповної взаємозамінності, метод регулювання, метод пригону);

- за характером зміни розмірів робочих поверхонь деталей машин у процесі їх експлуатації (розмірне адгезійне або дифузійне зношення, втрата точності через вплив залишкових напружень в деталях машин);

- за факторами, які супроводжують технологічний процес (кінематичні фактори, міцності, температурні фактори, що впливають на розміри деталей у процесі їх створення);

- за методами контролю точності лінійних і кутових розмірів;

- за надійністю технологічних процесів (стабільність параметрів якості);
- за детермінованістю об'єктів і процесів (систематичні, випадкові, змішані);
- за витратами ресурсів – енергетичних і часових в процесі створення машин.

Як усяка класифікація, таке подання теорії точності має ряд недоліків, однак дозволяє виділити основні класифікаційні групи, в межах яких можуть бути виявлені і враховані загальні для них особливості і закономірності. Основним призначенням спеціальних методів оброблення робочих поверхонь деталей машин є створення таких технологічних процесів, які дозволили б виготовляти вироби з необхідною якістю в заданій кількості за певний час. При цьому повинен бути досягнутий економічний результат у вигляді прибутку підприємства – виробника машини.

Все вищесказане характеризує важливі системні властивості системи, що розвивається – цілісність і прагнення до динамічної рівноваги, які слід враховувати у виробничому процесі, зокрема – у технологічному процесі.

Будь-яка створювана машина має своєю метою брати участь у системі економічних відносин і тому підпорядкована основній вимозі – створювати передумови для формування товарних властивостей виробу. Товарні властивості виробу проявляються у створенні в кінцевому підсумку прибутку, як різниці між ціною виробу і собівартістю її виготовлення в сукупності з витратами на підтримку працездатності виробу в період усього його життєвого циклу.

У цих умовах прагнення до отримання максимального прибутку виробника неодмінно має супроводжуватися досягненням оптимального рівня витрат на виробництво виробів.

Як видно з представленої схеми формування прибутку виробника в координатах «якість – витрати», максимального прибутку відповідає цілком певний (але не мінімальний!) рівень якості  $Q_0$ . Таким чином, для забезпечення заданого рівня якості необхідно затрачати певний рівень ресурсів. Умова «витрачати, щоб отримувати більше» набуває сенсу і стимулу для постійного нарощування технологічного потенціалу. Однак цей стимул не може бути як завгодно високого рівня.

Такий підхід робить важливим постійний моніторинг технологічних досягнень.

Очевидно, що витрати на використання ресурсів можуть служити характеристикою граничних значень ефективності технологічних процесів. Виявити рівень таких витрат можна на основі аналізу існуючих процесів, що дозволяють сформулювати необхідні показники якості робочих поверхонь виробів.

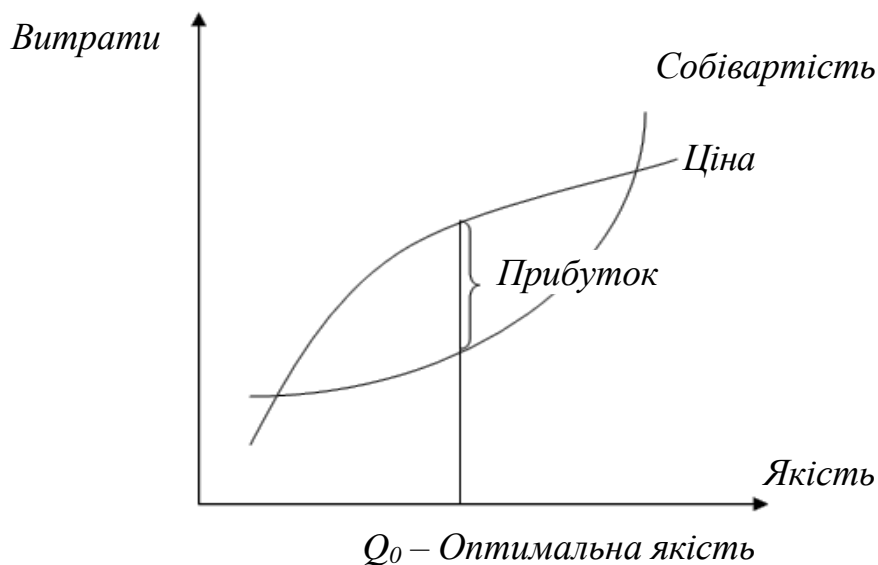


Рисунок – Формування заданих товарних властивостей виробу

На основі викладених принципів можна виділити ряд окремих особливостей спеціальних методів оброблення робочих поверхонь деталей машин, що формують конкурентні властивості виробу, і контролю якості виробів, заснованих, зокрема, на:

- застосуванні мало витратних способів впливу на робочу поверхню виробу з точки зору використання ресурсів (фізичних і хімічних ефектів і явищ, таких, наприклад, як резонанс, капілярний ефект і т. ін.);

- застосуванні локального перенесення енергії (скін-ефект, струми Фуко і т. ін.);

- використанні явищ, що дозволяють відмовитися від створення дорогих ізольованих просторів (шнур коронного розряду, розряд у технологічному середовищі тощо);

- діагностики процесів на основі власних акустичних відгуків виробу (таких, наприклад, як амплітудно-частотні спектри власних коливань контрольованих виробів).

Безумовно, перераховані напрями не є вичерпними, проте їх висвітлення в даній монографії, зроблене на основі результатів досліджень авторів, може представляти певний інтерес для технологів.

# РОЗДІЛ 1

## КЛАСИФІКАТОР СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

На сучасному етапі розвитку індустріального виробництва його рівень значною мірою визначається масштабами застосування інтегрованих технологій; вони показують, наскільки взаємопрониклими для ідей та їх реалізації є межі між конструкторським і технологічним відділами, між заготівельними і механоскладальними структурами, підрозділами збуту готової продукції. Інтегровані технології (ІТ) передбачають (і вирішують) суміщення (або максимальне зближення) у часі і просторі етапів розробки, конструювання і виготовлення нової моделі, виробу, деталі; значне скорочення часу (що отримало назву Rapid Prototyping – RP). На сучасному етапі гнучка реакція виробництва на вимоги, що швидко змінюються, вже не забезпечується тільки лише підвищенням продуктивності або мінімізацією вартості продукції, найбільш важливими стають фактор часу і якість, що потребує застосування новітніх технологій, здатних забезпечити скорочення часу розробки, освоєння виробництва і збуту нового виробу. Відомо, що в традиційному ланцюжку (зв'язці) створення продукту між виникненням ідеї та її реалізацією великий період часу припадає на виготовлення моделей головних зразків виробу. На основі ІТ завдання значного скорочення цього періоду вирішується найбільш успішно.

ІТ базуються на органічному поєднанні нових досягнень у різних галузях науки, техніки, технології, фізики металів, інформації, використання яких забезпечує швидке отримання нового продукту (виробу), з новим рівнем експлуатаційних, екологічних і естетичних властивостей, що забезпечують йому високу конкурентоспроможність.

У теперішній час відомі три напрямки створення ІТ, які базуються:

- на генеративних методах виготовлення. До генеративних відносять технології, засновані на виготовленні виробів не шляхом відділення обсягів (шарів), що складають припуск, а шляхом пошарового нарощування об'єктів до досягнення необхідних різних характеристик якості на макро-, мікро- і нанорівнях конструювання фізичної поверхні;
- на удосконалених традиційних методах оброблення (високошвидкісне і супершвидкісне різання, точне та ультрапрецизійне оброблення, нанотехнології та ін.);
- на комбінованих методах, що поєднують різні фізико-хімічні ефекти і способи оброблення (поєднання 1 і 2-го напрямів).

Комбіновані методи оброблення поєднують вплив декількох фізико-хімічних явищ. Прості методи оброблення, на відмінність від комбінованих, використовують один вид енергії з одним способом підведення її у зону різання.

Так, наприклад, широко поширене механічне оброблення застосовує механічну енергію при рівномірному відносному русі інструменту і заготовки.

Промислове освоєння комбінованих методів оброблення має три переваги. Вони забезпечують значне підвищення продуктивності і дозволяють при використанні однієї і тієї ж обробної системи, тобто на одному робочому місці, шляхом регулювання послідовно здійснювати як чорнову, так і чистову обробку.

Таким чином, освоєння комбінованих методів оброблення призводить до підвищення як продуктивності оброблення, так і якості деталей. Крім того, у ряді випадків освоєння комбінованих способів оброблення дозволяє досягти нових технічних ефектів, наприклад значно збільшити міцність, зносостійкість і досягнути інших експлуатаційних параметрів деталей.

Безперервно зростаючі вимоги до якості машин, що випускаються, пов'язані з необхідністю підвищення їх надійності, яка значною мірою визначається експлуатаційними властивостями окремих деталей.

Експлуатаційні властивості деталей машин істотно залежать від якості поверхневого шару, який визначається геометричними (макровідхилення, шорсткість) і фізико-механічними (мікротвердість, структура, залишкові напруження) параметрами. Всі ці параметри залежать від технології виготовлення деталей, однак традиційні методи оброблення частіше не дозволяють ефективно отримувати необхідні параметри якості поверхонь. Аналіз технологічних методів оброблення поверхонь деталей машин показує, що універсальних методів немає, кожен має свою конкретну сферу раціонального застосування, найчастіше досить вузьку. Технолог і конструктор стоять перед проблемою вибору високоефективного методу оброблення з великого числа можливих або створення на основі їх суміщення комбінованого методу оброблення деталі. На підприємствах машинобудування все ширше застосовуються комбіновані методи термомеханічного, електрофізичного, електрохімічного та іонно-променевого оброблення, в основу яких покладено використання високопродуктивних інструментів, а також різноманітних джерел висококонцентрованої енергії. У процесі такого оброблення поверхневий шар деталі поглинає в короткий час значну кількість енергії. Утворені в ньому нерівноважні дисипативні структури акумулюють надлишок енергії і мимовільно прагнуть до стану з найменшою вільною енергією. У поверхневому шарі відбуваються незворотні процеси спадковості і самоорганізації, які шляхом накладення та спільних дій потоків енергії ведуть до утворення комплексу структур з певними властивостями [1, 3].

Як стверджують автори, великі потенційні можливості поліпшення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин має електромеханічне оброблення (ЕМО) [2]. Едігаров В. Р., Кілунін І. Ю., Дегтяр В. В. беруть за основу обробку ЕМО для побудови схеми комбінованих методів оброблення (рис. 1.1).





6

Рисунок 1.1 – Класифікація методів електромеханічного оброблення (ЕМО) і комбінованих методів оброблення на основі ЕМО

Розвиваючи теорію структури комбінованих методів, автори пропонують наступну схему, ґрунтуючись на класифікації електромеханічних методів оброблення та комбінованих методів оброблення на основі ЕМО, яка може здійснюватися за рядом ознак (рис. 1.2), характерних для всіх комбінованих методів оброблення [2, 3]:

1. За кількістю і природою підводу видів енергії (енергетичних впливів)
2. За способом підведення енергії в зону оброблення
3. За характером розподілу енергетичних впливів у просторі і часі
4. За кількісними характеристиками енергетичних впливів

Таким чином, автори [2] пропонують класичний метод класифікації комбінованих методів оброблення, взявши за основу ЕМО. Однак комбіновані методи, засновані на ЕМО, вже дають обмеження за класифікацією.

Поряд з ЕМО існує велика кількість методів оброблення, впливу на об'єкти. Наприклад, вплив резонансних коливань на деталь у пружному або будь-якому іншому середовищі призводять до модифікації поверхневих шарів і об'єму деталі. Методів, які можуть бути взяті за основу, може бути велика кількість, і тоді потрібно буде для кожної «основи» створювати структурну таблицю, а це дуже велика робота і великий обсяг інформації.

Для комбінування інтегрованих методів оброблення в одну систему пропонується інша методика та інший підхід.

Якщо розглянути види оброблення деталей, починаючи від токарного оброблення і закінчуючи сучасними прогресивними методами нанесення надтонких плівок матеріалів для забезпечення необхідних параметрів деталей машин, то можна сказати, що всі процеси відбуваються за загальною схемою. Технологічна система – це поняття характерне для всіх методів оброблення, яке включає в себе такі елементи, як інструмент, вид впливу (яким чином відбувається вплив інструмента на деталь), середовище – в якому середовищі відбувається оброблення (повітряне, польове і т. ін.) і яке джерело додаткової енергії ми використовуємо (рис. 1.3).

Сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва і виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів чи операцій називається технологічною системою.

Традиційне поняття «технологічна система» включає в себе чотири складових – верстат, пристосування, інструмент і деталь, взаємний вплив цих складових визначають якість, точність і економічність оброблення деталей машин традиційними методами оброблення. Говорячи про інтегровані методи, складно характеризувати той чи інший метод класичними чотирма критеріями, тому з нашої точки зору інструмент, вид впливу, середовище і додаткове джерело енергії будуть тими критеріями, які дозволять повністю охарактеризувати й ідентифікувати будь-який вид комбінованого оброблення.

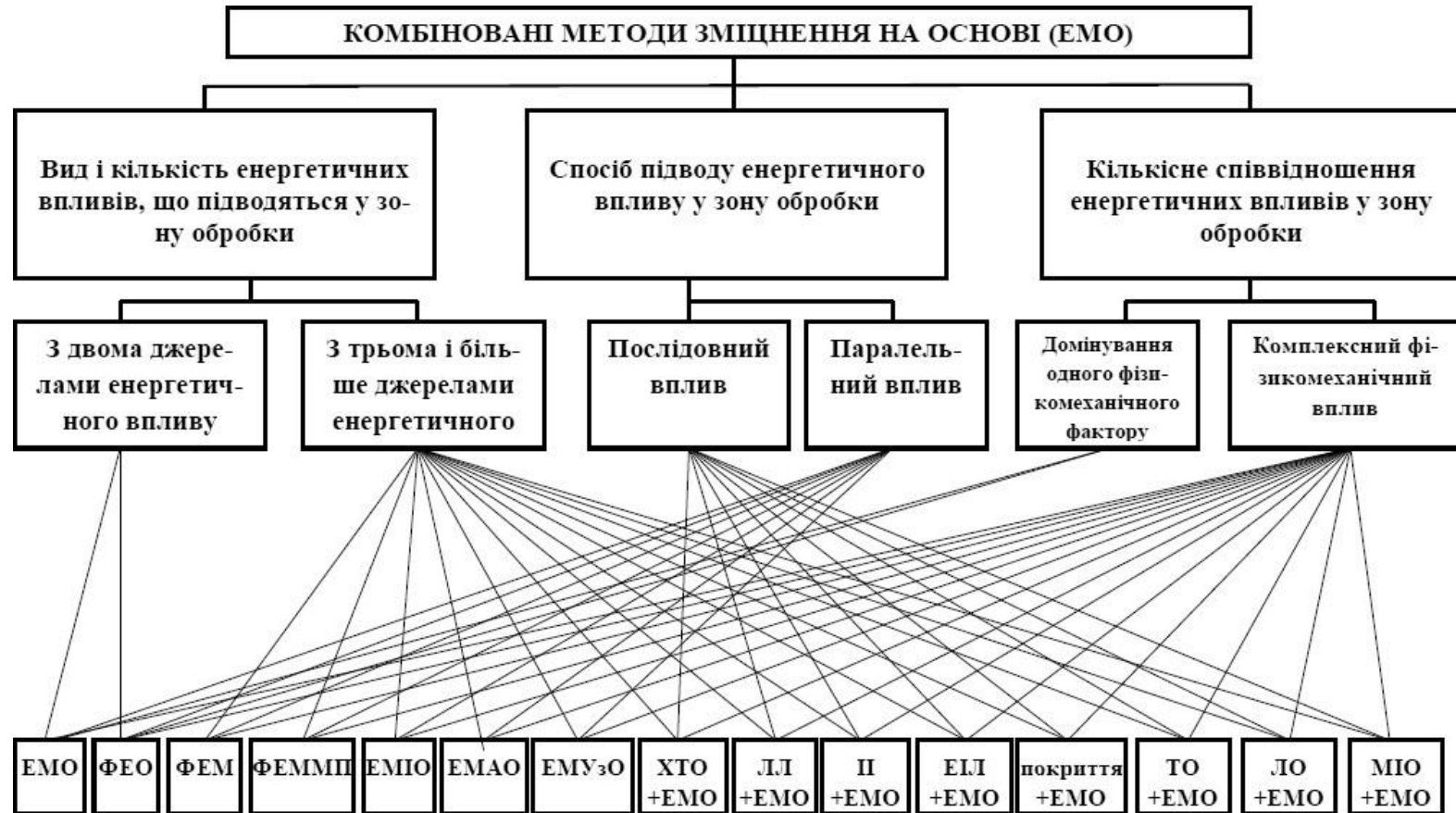
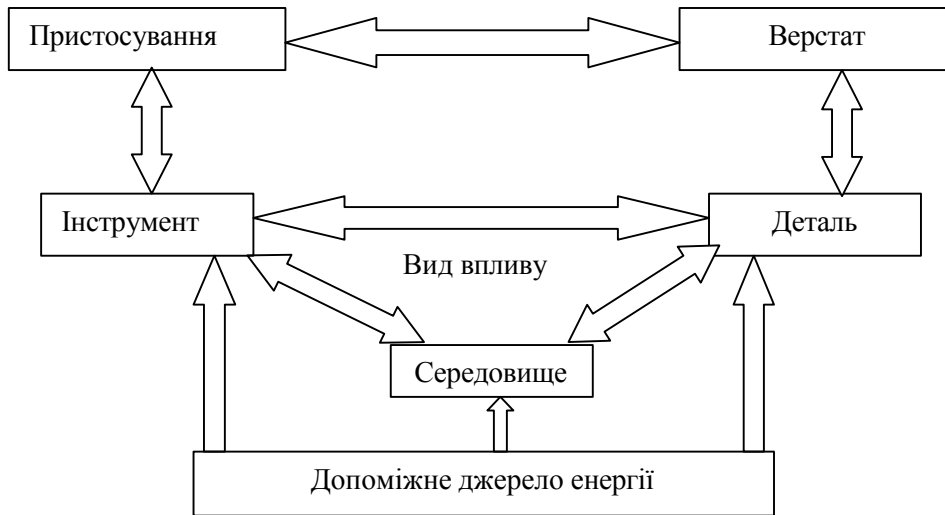


Рисунок 1.2 – Класифікація комбінованих методів електро-механічного зміцнення (ЕМЗ)



*Рисунок 1.3 – Технологічна система з точки зору методів підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин*

Розглянемо кожен фактор класифікатора окремо. Під чинником «інструмент» може розумітися об'єкт, за допомогою якого відбувається вплив на деталь, об'єкт, який виступає в ролі інструменту. Умовно «інструмент» можна розділити на інструмент, який у процесі впливу дозволяє знімати шар матеріалу і який у процесі оброблення впливає без зняття шару матеріалу. «Інструмент», який дозволяє знімати шар матеріалу, – є різвільним інструментом. «Інструмент», який в ході операції впливає на деталь без зняття шару матеріалу, можна представити у вигляді «електроду», «тіла», «поля». Тіло – будь-який об'єкт, який у процесі оброблення не знімає шар матеріалу, але впливає на деталь: вигладжувач, ПАР (поверхнево-активні речовини), МОР (мастильно-охолоджувальні речовини), обкатний ролик і т. д. Поле – польовий вплив на об'єкт вважатиметься інструментом тоді, коли його вплив буде модифікувати деталь; також може бути використане, як діагностичний чинник тих чи інших параметрів (рис. 1.4).

Другий критерій вибору комбінованого способу оброблення – це «вид впливу» інструменту. Його можна розбити на умовні види. «Механічний вплив» буде характеризуватися методами оброблення зі зняттям шару матеріалу і без зняття шару матеріалу. Для «польового» виду впливу як приклад можна розглянути інструмент – електрод, а видом впливу буде польовий – електричний. Польові види впливу поділяються на: магнітне поле, електричне поле, високочастотне поле, теплове поле. Ще до одного з видів впливу можна віднести «хвильовий», який, в свою чергу, буде характеризуватися двома підвидами – це високочастотні (звукові і т. д.) і низькочастотні хвилі (світлові і т. д.). Схема видів впливу представлена на рис. 1.5.

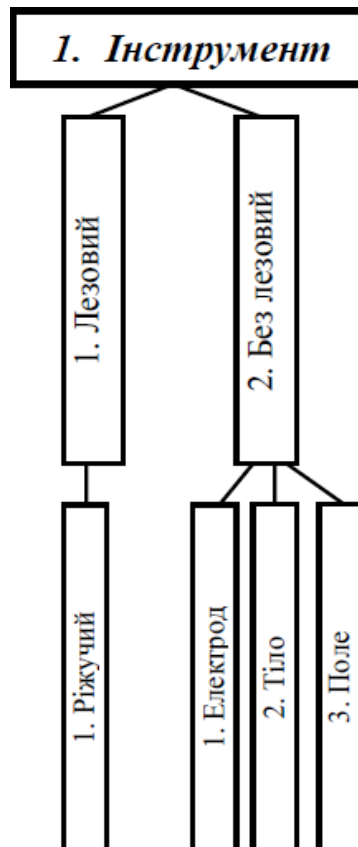


Рисунок 1.4 – Класифікація видів інструменту у класифікаторі

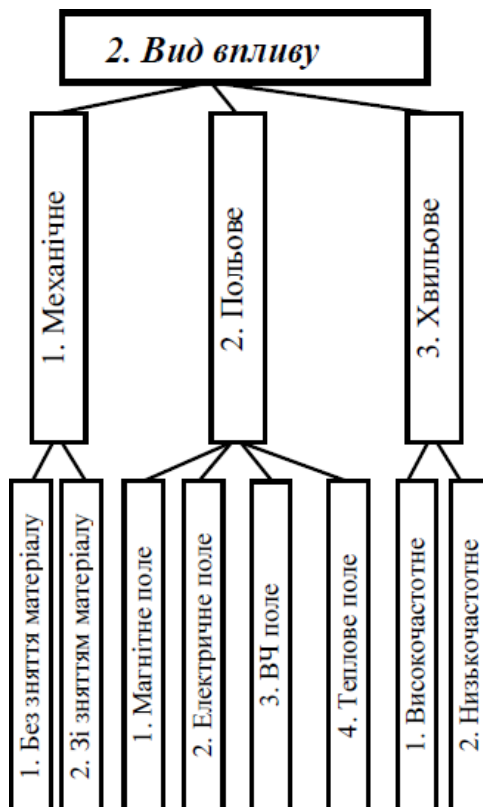
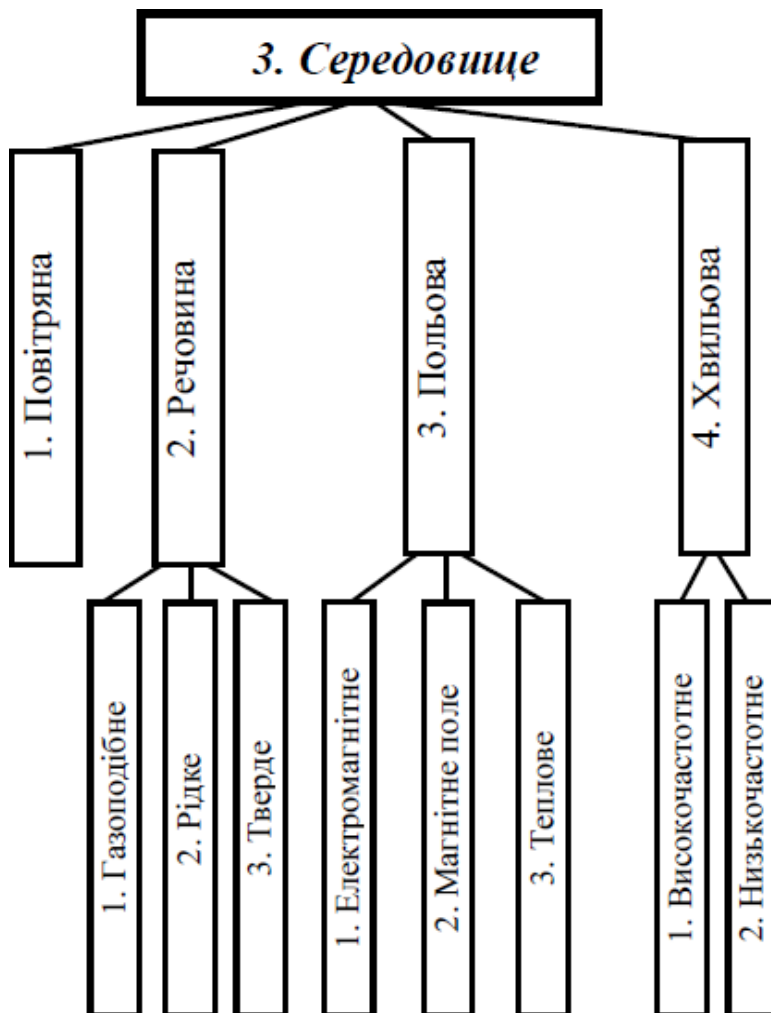


Рисунок 1.5 – Класифікація видів впливу

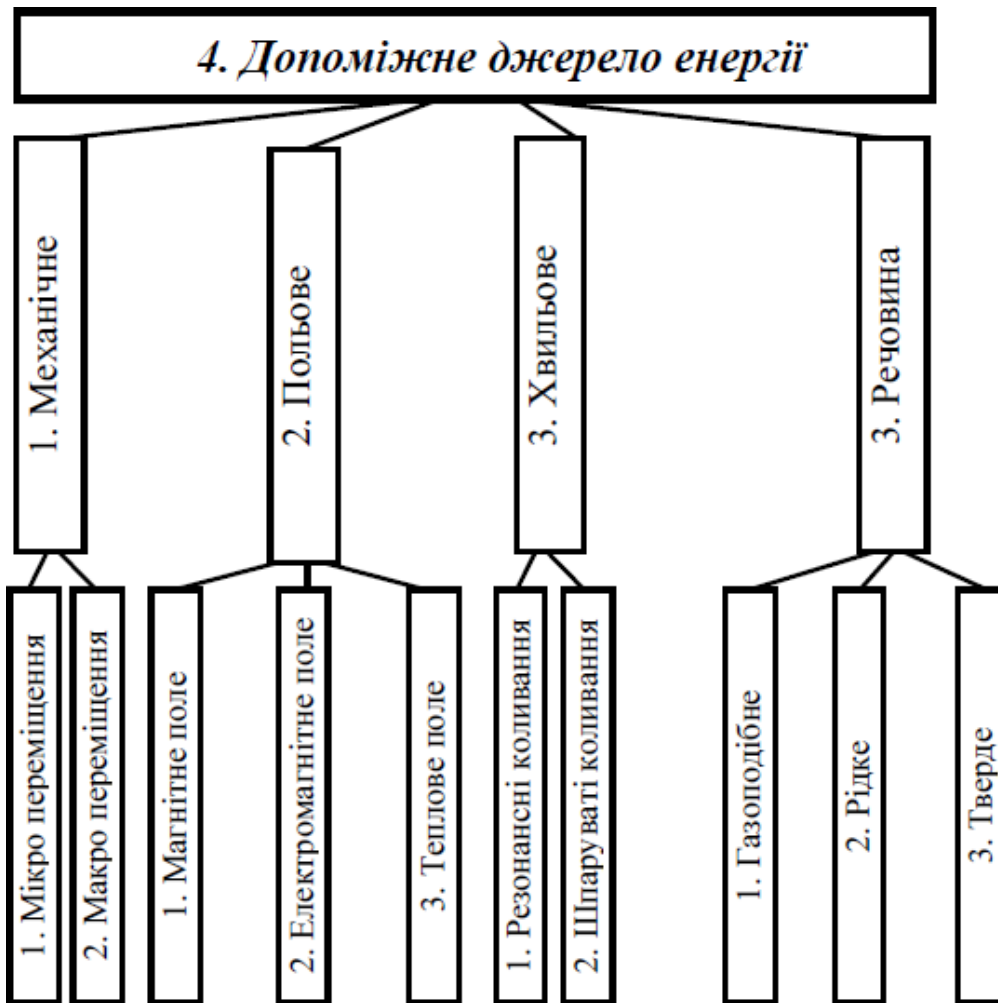
Маючи вже два фактори, можна скласти класифікацію методів оброблення з інструменту та видів впливу цього інструменту. Третім фактором буде «середовище», в якому відбувається безпосередньо оброблення. Середовище підрозділяється на 4 види – це повітряне, речовинне, польове, хвильове.

У свою чергу, види поділяються ще на підвиди, які представлені на рис. 1.6.



*Рисунок 1.6 – Класифікація виду середовища, в якому відбувається оброблення*

Ще одним фактором, який буде визначати вид комбінованого методу, є «додаткове джерело енергії». У свою чергу, цей фактор поділяється на підвиди: механічне, польове, хвильове, речовинне (рис. 1.7).



*Рисунок 1.7 – Класифікація додаткових джерел енергій, що підводяться*

Маючи чотири фактори впливу, які теж складають структурну групу, можна комбінувати, отримуючи інтегровані методи оброблення та діагностики деталей машин. Присвоївши кожному з факторів свій номер або позицію, можна кодувати будь-який метод комбінованого оброблення, який буде мати свій класифікаційний номер. Так як у нас є триступенева класифікація кожного фактора, то він буде кодуватися тризначним номером, і метод буде мати такий вигляд класифікації: XXX.XXX.XXX.XXX. Перший тризначний код буде характеризувати «інструмент», другий – «вид впливу», третій – «середовище» і четвертий – «додаткове джерело енергії». Результатом цієї класифікації може бути таблиця комбінованих методів, розподілених за видами впливу на об'єкт, або локальний вплив, або об'ємний вплив (рис. 1.8).

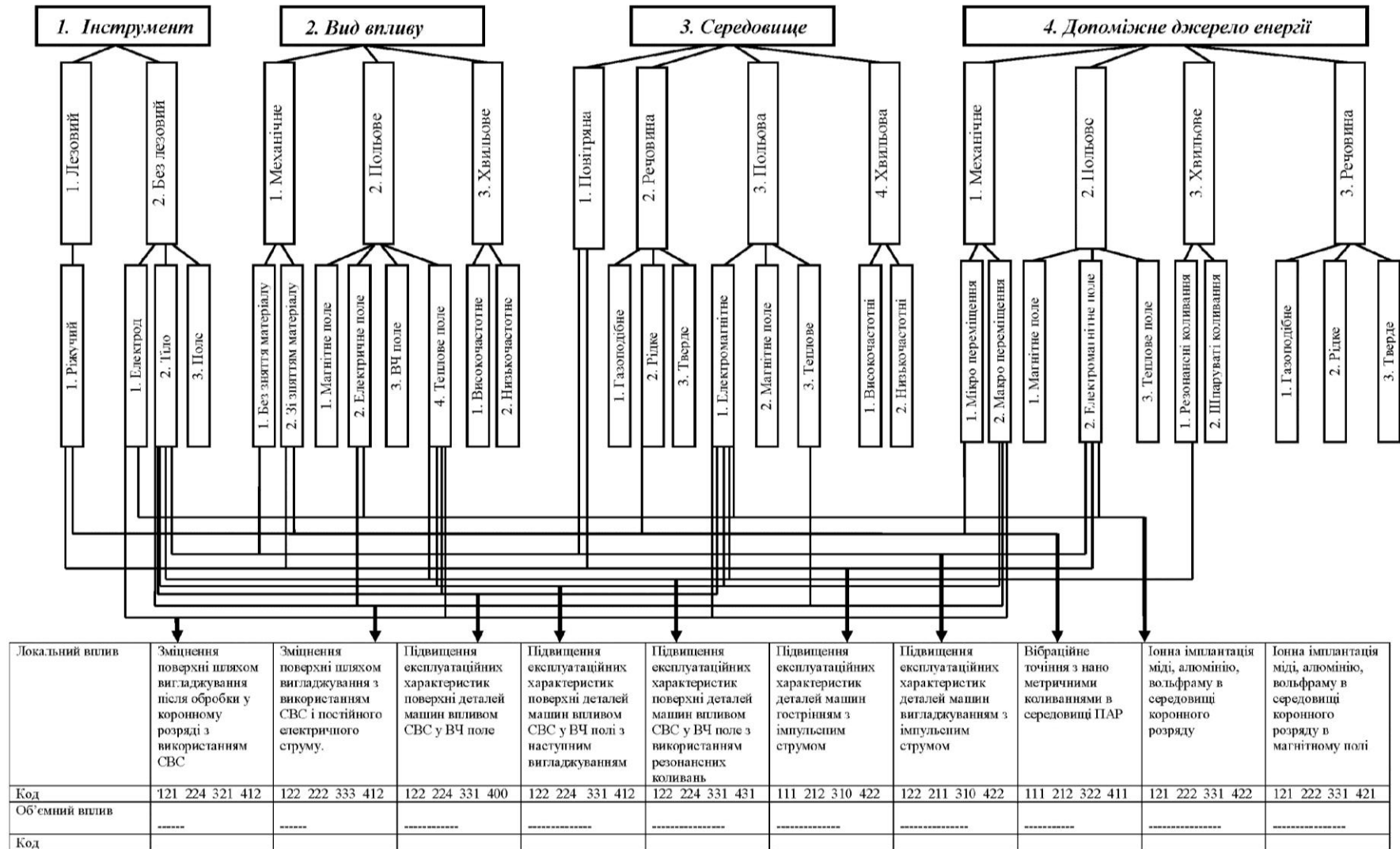


Рисунок 1.8 – Загальна схема класифікації комбінованих методів оброблення



Грунтуючись на чотирьох факторах технологічного середовища – інструмент, вид оброблення, середовище, додаткове джерело енергії – був розроблений класифікатор, який теоретично охоплює приблизно 10 000 методів комбінованого оброблення. Використання класифікатора дозволяє розробити ще невідомі комбіновані методи оброблення. На рисунку 1.9 частково представлені методи, які розроблялися в Науково-дослідній лабораторії спеціальних методів оброблення деталей важкого машинобудування і які будуть описані далі.

Розглянемо можливість використання даного класифікатора. Як вже говорилося, комбінуючи фактори технологічної системи, отримуємо комбіновані методи оброблення. Використовуючи кодування, легко можна створювати базу даних по кожному з методів. На прикладі зміни якогонебудь фактора можна зрозуміти принцип класифікації:

111 – інструмент (різальний лезовий);

111.212 – контактний вплив (класичний вид лезового оброблення);

111.212.310 – контактна дія в середовищі (лезове оброблення в середовищі повітря – класичне точіння);

111.212.310.411 – контактна дія в середовищі з додатковим джерелом енергії (комбінований метод лезового оброблення із застосуванням коливань малої амплітуди).

Розглянемо в якості шифру інструмент 111, що означає різальний інструмент, який обробляє матеріал зі зняттям стружки, вид впливу – механічний зі зняттям матеріалу – 212 і середовище повітряне – 310, а останній фактор ми розглянемо як змінну 111.212.310.4xx у вигляді таблиці. Змістом комірки таблиці може бути метод, який існує, – тоді він записується в комірку, або той метод, який не відомий зараз, – у комірці ставиться знак питання, і комірки, які взагалі не використовуються, залишаються порожніми (табл. 1.1). Змінюючи по порядку ту чи іншу змінну, отримуємо ряд можливих варіантів методів.

111.212.310.411

111.212.310.412

111.212.310.421

111.212.310.422

111.212.310.423

111.212.310.431

111.212.310.432

111.212.310.441

111.212.310.442

111.212.310.443 і т. д.

На рис. 1.9 представлена структурна схема лезового оброблення зі зняттям шару матеріалу в повітряному середовищі з використанням додаткового джерела енергії.

Розглянемо комбіновані методи, розроблені в лабораторії «Спеціальних методів оброблення деталей важкого машинобудування». Вибираємо інструмент «безлезовий» – 122, вид впливу «теплове поле» – 224, середовище «електричне поле» – 331 та вводимо змінну по додатковому джерелу енергії – 4xx.

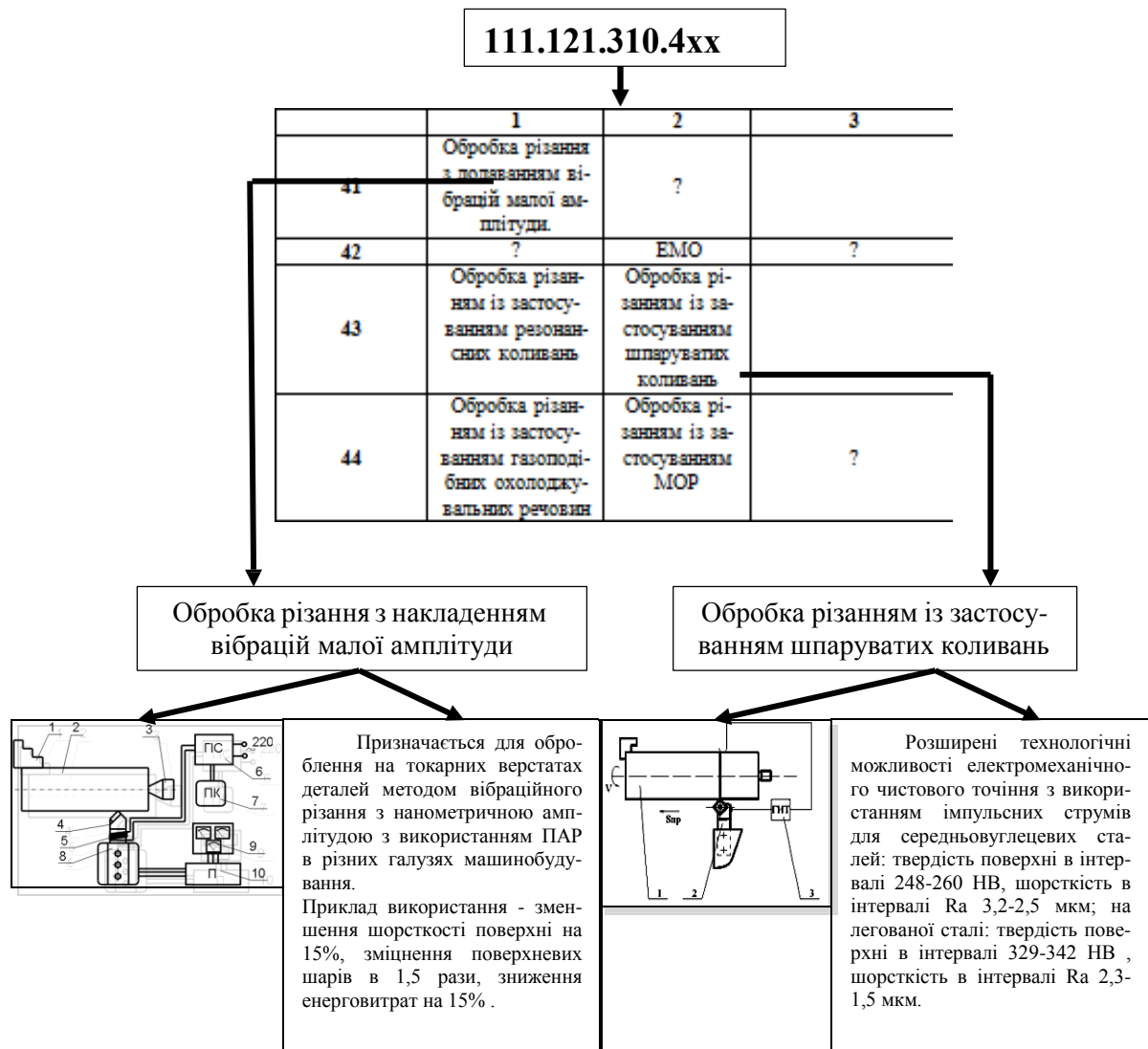
*Таблиця 1.1 – Класифікація методів комбінованого оброблення зі змінною у вигляді четвертого фактора технологічної системи*

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>41</b>	Оброблення різання з додаванням вібрацій малої амплітуди	?	
<b>42</b>	?	ЕМО	?
<b>43</b>	Оброблення різанням із застосуванням резонансних коливань	Оброблення різанням із застосуванням шпаруватих коливань	
<b>44</b>	Оброблення різанням із застосуванням газоподібних охолоджувальних речовин	Оброблення різанням із застосуванням МОР	?

Складаємо таблиці 1.2 і 1.3 з усіма можливими методами для даного кодування.

*Таблиця 1.2 – Класифікація методів комбінованого оброблення зі змінною у вигляді четвертого фактора технологічної системи*

	Без використання	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
41	Підвищення експлуатаційних характеристик деталей впливом СВС у ВЧ полі	?	Підвищення експлуатаційних характеристик деталей впливом СВС у ВЧ полі з наступним вигладжуванням	
42	?	?	?	?
43	?	Підвищення експлуатаційних характеристик деталей впливом СВС у ВЧ полі з використанням резонансних коливань	?	
44	?	?	?	?



*Рисунок 1.9 – Структурна схема класифікації методів комбінованого оброблення*

*Таблиця 1.3 – Класифікація методів комбінованого оброблення зі змінною у вигляді першого фактору технологічної системи 1xx.224.331.412*

	Без використання	1	2	3
11		?		
12	?	Зміцнення поверхні шляхом вигладжування після оброблення у коронному розряді з використанням СВС	Підвищення експлуатаційних характеристик деталей впливом СВС у ВЧ-полі з наступним вигладжуванням	?
13	?	?	?	?
14	?	?	?	?

## РОЗДІЛ 2

### ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ БАЗ ДАНИХ СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Експлуатаційні властивості деталей машин у багатьох випадках визначаються якістю поверхневого шару, який формується в результаті впливу в процесі оброблення різних факторів, а саме технологічної системи «верстат – інструмент – пристосування». Створення поліпшених експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин вимагає включення в технологічний процес відповідних операцій.

Застосування нових електрофізичних, електромеханічних і комбінованих методів оброблення вимагає розробки раціональної класифікації цих методів, яка дозволить правильно вибрати метод оброблення у виробничих умовах.

Методи, які стосуються фізики процесу, поділяються за чотирма основними ознаками: хімічна дія електричного струму, тепла, імпульсна механічна, комбінована. Хімічна дія електричного струму – електрохімічне оброблення (ЕХО) включає електрохімічну розмірну обробку (ЕХРО) і електрохімічний оздоблювальну обробку (ЕХОО). Теплова дія струму здійснюється при електроерозійній (ЕЕО), електроконтактній (ЕКО), плазмовій (ПЗО), світлопроменевої (СПО) і електронно-променевої (ЕПО) обробці, а імпульсна механічна – при ультразвукової (УЗО), ультразвукової оздоблювальній (УЗОО) і електрогідроімпульсній (ЕГІО) обробках.

Великий клас обробок утворюється при комбінованій дії: анодно-механічна (АМО), електрохімічна абразивна (ЕХАО), електрохімічна ультразвукова (ЕХУЗО), електроерозійна абразивна (ЕЕАО), магнітоабразивна (МАО), плазмово-механічна (ПМВ), електромеханічна (ЕМО), ультразвукова абразивна (УЗАО), ультразвукова механічна обробка різанням (УЗ-МОР), лазерно-механічна (ЛМО) [1].

Перспективними є методи, які не тільки впливають на мікрогеометрію оброблюваної поверхні, але і такі, які здійснюють зміни в структурі, напружено-деформованому стані, фазовому та хімічному складі поверхневого шару металу, а також забезпечують оптимальний розподіл фізико-механічних властивостей на зміцненій поверхні в залежності від конкретних умов експлуатації деталей. Значною мірою цим вимогам відповідають імпульсні технології.

В останні роки великий інтерес мають імпульсні технологічні методи оброблення деталей машин, за допомогою яких досягається підвищення зносостійкості, динамічної міцності виробу, корозійної стійкості, зменшення коефіцієнта тертя і, як наслідок, підвищення ККД машин, що випускаються, високий коефіцієнт використання необхідної для зміцнення енергії, простота керування енергетичними імпульсами, можливість автоматизації процесу оброблення, а також вони дозволяють підвищити продуктивність праці, підвищити ефективність використання ресурсів і зменшити

матеріаломісткість виробництва. Крім того, впровадження цих технологічних методів у промисловості замість традиційних (термообробка в печах, хіміко-термічних методів, гальванічного нанесення покриттів) зменшує або виключає екологічно шкідливі наслідки виробництва.

Суть більшості імпульсних технологічних процесів зміцнення полягає в імпульсному впливі (з великими швидкостями) на відносно невеликі обсяги металу потоками енергії високої інтенсивності (в деяких випадках з одночасною деформацією) і швидким охолодженням металу за рахунок відведення тепла вглиб матеріалу. Така дія дозволяє отримати необхідні фізико-механічні, корозійні та експлуатаційні характеристики робочих поверхонь деталей. Процес поверхневого зміцнення завжди супроводжується термодинамічними процесами і, як наслідок, структурними і фазовими перетвореннями в поверхневому шарі матеріалу.

Вибір і реалізація на виробництві методу оброблення поверхні, як для конструктора, так і для технолога, являють собою складну задачу. Для конструктора він ускладнюється тим, що необхідно врахувати безліч різних чинників: деталь повинна бути технологічною, а, отже, тут враховується швидкість технологічного освоєння та економічні аспекти; далі конструктору необхідно врахувати експлуатаційні умови – вплив навантажень (робочих напруг), корозійного середовища, ресурс, ремонтпридатність і т. д. аж до кінцевої стадії – утилізації машин.

Технолог, крім вибору методу, повинен визначити можливості реалізації на практиці методу оброблення, забезпечення надійності технології на всіх її етапах: від стадії проектування до стабільного функціонування технологічного обладнання, забезпечення заданих властивостей поверхонь, контроль якості і т. д. При цьому повинні бути забезпечені мінімальні енергетичні і трудовитрати, а також витрати матеріальних ресурсів.

Області раціонального застосування різних методів формування спеціальних властивостей поверхонь залежно від щільності енергії і часу взаємодії (часу реалізації процесу) наведено на рисунку 2.1.

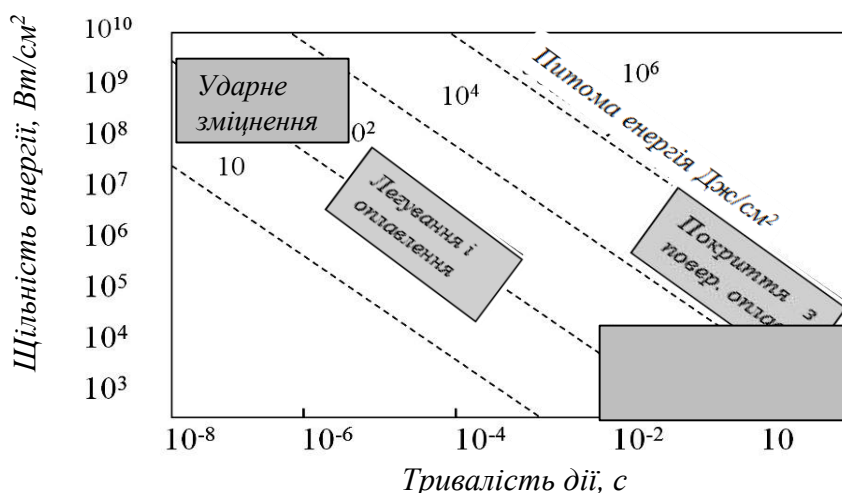


Рисунок 2.1 – Области раціонального застосування методів оброблення поверхонь залежно від щільності енергії і часу взаємодії

Технологічні методи, засновані на урахуванні питомої енергії, за величиною локального енергетичного впливу і тривалістю впливу істотно різняться між собою. Ці параметри заносяться в базу даних для виконання оптимізації і раціонального вибору при проектуванні технологічного процесу виготовлення відповідальних деталей.

Характеризуючи наведені дані, можна відзначити, що для деталей, експлуатованих при нормальних температурах і динамічних навантаженнях, високоефективними і універсальними методами, що підвищують втомну міцність, є методи поверхневого пластичного деформування (ППД) [4-5]. У разі додаткового впливу агресивного середовища здійснюється додаткове захисне покриття деталей (хромування, емальювання та ін.)

Нанесення на деталі металевих і неметалевих покриттів підвищує жаростійкість (окалиностійкість), зносостійкість, опір корозії їх поверхонь.

Дифузійне покриття, іонна імплантація і іонне осадження значно підвищують жароміцність і повзучість металів і сплавів.

Значне підвищення (у деяких випадках – у десятки разів) тепло- і корозійної стійкості досягається плазмовим напиленням (на повітрі й у вакуумі).

Для деталей, що працюють в умовах високих ударних навантажень, тертя і повітряного агресивного середовища та ін., може бути рекомендований перспективний метод детонаційного напилення.

Особливий інтерес для розширення області застосування електронно-променевої технології для поверхневого оброблення великогабаритних деталей машин і механізмів представляє новий напрямок в технології – ЕЛО-нагрів концентрованим електронним пучком в атмосфері. Для цієї мети використовуються потужні прискорювачі електронів, а електронний промінь виводиться за межі вакуумної камери через робоче вікно, закрите фольгою.

Ухвалення рішення про вибір методу оброблення з метою створення певних експлуатаційних властивостей деталей машин із певної множини варіантів призводить до безлічі фіналів, які оцінюються за комплексним критерієм. Відповідність прийнятого рішення даним критеріям оцінюється детермінованим зв'язком. Її можна оцінити критеріальною функцією або цільовою функцією. У загальному випадку цільовою функцією може бути мінімальна собівартість і максимальна продуктивність обраного методу оброблення.

Проблема полягає в наступному:

- 1) необхідно автоматизувати окремі етапи прийняття рішення;
- 2) необхідно зробити доступною для огляду безліч альтернатив;
- 3) при необхідності міняти набір цільових функцій.

Для вирішення поставлених проблем необхідно володіти інформаційною базою, складеною шляхом формалізації наявних даних про спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин.

Інформаційна база може складатися з бази даних і побудованої на її основі експертної системи.

Інформаційна база, в свою чергу, може бути структурним компонентом наступних систем:

- інформаційно-довідкової системи;
- інформаційно-керуючої системи (або автоматизованої системи управління);
- системи оброблення експериментальних даних.

База даних містить наступну інформацію:

- інформацію про технологічну систему, яка включає в себе технологічне обладнання, різальний інструмент, режими оброблення;
- інформацію про забезпечувані параметри поверхневого шару деталей;
- схему процесу оброблення.

Формування бази даних і її функціонування відбуваються в результаті «декомпозиції» об'єктів і систем технологічного середовища і «синтезу» цих об'єктів з окремих елементів.

Кожен об'єкт технологічного середовища являє собою систему, що складається з елементів, які також можуть бути деякими об'єктами. Кожен об'єкт має набір певних властивостей, так само, як система складається з деякої кількості елементів. Наприклад, технологічний процес складається з ряду технологічних операцій, які, в свою чергу, складаються з деяких переходів, і т. д. Причому для описання кожного з цих рівнів необхідне описання обладнання, інструменту, допоміжних засобів і т. ін. Всі ці об'єкти описуються за допомогою притаманних їм характеристик і властивостей. Причому кожен об'єкт можна «розбити» на ряд складових його елементів (об'єктів) та розглядати також і їхні властивості. Таке розбиття можна здійснювати неодноразово, отримуючи в результаті ієрархічну структуру якого-небудь об'єкта або технологічного середовища в цілому. Властивості об'єктів більш високого рівня складаються з властивостей об'єктів більш низького рівня, так само, як система складається з деяких елементів.

При формуванні бази даних про спеціальні методи оброблення відбувається «декомпозиція» складних об'єктів і систем, які поділяються на ряд складових елементів. Представлення кожного об'єкта в БД здійснюється за допомогою певного набору властивостей, який має цей об'єкт.

Об'єкт або система в базі даних – це певний набір яких-небудь характеристик. Тому для занесення такого об'єкта в базу даних він «розбивається» на окремі властивості або групи властивостей і характеристик, які йому властиві.

База даних містить безліч різних характеристик або груп характеристик, властивих різним об'єктам. При функціонуванні БД відбувається процес, зворотний декомпозиції – «синтез» об'єктів і систем з наявних у БД елементів – властивостей і характеристик. При цьому можуть «виходити» не лише ті об'єкти, які були піддані «декомпозиції» при занесенні їх в базу, а й інші об'єкти і системи, які утворилися при «додаванні» деяких властивостей. Таким чином, ми маємо можливість моделювати об'єкти і системи технологічного середовища, різні ситуації.

Об'єкти технологічного середовища відрізняються тим, що характеризуються великою кількістю параметрів. Наприклад, для операцій з використанням спеціальних методів оброблення – це характеристики одержуваного поверхневого шару, сформованого в результаті впливу різних джерел енергії. Такі ж приклади можна навести і для інших об'єктів технологічного середовища.

Технологічне середовище містить безліч об'єктів, кожен із яких має свої параметри. При цьому різні об'єкти можуть характеризуватися однаковими параметрами. Наприклад, всі об'єкти технологічного середовища характеризуються ціною. Ця характеристика є спільною. Різні методи зміцнення характеризуються глибиною і величиною зміцнення, величиною залишкових напружень та іншими загальними властивостями.

Таблиця бази даних матиме наступний вигляд (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Таблиця бази даних

Назва методу	Схема методу	Обладнання	Отримана твердість	Мікротвердість	Глибина зміцнення	Наклеп	Шорсткість	Точність	Режими оброблення	Марка сталі	Стан сталі	Оброблювані деталі	Примітки

Взагалі, будь-яка таблиця бази даних являє собою відношення між кількома множинами. Безліччю в нашому випадку є будь-яка властивість, параметр, характеристика об'єктів і систем. Множини  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , для яких визначена частка  $R$ , мають різні імена, звані атрибутами відношення. (У таблиці – атрибути відношення.) Сукупність всіляких значень безлічі  $A_i$  називається доменом атрибута  $A_i$ . Наведемо приклад. Є відношення (таблиця бази даних), яке в нашій базі називається «Спеціальні методи оброблення». Це відношення між множинами, які в нашому випадку являють собою характеристики спеціальних методів. Атрибути відношення в нашому випадку – це назви цих характеристик: «Назва методу», «Схема методу», «Обладнання», «Отримана твердість» та ін. Тоді, наприклад, доменом атрибута «Отримана твердість» може бути безліч невід'ємних чисел. Рядок БД називається кортежем відношення і являє собою послідовність значень атрибутів відношення. Записується як послідовність



елементів  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Не всяка послідовність значень атрибутів є рядком бази даних (кортежем відношення). Визначити послідовності, які є кортежем даного відношення і які не є ним, можна за допомогою двозначної функції – предиката.

Предикат – це функція виду  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , де  $x_1$  належить безлічі  $A_1$ ,  $x_2$  – множині  $A_2$  і т. д. Предикат – двозначна функція, що приймає значення «Істина» або «Помилка». Таким чином, предикат  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$  визначає безліч елементів виду  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , при підстановці яких предикат стає істинним висловлюванням. У нашому випадку така безліч елементів  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  визначає який-небудь рядок таблиці бази даних.

Створена база даних буде використана для пошуку оптимального рішення щодо застосування спеціального методу оброблення з внесених до бази даних методів за умовами, заданими цільовою функцією.

### РОЗДІЛ 3 ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

#### 3.1 Життєвий цикл виробу. Електроімпульсне вигладжування

Інформаційну модель взаємодії етапів життєвого циклу виробів машинобудування та їхній вплив на показники їх якості можна представити у вигляді двох геометричних спіралей, еквідистантно розташованих відносно одна одної, де зовнішня спіраль відображає взаємодії основних етапів ЖЦВ, а внутрішня – охоплює показники якості (рис. 3.1) [5].

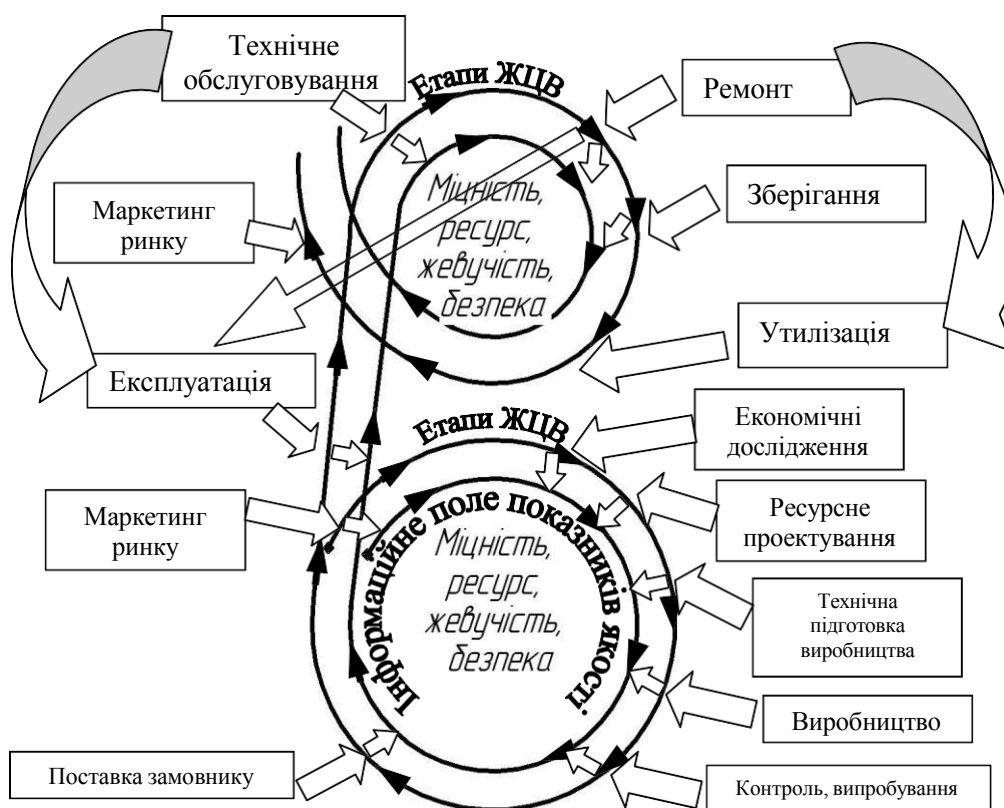


Рисунок 3.1 – Інформаційна модель життєвого циклу виробів машинобудування

Зовнішня геометрична спіраль починається з маркетингу ринку, економічних досліджень і наступних етапів: проектування; технологічної підготовки виробництва; безпосередньо виробництва; контролю; випробувань; поставки замовнику – це перший виток ЖЦВ. Кожен з перерахованих етапів вносить свій безпосередній внесок в інформаційне поле показників якості виробу машинобудування: конструкційну міцність, ресурс живучості і безпеку.

При цьому формується високий рівень показників якості. Інформаційне поле показників якості розташоване у внутрішньому контурі першого витка геометричної спіралі показників якості.

Другий виток зовнішньої геометричної спіралі взаємодії основних етапів ЖЦВ включає: експлуатацію, технічне обслуговування, відновлювальний ремонт, зберігання й утилізацію. Характер взаємодії етапів ЖЦВ на цьому витку спіралі представлений на рис. 3.1.

Інформаційне поле показників якості виробу машинобудування на другому витку внутрішньої спіралі також знаходиться у внутрішньому контурі цього витка і залежить від етапів ЖЦВ на другому витку внутрішньої геометричної спіралі.

Інформаційне поле показників якості на другому витку за площею менше інформаційного поля показників якості першого витка, що свідчить про зниження рівня показників якості в процесі тривалої експлуатації виробу машинобудування.

Наступний виток інформаційної геометричної спіралі прогресу показників якості виробу машинобудування починається також з маркетингу ринку, але після утилізації, і т. д.

Головне завдання – розширити інформаційне поле на другому витку, а, отже, підвищити рівень показників якості в процесі експлуатації виробу машинобудування.

Якість поверхні істотно впливає на експлуатаційні властивості деталей машин: зносостійкість, втомну міцність, стабільність посадок деталей (зазори, натяги), корозійну стійкість та ін.

У початковий період роботи сполучених поверхонь деталей машин, тобто в процесі їх підробітки, навіть при невеликому тиску можливий розрив масляної плівки в місцях виступаючих вершин шорсткостей; в результаті відбувається сухе тертя, пружне і пластичне деформування на цих ділянках, що призводить до інтенсивного зношування контактуючих поверхонь. Таким чином, після підробітки параметр шорсткості поверхні буде відрізнятися від отриманого після механічного оброблення [16].

На рисунку 3.2 наведена типова залежність зносу сполученої пари від часу її роботи. У цій залежності можна виділити дві критичні точки і три характерних ділянки, які відзначаються також і залежністю розмірного зносу різця від шляху різання. Точка А представляє кінець початкового зносу (припрацьовування) на ділянці I. Ділянка II характеризує нормальне, природне зношування, яке повільно наростає в процесі експлуатації. Після певного періоду роботи знос досягає таких розмірів, коли подальша експлуатація машини стає практично неможливою (точка Б). При продовженні роботи (ділянка III) знос зростає надзвичайно швидко. У точці Б необхідна зупинка машини і направлення її в ремонт.

На рис. 3.2 представлені залежності зносу від часу роботи сполученої пари з різними параметрами шорсткості. Робочі поверхні пари I мають менший параметр шорсткості. Початковий знос (припрацьовування) закінчується в точках  $t_1$  і  $t_2$ .

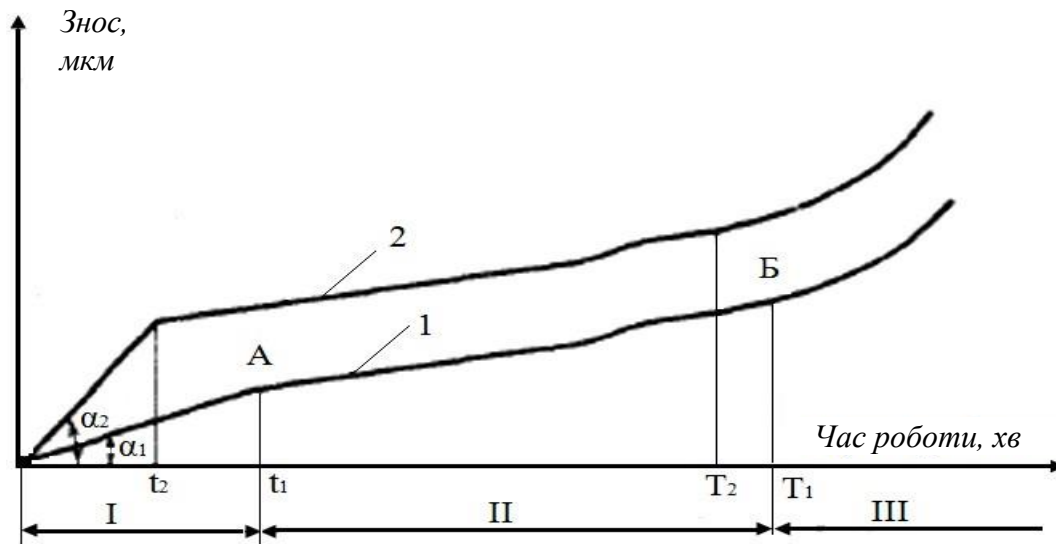


Рисунок 3.2 – Залежність зносу від часу роботи сполученої пари

Нормальний знос для всіх випадків приблизно можна характеризувати однаковим кутом нахилу прямих, які виражають залежності зносу від часу роботи сполученої пари, властиві цим матеріалам і умовам роботи. Таким чином, тривалість ( $T_1$  і  $T_2$ ) роботи третьових пар 1 і 2 до межі допустимого зносу буде різною в залежності від шорсткості поверхні.

Підвищення експлуатаційних властивостей деталей технологічними методами є найважливішим резервом зростання якості і конкурентоспроможності виробів сучасного виробництва. Основні експлуатаційні властивості деталей машин – зносостійкість, міцність, герметичність значною мірою залежать від стану їх поверхневого шару, що формується в процесі механічного оброблення. У зв'язку з цим досить актуальним завданням є дослідження технологічних можливостей методів механообробки у забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей машин.

Сьогодні є досить велика кількість інформації щодо технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару деталей машин [16, 17]. Однак відомості про кількісну оцінку досягнутого при цьому рівні експлуатаційних властивостей практично відсутні, що ускладнює обґрунтований вибір методів остаточного оброблення деталей.

В якості основного показника експлуатаційних властивостей – зносостійкості, міцності та герметичності в цій роботі прийнята інтенсивність зношування  $I$ , яка залежно від параметрів поверхневого шару може бути представлена наступним чином [16, 17]:

$$I = \frac{1,2\pi p^{7/6}}{n\lambda_m^{3/2} (H_\mu)^{2/3}} \cdot \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m}}$$

де  $p$  – тиск на майданчику контакту;

$n$  – кількість циклів впливу, який призводить до руйнування;  
 $\lambda$  – коефіцієнт, що враховує зміну даної кількості циклів у зв'язку з поверхневими залишковими напруженнями;  
 $t_m$  – відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії;  
 $H_\mu$  – поверхнева мікротвердість;  
 $\mu, E$  – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності матеріалу;  
 $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;  
 $S_m$  – середній крок нерівностей;  
 $W_z$  – параметр хвилястості;  
 $H_{max}$  – максимальне макровідхилення.

Розрахунок абсолютних значень зазначених показників на стадії виготовлення деталей дуже складний, тому що для його виконання разом з відомими параметрами поверхневого шару потрібні відомості про умови експлуатації деталей машин. У зв'язку з цим доцільно ввести критерії відносної зміни експлуатаційних властивостей, що представляють собою відношення абсолютних значень показників оцінюваних властивостей до деяких значень, прийнятих за базу. Для порівняльного аналізу методів лезового, алмазно-абразивного і електроімпульсного оброблення за базу приймаються значення показників експлуатаційних властивостей і параметрів поверхневого шару, що досягаються при лезовій обробці.

Коефіцієнт відносної зміни зносостійкості  $K_I$  при постійних умовах роботи та фізико-механічні властивості матеріалу мають наступний вигляд:

$$K_I = \left( \frac{R_{oa}}{R_a} \frac{W_{oz}}{W_z} \frac{H_{omax}}{H_{max}} \right)^{1/6} / \left( \frac{\lambda_o}{\lambda} \frac{t_{om}^3}{t_m^3} S_{om}^{1/2} \left( \frac{H_{o\mu}}{H_\mu} \right)^{2/3} \right),$$

де  $R_{oa} = R_o/R_a$ ;

$W_{oz} = W_o/W_z$ ;

$H_{omax} = H_o/H_{max}$ ;

$\lambda_o = \lambda_o/\lambda$ ;

$t_{om} = t_o/t_m$ ;

$S_{om} = S_o/S_m$ ;

$H_{o\mu} = H_o/H_\mu$  – відносні показники параметрів поверхневого шару, визначені у порівнянні з базовими.

Коефіцієнти відносної зміни експлуатаційних властивостей розраховуються на підставі зіставлення досягнутих параметрів поверхневого шару порівнюваних методів оброблення, досить широко представлених у довідково-нормативній літературі.

У таблиці 3.1 представлені параметри поверхневого шару при різних методах оброблення.

Таблиця 3.1 – Параметри поверхневого шару при різних методах оброблення

Метод оброблення	Параметри стану поверхневого шару							n
	Ra, мкм	Wz, мкм	Hmax, мкм	H <sub>μ</sub>	tm, %	Sm, мм	λ	
Точіння	0.8...2.5	1.6...4.0	40...100	20...40	45	0.08...0.16	1	6
Шліфування	0.2...1.25	0.5...4.0	10...40	10...30	50	0.025...0.1	0.9	7
Електроімпульсне вигладжування	0.05...1.0	0.4...2.5	6...40	20...70	60	0.025...0.2	1.1	5

На рис. 3.3 представлений графік двопараметричних залежностей коефіцієнта відносної зміни зносостійкості  $K_I$  від основних показників параметрів шорсткості – середнього арифметичного відхилення профілю  $Ra$  і середнього кроку нерівностей  $Sm$  при шліфуванні й електроімпульсному вигладжуванні.

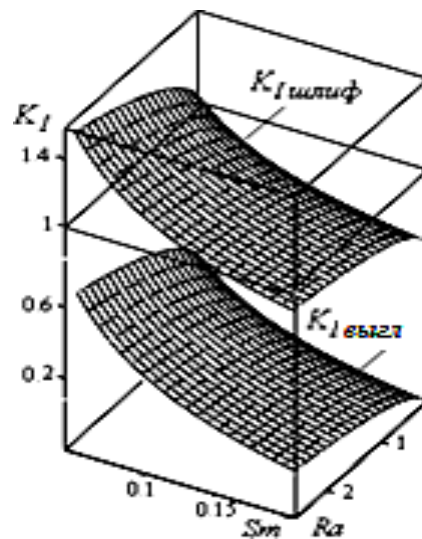


Рисунок 3.3 – Графік двопараметричних залежностей коефіцієнта відносної зміни зносостійкості  $K_I$  від середнього арифметичного відхилення профілю  $Ra$  та середнього кроку нерівностей  $Sm$

Отримані результати свідчать про суттєвий вплив параметрів шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  на зносостійкість деталей машин. Зменшення коефіцієнта відносної зміни зносостійкості  $K_I$  із збільшенням середнього кроку нерівностей  $Sm$  і зменшенням відхилення профілю  $Ra$  свідчить про зниження інтенсивності зношування, тобто підвищення зносостійкості. При використанні шліфування в якості остаточного методу оброблення практично у всьому діапазоні зміни параметрів шорсткості коефіцієнт  $K_{I\text{шлиф}} \geq 1$ , тобто зносостійкість деталей, до 1,5 разів нижча, ніж при обробці їх чистовим

точінням. Використання ж електроімпульсного оброблення дозволяє підвищити зносостійкість деталей в порівнянні з чистою лезовою обробкою в 2-5 разів.

Аналогічним є характер впливу параметрів шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  на міцність деталей машин. Однак ступінь впливу цих параметрів незначний. При використанні шліфування в якості остаточного методу оброблення міцність деталей знижується на 2...3 %. Застосування електроімпульсного вигладжування дозволяє підвищити міцність у порівнянні з чистою лезовою обробкою до 1,3 разів.

Застосування електроімпульсного вигладжування після чистового точіння дозволяє:

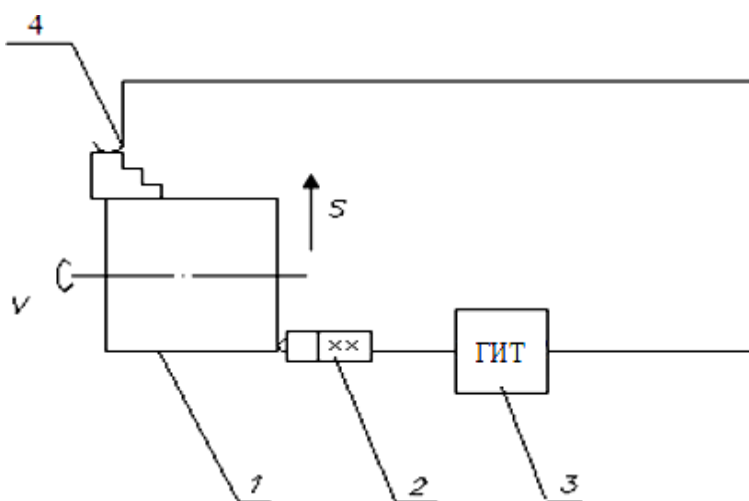
- поліпшити шорсткість;
- створити стискаючі напруги;
- підвищити твердість граничного шару;
- зменшити коливання шорсткості.

Методика досліджень ґрунтується на припущенні про підвищення мікротвердості і зниження показників шорсткості поверхонь деталі після електроімпульсного оброблення, при цьому:

- сила струму 100...200 А;
- швидкість оброблення 20...30 м/хв.;
- зусилля навантаження 200...400 Н.

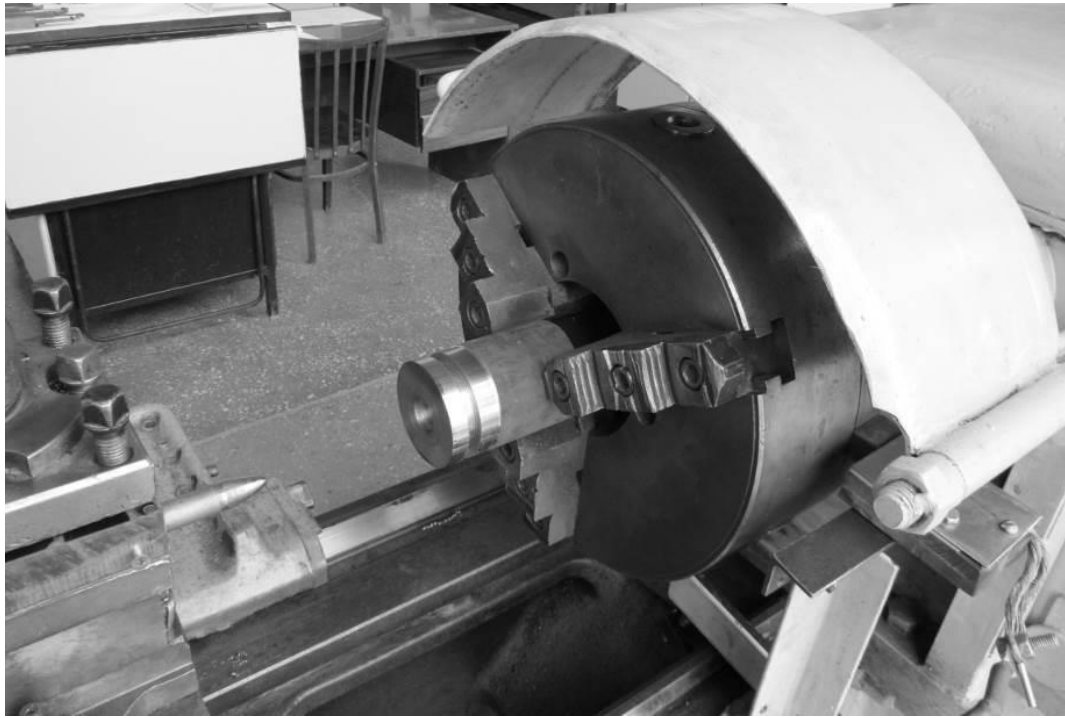
В експериментальну установку (рис. 3.4 і 3.5) входять: токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625; генератор імпульсних струмів (рис. 3.6); заготовка; вигладжувач зі сталі Р18 (рис. 3.7); щітка.

В якості заготовки для експерименту використовується прокат зі сталі 40Х довжиною 100 мм, діаметром 80 мм.



1 – заготовка; 2 – вигладжувач, 3 – генератор імпульсних струмів;  
4 – щітка

Рисунок 3.4 – Схема експериментальної установки



*Рисунок 3.5 – Видяд експериментальної установки*



*Рисунок 3.6 – Генератор імпульсних струмів*





*Рисунок 3.7 – Вигладжувач, закріпленій у різцетримачі*

При проведенні експерименту застосовуються такі режими оброблення:

- частота імпульсних струмів 50 Гц;
- шпаруватість 50 %.

Математичне моделювання впливу електроімпульсного вигладжування на якість і мікротвердість поверхневого шару деталей машин здійснюється за допомогою нейросітьового моделювання.

Штучні нейронні сіті (ШНС) дозволяють з успіхом вирішувати проблеми ідентифікації та управління, прогнозування, оптимізації. Нейронні сіті дозволяють реалізувати будь-який необхідний для процесу нелінійний алгоритм управління при неповному, неточному описі об'єкта управління (або навіть за відсутності опису), створювати м'яку адаптацію, що забезпечує стійкість системі при нестабільності параметрів.

ШНС можуть застосовуватися для різних завдань: апроксимація функцій, ідентифікація, прогнозування, управління, класифікація образів, оптимізація.

Безсумнівно, технічні засоби, побудовані на тих же принципах, що і біологічні нейронні сіті, мають ряд схожих властивостей. До таких властивостей відносяться:

- масовий паралелізм;
- розподілене представлення інформації і обчислення;
- здатність до навчання і здатність до узагальнення;
- адаптивність;
- властивість контекстуального оброблення інформації.

Можна виділити основні ідеї, що лежать в основі нейронних сітей і нейромоделювання:

– нейросіть відтворює структуру і властивості нервової системи живих організмів: нейронна сіть складається з великої кількості простих обчислювальних елементів (нейронів) і має більш складну поведінку в порівнянні з можливостями кожного окремого нейрона. Нейросіть отримує на вході набір вхідних сигналів і видає відповідну їм відповідь (вихідні сигнали нейросіті), що є вирішенням завдання;

– штучна нейросіть, як і природна біологічна нейронна мережа, може навчатися вирішенню завдань: нейросіть містить внутрішні адаптивні параметри нейронів і своєї структури, і змінюючи їх, може змінювати свою поведінку;

– місце програмування займає навчання, тренування нейронної сіті: для вирішення завдання не потрібно програмувати алгоритм;

– нейронна сіть навчається вирішенню завдання на деякому «підручнику» – наборі ситуацій, кожна з яких описує значення вхідних сигналів нейросіті, та потрібній для цих вхідних сигналів відповіді. «Підручник» задає набір еталонних ситуацій з відомими рішеннями, а нейронна сіть при навчанні сама знаходить залежності між вхідними сигналами і відповідями.

Основу кожної штучної нейронної сіті складають відносно прості, в більшості випадків – однотипні, елементи (комірки), що імітують роботу нейронів мозку.

Нейрон має групу синапсів – однонаправлених вхідних зв'язків, з'єднаних з виходами інших нейронів. Кожен синапс характеризується величиною синаптичного зв'язку або його вагою  $w_i$  (рис. 3.8).

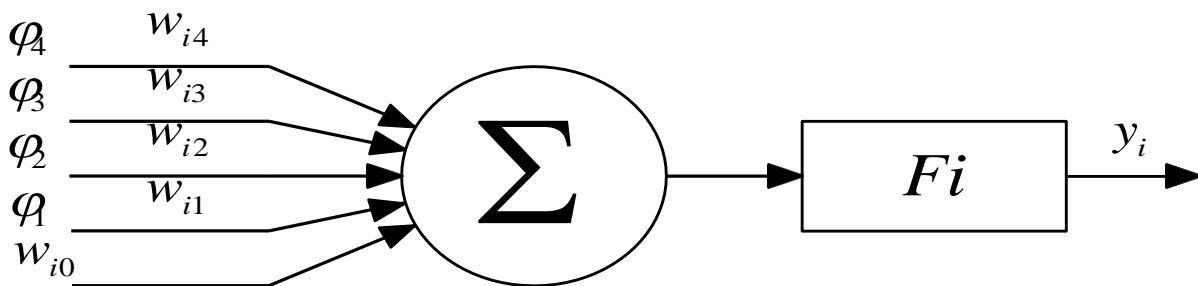


Рисунок 3.8 – Модель штучного нейрона

На вхід штучного нейрона надходить деяка безліч сигналів, кожен з яких є виходом іншого нейрона, або вхідним сигналом нейросітьової моделі. Кожен вхід множиться на відповідну вагу, аналогічну синаптичній силі біологічного нейрона. Вага визначає, наскільки відповідний вхід нейрона впливає на його стан. Всі добутки підсумовуються, визначаючи рівень активації нейрона  $s$ .

Стан нейрона визначається за формулою

$$S = \sum_{i=1}^n \varphi_i w_i,$$

де  $\varphi$  – численність сигналів, що надходять на вхід нейрона;  
 $w_i$  – вагові коефіцієнти нейрона.

Далі сигнал  $s$  перетворюється активаційною (передавальною) функцією нейрона  $F$  у вихідний сигнал  $y$ . Математично це можна виразити формулою

$$y = F\left(\sum_{i=1}^n w_i \varphi_i + w_0\right),$$

де  $n$  – розмірність вектора входів;

$w_0$  – «нейронний зсув», що вводиться для ініціалізації сіті; підключається до незмінного входу  $+1$ ;

$F$  – активаційна функція нейрона (рис. 3.9).

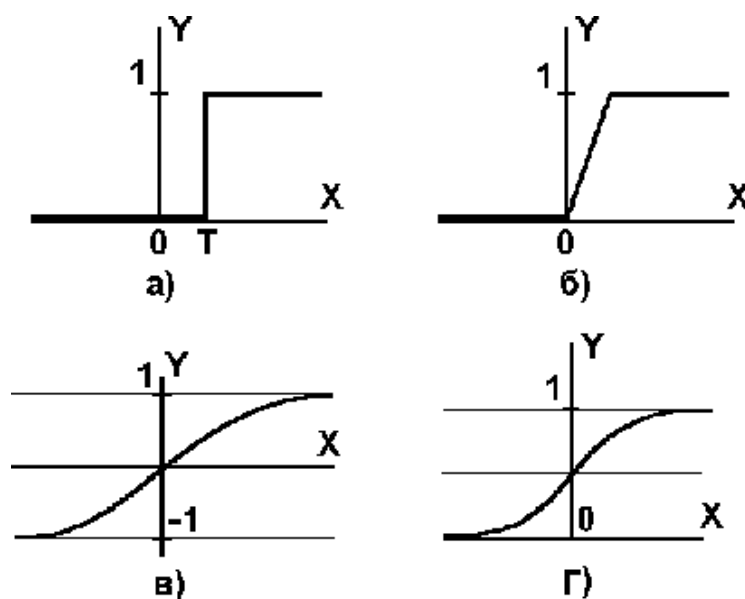


Рисунок 3.9 – Види активаційної функції

Нейрони можуть групуватися в сітьову структуру різним чином. Функціональні особливості нейронів і спосіб їх об'єднання в сітьову структуру визначає особливості нейросіті. Для вирішення завдань ідентифікації та управління найбільш адекватними є багат шарові нейронні сіті (БНС) прямої дії, або багат шарові персептрони. При проектуванні БНС нейрони об'єднують в шари, кожен з яких обробляє вектор сигналів від попереднього шару.

Активаційна функція може мати різний вигляд: пороговий (див. рис. 3.9, *a*), кусково-лінійний (рис. 3.9, *б*), сигмоїд (рис. 3.9, *в* і *г*).

Основне завдання нейросітьового моделювання результатів експериментальних досліджень – виявлення залежності впливу електроімпульсного вигладжування на збільшення мікротвердості і зменшення показників шорсткості поверхневих шарів деталей.

На основі використаного набору параметрів (тобто результатів експерименту з відомими вхідними та вихідними факторами) здійснено навчання нейронної сіті. Навчена нейронна сіть за допомогою відповідного математичного апарату набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними та вихідними факторами технічної системи і являє собою модель явища, за допомогою якої можна проводити цілеспрямовані дослідження.

Значення експериментальних даних (див. табл. 3.2) були використані в якості вихідних для побудови математичної моделі.

За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro 0.25 були побудовані математичні моделі на основі нейросітьового моделювання, де вхідними симптомами були сила струму ( $I$ ), швидкість оброблення ( $V$ ), зусилля навантаження ( $P$ ), а кінцевими синдромами – шорсткість ( $Ra$ ) і мікротвердість ( $HB$ ). В результаті нейросітьової апроксимації експериментальних даних отримано дві математичні моделі.

У результаті нейросітьового моделювання з'ясувалося, що на шорсткість найбільший вплив має параметр  $I$  (сила струму), меншою мірою – параметр  $V$  (швидкість оброблення) і параметр  $P$  (зусилля навантаження) – найменший вплив (рис. 3.10).

Сигнал	Значимість
$I$	1
$V$	0.7751423
$P$	0.7161173

Рисунок 3.10 – Значимість впливу вхідних параметрів на шорсткість

На мікротвердість найбільший вплив має параметр  $I$  (сила струму), меншою мірою – параметр  $P$  (зусилля навантаження) і параметр  $V$  (швидкість оброблення) – найменший вплив (рис. 3.11).

Сигнал	Значимість
$I$	1
$V$	0.8607598
$P$	0.95485

Рисунок 3.11 – Значимість впливу вхідних параметрів на мікротвердість

На підставі створених моделей отримані сітвові значення шорсткості і мікротвердості. Отже, математичні моделі адекватні, і процес промодельований успішно.

Аналіз зв'язків режимів оброблення з показниками якості та мікротвердості обробленої поверхні представляються у вигляді таблиць і графіків, побудованих на основі даних нейросітвового моделювання. Це дозволить визначити оптимальні режими оброблення, при яких досягається необхідна якість і мікротвердість обробленої поверхні.

При побудові графіків швидкість оброблення постійна і, відповідно, дорівнює 20 і 30 м/хв.

Найбільша мікротвердість  $HV = 5694,625$  МПа досягається при наступних режимах оброблення: сила струму  $I = 200$  А, швидкість оброблення  $V = 20$  м/хв, зусилля навантаження  $P = 400$  Н (рис. 3.12 і 3.13).

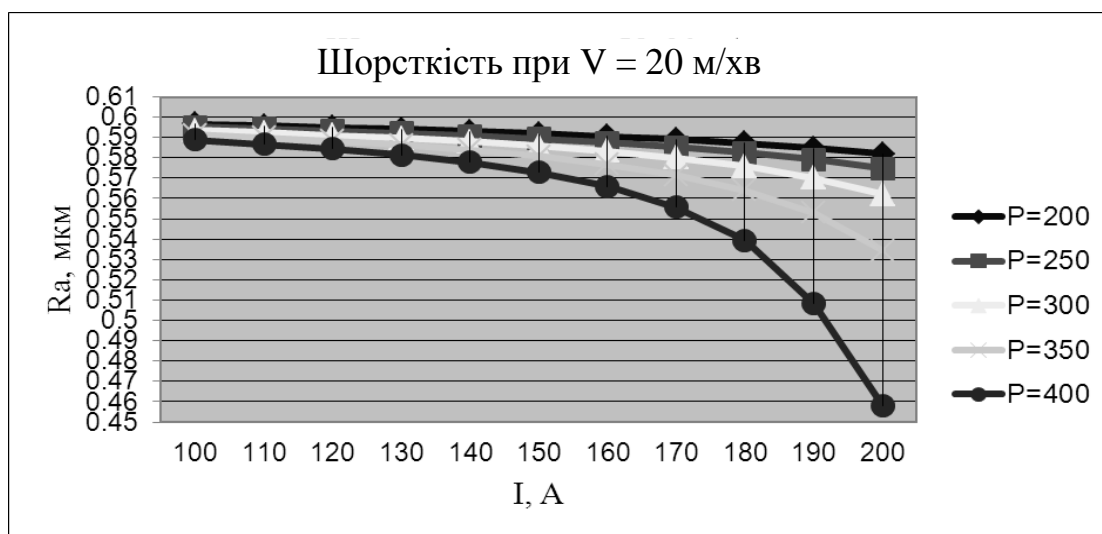


Рисунок 3.12 – Залежність шорсткості від сили струму і зусилля навантаження при швидкості оброблення  $V = 20$  м/хв

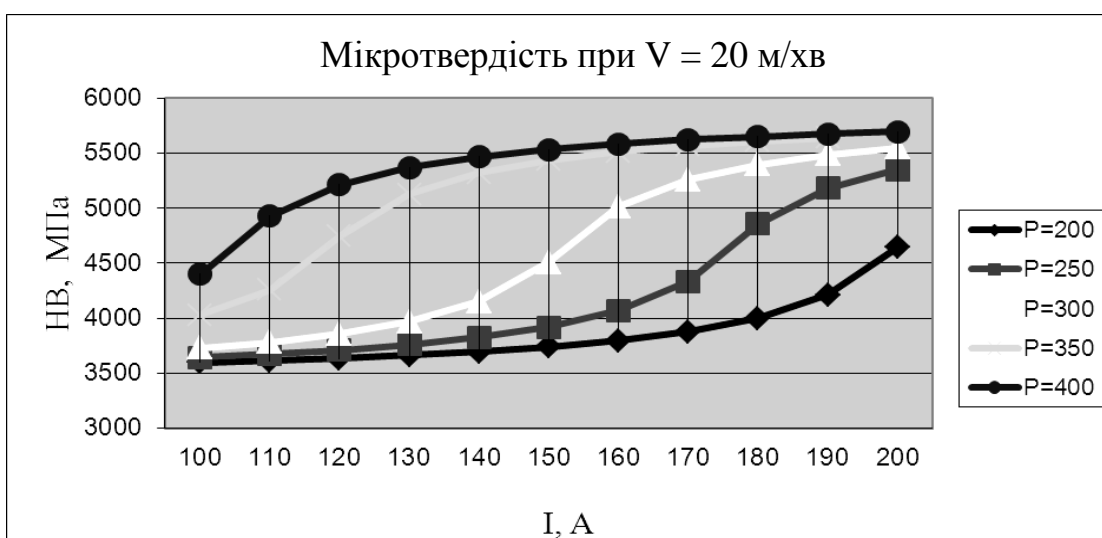


Рисунок 3.13 – Залежність мікротвердості від сили струму і зусилля навантаження при швидкості оброблення  $V = 20$  м/хв

З побудованих графічних залежностей (рис. 3.14 і 3.15) видно, що найменша шорсткість  $Ra = 0,390623$  мкм досягається при таких режимах оброблення: сила струму  $I = 200$  А, швидкість оброблення  $V = 30$  м/хв, зусилля навантаження  $P = 400$  Н.

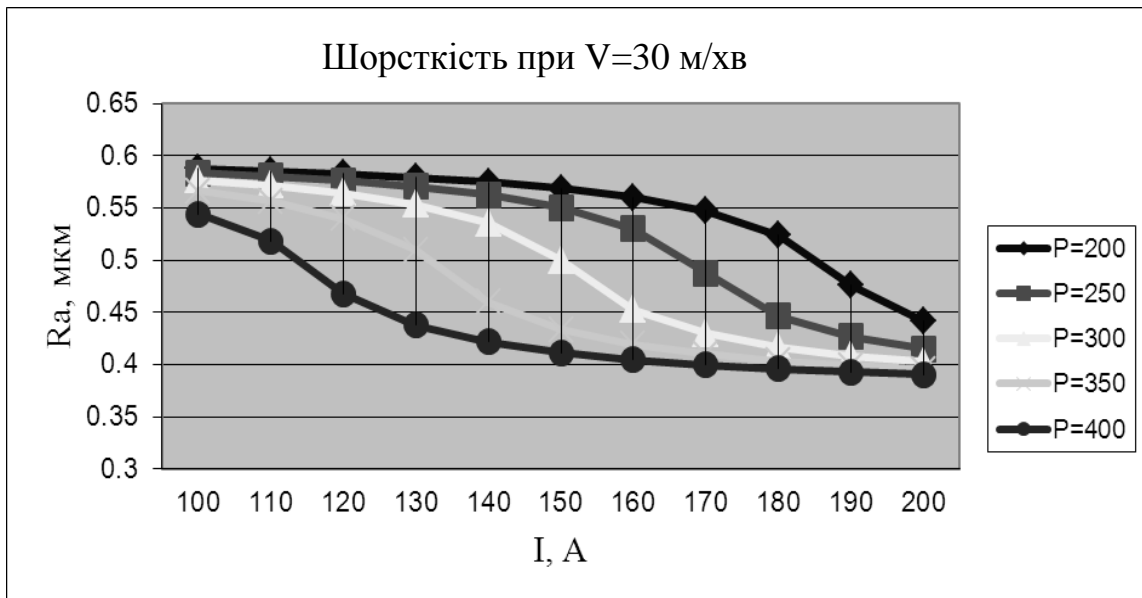


Рисунок 3.14 – Залежність шорсткості від сили струму і зусилля навантаження при швидкості оброблення  $V = 30$  м/хв

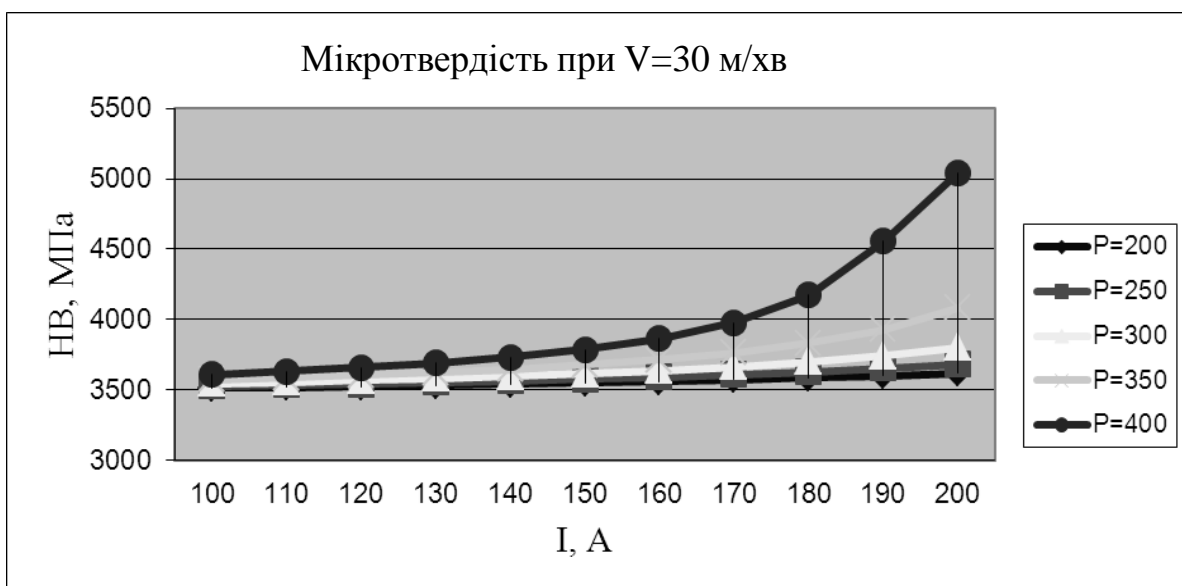


Рисунок 3.15 – Залежність мікротвердості від сили струму і зусилля навантаження при швидкості оброблення  $V = 30$  м/хв

Аналізуючи графічні залежності, можна зробити висновки, що застосування електроімпульсного вигладжування призводить до поліпшення якості та підвищення мікротвердості поверхневого шару деталей машин.

Таким чином, електроімпульсне вигладжування дозволяє замінити одразу дві технологічні операції – термообробки і шліфування, що і буде обрано за основу при проектуванні технологічних маршрутів механообробки деталей [18].

На основі виконаних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Розроблено методику проведення досліджень впливу технологічних режимів електроімпульсного вигладжування на показники якості та мікротвердості поверхневих шарів деталей машин, що дозволяє врахувати вплив сили струму, швидкості оброблення, зусилля навантаження на показники шорсткості і мікротвердості.

2. Експериментальні дослідження процесу електроімпульсного оброблення із застосуванням нейросітьових моделей дозволяють стверджувати, що впровадження в технологічний процес електроімпульсного оброблення дозволяє підвищити якість і мікротвердість, тим самим поліпшивши експлуатаційні властивості деталей машин. Крім того, впровадження в технологічний процес електроімпульсного оброблення дозволяє виключити дві технологічні операції – термообробки і шліфування.

3. Встановлено, що управління декількома технологічними параметрами оброблення дозволяє досягти максимального показника мікротвердості при мінімальних значеннях шорсткості поверхневого шару деталей машин.

### **3.2 Фрикційно-зміцнювальне оброблення**

Основним завданням і одночасно проблемою сучасного машинобудування є підвищення зносостійкості, а також надійності і довговічності деталей машин. Можна застосувати вдосконалені або нові, більш зносостійкі покриття, матеріали, поліпшені конструктивні особливості деталей, але при цьому використовуючи традиційні методи оброблення, що впливають на конструкцію і розміри деталі [19]. Ці методи забезпечують точність і якість поверхонь, але не забезпечують зміцнення і достатню твердість тертьових поверхонь деталей.

Найбільш актуальними та ефективними поряд з традиційно застосовуваними технологіями є нові або вдосконалені технології, які спрямовані на зміцнення матеріалів, зміну найважливіших експлуатаційних параметрів, які практично не впливають на конструкцію і розміри деталі. Сутністю цих методів є оброблення поверхонь концентрованими потоками енергії, які забезпечують підвищену інтенсивність технологічного впливу на матеріал, заснованих на використанні потужних джерел енергії.

До таких нових технологічних процесів відносять імпульсну технологію, здатну багаторазово підвищити продуктивність праці, ефективність використання ресурсів і знизити матеріаломісткість і енергоємність виробництва за рахунок раціонального розподілу зон технологічного впливу [19-21].

Головним завданням створення технологічних методів оброблення є не тільки утворення мікрорельєфів з високо однорідними за формою і розмірами, регулярно розташованими мікронерівностями, а і забезпечення структурних і фазових змін, напруженого стану і властивостей металу поверхневих шарів деталей.

Імпульсні методи характеризуються прикладенням високої питомої енергії, в результаті якого відбувається виділення великої кількості тепла, що призводить до високошвидкісного нагрівання локального мікрообсягу поверхні з одночасним його пластичним деформуванням і наступним інтенсивним охолодженням за рахунок відводу тепла з відносно тонких поверхневих шарів у глибину металу. У результаті такого потужного теплового «удару» на поверхні матеріалу формується зміцнений «білий шар» (БШ) – високоміцна структура дрібнодисперсного мартенситу [21, 19].

Вперше світла смужка була виявлена Кравз-Тарновським в 1928 році при випробуванні сталевих зразків на удар [21], хоча до цього відкриття вже існували такі структури – «корочки розпалу», які виникали в стволах артилерійських рушниць при стрільбі. Але активне вивчення почалося тільки в 30-і роки. Виявилось, що ця структура має підвищену твердість, різко відрізняється від структури вихідного металу, а також нетравимістю звичайними реактивами, залишаючись білою, що знайшло підтвердження в дослідах, проведених Бабеєм Ю.І. [22, 19].

Але протягом довгого часу не існувало єдиної думки щодо структури «білої зони». Наведемо деякі з гіпотез: 1) біла зона має структуру без голчастого мартенситу; 2) біла зона містить у структурі аустеніт; 3) біла зона являє собою структуру, збагачену в результаті дифузії або киснем, або азотом; 4) білу зону розглядають як структуру, збагачену карбідами за рахунок вуглецю мастила, що розкладається в процесі тертя, або як структуру, пов'язану з аустенітними перетвореннями в сталі внаслідок загартування поверхні тертя від високих температур та ін. Таким чином, метою робіт багатьох вчених була перевірка припущень, висловлених у роботах різних авторів з питання структури білої зони.

Предметом досліджень були зубці цементованих шестерень (сталь 18ХНВА). У процесі роботи шестернею (при важких умовах тертя) в результаті заїдання зв'язаних поверхонь утворювалися задери, на ділянках яких при металографічному дослідженні виявилася наявність білої зони. Подальші дослідження показали, що біла зона являє собою аустенітно-мартенситну структуру. Проведений теоретичний підрахунок температури поверхневих шарів, а також дані металографічного і рентгенівського дослідження вказали на наявність вторинного гарту в активному шарі робочої поверхні зубів. Отримані дані спростували думки про білу зону, як про зону, насичену киснем, азотом, або про зону, що має структуру без голчастого мартенситу. Фізичні властивості білої зони були пояснені наявністю квазі-рівноважного стану аустенітно-мартенситної структури, регулярного сполучення аустеніту і мартенситу. Висока твердість білої зони пояснюється викривленням решітки аустеніту через розходження параметра осередків



сполучення аустеніту і мартенситу, нетравимість – відсутністю електрохімічних мікропар, так як на міжфазних межах поверхнева енергія близька до нуля.

Предметом досліджень були зразки зі сталі марок 20, 45, 40Х, 08кп і сталі евтектоїдного складу. Випробування зразків проводилися на випробувальних машинах МІ і ТМІ. Отримані експериментальні дані свідчать про те, що в поверхневому шарі в процесі зношування сталі накопичується вуглець приблизно доевтектоїдного складу за рахунок цементиту внутрішніх шарів зразка і дифузії вуглецю. Паралельно з накопиченням вуглецю в поверхневому шарі під дією температури і внутрішніх напружень відбувається коагуляція окремих виділень цементиту. Температури і пластичні деформації, що розвиваються в поверхневому шарі, сприяють утворенню аустеніту, який в результаті швидкого охолодження в значній своїй частині переходить в мартенсит. Однак температури, що розвиваються на поверхні, і тривалість їх впливу недостатні для розчинення більших виділень цементиту. Тому структура світлої зони складається з мартенситу, залишкового аустеніту і легованого цементиту.

У зв'язку з тим, що ця структура має низку цінних фізико-механічних і електрохімічних властивостей, виникає питання про можливість використання властивостей цих шарів – твердості, травимості – для підвищення деяких експлуатаційних характеристик деталей машин.

У зв'язку з цим були розроблені методи отримання таких структур. З [19], новими методами імпульсного зміцнення є такі, як: спеціальне точіння, механо-ультразвукове, фрикційно-зміцнювальне, лазерне і електрогідроімпульсне оброблення.

Кожен з цих методів вивчався і розроблявся багатьма дослідниками, що дозволило відштовхуватися від вже отриманих результатів. Метод спеціального точіння, запропонований Бабієм Ю.І. [19], являє собою спеціальну механічну обробку, яка полягає в точінні за певних режимів і певної геометрії різального інструменту загартованих або загартованих і низьковідпущених сталей [22]. Була розроблена режимна частина (малі подачі і підвищені швидкості [19], проведені експерименти з підвищення температури в зоні різання при точінні та розроблено метод точіння з підведенням до різця і деталі, що обробляється, постійного електричного струму [23].

У [20, 21] розглядається електромеханічний спосіб зміцнення (ЕМЗ), заснований на поєднанні термічного і силового впливу на поверхневий шар деталі, що реалізується при пропусканні електричного струму великої щільності ( $10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>) і низької (2...6 В) напруги через зону контакту деталі й електрода-інструмента (ролика або пластини). Внаслідок чого виступаючі гребінці поверхні нагріваються і під тиском інструменту деформуються і згладжуються, а поверхневий шар металу зміцнюється. У [21] наводиться принципова схема ЕМО на токарно-гвинторізному верстаті, схема електромеханічного згладжування (ЕМЗ), загальний вигляд згладжувального інструменту, а також розроблені технології зміцнення деталей типу тіл обертання, гвинтових поверхонь, плоских деталей і зубчастих коліс.

У [24] розглядається електромеханічне оброблення (ЕМО) жорстко закріпленим інструментом або примусово обертовим роликом. Вказуються режими зміцнення середньовуглецевих конструкційних сталей, розрахункові формули для визначення необхідних параметрів, а також приклади конструкцій одиничних деформуючих інструментів. Наводиться ЕМО із застосуванням постійного струму, яке дозволяє створити однорідну структуру поверхневого шару металу на глибину до 0,15 мм з мікротвердістю в 1,3...1,6 рази вище початкової. Стійкість зміцнених різальних інструментів зростає в 1,7...2,1 рази. ЕМО застосовується для зміцнення поверхонь інструментів: фрез, свердел, розгорток, зенкерів та інших, виготовлених зі швидкорізальних і легованих інструментальних сталей, а також інструментів: пуансонів, матриць, ножів, виготовлених з високолегованих інструментальних сталей. Зміцненню піддають загартований, остаточно оброблений інструмент або деталь.

В теперішній час продовженням ЕМЗ є розвиток електроконтактного вигладжування [25] й алмазного вигладжування [24, 26].

Електроконтактне вигладжування з використанням постійного струму застосовують для зміцнення і поліпшення якості обробленої поверхні. Часто застосовують як фінішну обробку замість хонінгування, суперфінішування алмазного вигладжування, холодної обкатки роликками або кульками та ін. В якості інструменту використовується чашковий різець або ролик (діаметр не менше 60 мм, Ra 0,40...0,10 мкм) зі швидкорізальної сталі або твердого сплаву. Електроконтактне вигладжування з використанням постійного струму знижує шорсткість поверхні до Ra = 0,32...0,16 мкм (вихідна Ra = 2,5...1,25 мкм), збільшує мікротвердість поверхневого шару в 1,5...2 рази, а зносостійкість – в 2 і більше разів. Глибина зміцненого шару досягає 0,02...0,08 мм [25].

Алмазне вигладжування застосовують для зміцнення виробів з твердістю до HRC 65 спеціальними інструментами – вигладжувачами, оснащеними сфероїдальними, трапецієвидними або конусоподібними деформуючими елементами, виготовленими із синтетичних надтвердих матеріалів – карбонаду, гексаніта-Р, ельбора-Р та інших, рідше – з природних алмазів або твердих сплавів. Метод раціональний для оброблення сталевих загартованих або термічно не зміцнених деталей, з поверхневими покриттями і без них; деталей з кольорових металів, їхніх сплавів, високоміцних чавунів, а також інструменту [24].

В [26] наведені основні дані алмазного вигладжування: застосовувані інструменти, оснащення та обладнання; оптимальні режими оброблення; основні експлуатаційні властивості оброблених деталей. Наведено практичні рекомендації з ефективного використання даного методу, а також його особливості, переваги і недоліки.

Можливість поєднання спеціального точіння й електромеханічного згладжування, із застосуванням замість ролика (вигладжувача) різця з твердосплавною пластиною і використанням імпульсного струму, дозволяє отримати різновид ЕМЗ – електромеханічне чистове точіння (ЕМЧТ).

Були проведені дослідження впливу імпульсних струмів, які підводяться до зони різання, на якість поверхні й оброблюваність важкооброблюваних металів і сплавів в умовах токарного оброблення з використанням установки для дослідження спектру частот, випромінюваних в процесі різання, і установки для дослідження впливу імпульсних струмів на сили різання [27].

При дослідженні ЕМЧТ було запропоновано замінити змінний синусоїдальний струм (з частотою промислової мережі 50 Гц), що пропускається через зону різання, на імпульсний струм, уніполярний прямокутної форми, який регулюється за амплітудою, частотою і шпаруватістю [28]. Безпосередньо струм прямокутної форми дозволяє провести нагрівання фрагмента поверхні деталі з високою швидкістю до температур вище  $AC_3$  протягом мілісекунди. Разом з цим, виникає проблема максимального концентрування електричної енергії в місці термічної дії, що безпосередньо впливає на глибину зміцнюваного шару. Проблема вирішується ізолюванням передньої поверхні різця покриттям оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  від електричного контакту зі стружкою [28, 29]. У результаті прийняття такого рішення спостерігається зниження втрат енергії, що витрачається в процесі ЕМЧТ, і збільшення глибини зміцненого шару.

Із 70-х років значно розширилося застосування магнітно-імпульсного оброблення (МІО) для збільшення стійкості і надійності деталей машин. Активно МІО займався Малигін Б. В. [30], який розробив різні технології магнітного оброблення лезового інструменту, протяжок, симетричних деталей (валів, осей, підшипників, клапанів, штовхачів, штоків і т. д.), коліс, шестерень зубчастих передач, великогабаритних деталей, сталевих тросів, канатів, деталей черв'ячних і гвинтових передач і т. п. Сутність технології полягає у поміщенні деталі в порожнину соленоїда, де матеріал деталі внаслідок взаємної індукції впливає на магнітне поле установки; датчики аналізують параметри, і отримана інформація надходить на міні-комп'ютер, який складає програму для оброблення МІО. Далі розмагнічувальний пристрій включає в роботу електричну схему силової частини установки, і деталь починають обробляти імпульсним магнітним полем із заданими параметрами імпульсу. Були розроблені дослідно-промислові установки: ВНІ-МІ, ЕМО, МІУРІ, УМОІ-50, «Імпульс-3М», БУР-83, «Контакт» та ін., впроваджені у виробництво.

Сучасний розвиток поверхневого оброблення імпульсним магнітним полем (ІМП) представлено в [31]. У статті розглядається схема оброблення тіла обертання, встановленого в центрі, концентратором імпульсного магнітного поля (КІМП), встановленим в різцетримачі, на токарно-гвинторізному верстаті. Також наводиться структура КІМП і процеси, що протікають при обробці. Впровадження поверхневого оброблення ІМП дозволить зменшити залишкові напруги в деталях після механообробки, втомні напруги поверхонь деталей після експлуатації, а також підвищити втомну міцність.

Перспективним технологічним методом підвищення стійкості різального інструменту є оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП) інструментальних матеріалів, що містять феромагнітні компоненти. Підвищення стійкості досягається в результаті комплексу структурних змін магнітострикційної природи, при цьому імпульсний характер магнітного поля дозволяє легко здійснити інтенсивний енергетичний вплив на матеріал за допомогою енергетичних хвиль. Розроблено теоретичну модель впливу ОІМП на структуру і мікротвердість поверхневого шару твердого сплаву (на прикладі безвольфрамового твердого сплаву ТН-20). Наведено схему робото-технологічного комплексу ОІМП-РК1, призначеного для ОІМП різального інструменту: свердел, мітчиків, розверток, виготовлених зі швидкорізальної сталі. ОІМП забезпечує підвищення стійкості швидкорізального інструменту в 1,2...1,5 рази, тврдосплавного – в 1,5...2,2 рази.

З використанням механоультразвукового оброблення з'являється можливість збільшення енергії за рахунок введення в зону оброблення ультразвукових коливань, характерною особливістю яких є їх спрямованість і можливість фокусування енергії на невеликій площі різального інструменту, що забезпечує сприятливі енергетичні умови для створення БШ [22]. Безпосередньо Бабієм Ю.І. були розроблені методи механоультразвукового оброблення МУО-1 (подавання ультразвукових коливань в зону оброблення за допомогою вилкоподібного наконечника в радіальному напрямку) і МУО-2 (подавання ультразвукових коливань в зону оброблення за допомогою конусного наконечника по дотичній до оброблюваної деталі) і винайдені для них установки. А також було експериментально доведено, що ці методи дозволяють отримувати БШ практично на всіх гартованих сталях, високоміцних чавунах у будь-якому структурному стані; що ультразвук значно полегшує опір металу пластичній деформації, тому глибина деформованого шару (при обробці незагартованих сталей) різко зростає, і під БШ утворюється зміцнена зона, що найчастіше перевищує її в товщині [19, 22].

Сучасні досягнення розглянуті в статті [32], де описані технології та обладнання ультразвукового імпульсного зміцнювально-чистового оброблення. Розглянуто схему ультразвукової імпульсного зміцнювально-чистового оброблення зовнішньої поверхні тіл обертання на токарному верстаті із застосуванням комплексу ультразвукового обладнання ІЛ-4, розробки ТОВ «Ультразвукова техніка – ІНЛАБ». Ультразвуковий інструмент не тільки дозволяє обробляти деталі циліндричної форми, але і допускає можливість оброблення деталей з ексцентриситетом до міліметра. Наведено також схему установки для оброблення внутрішньої поверхні тіл обертання, отворів на мінімальний діаметр 60 мм і максимальну глибину проходу 240 мм на токарному верстаті. Також розроблено інструмент для установки на фрезерний верстат з метою оброблення плоских поверхонь. Результатом застосування ультразвукового імпульсного зміцнювального оброблення є збільшення мікротвердості на 30...300 %; зниження шорсткості з 5 до 9...14 класу; підвищення межі контактної витривалості на 10...20 %; підвищення корозійної стійкості обробленої поверхні; за рахунок регулярного

мікрорельєфу підвищується властивість утримання обробленою поверхнею масел і мастил, знижується зношення при зворотно-поступальному характеру руху одна щодо одної сполучених деталей.

Серед ультразвукових технологій виділяють: ультразвукове різання, ультразвукову зміцнювально-чистову обробку, ультразвукову оздоблювальну обробку.

Ультразвукове точіння лезовим інструментом відносять до ультразвукового різання. Ультразвукові коливання, які передаються різальному інструменту, впливають на якість поверхні, точність оброблення, силу різання, коефіцієнт усадки стружки і т. д. Ультразвукове оброблення знайшло широке застосування при різанні з тонкими стружками, особливо при обробленні внутрішніх різьблень малого (1...6 мм) і середнього (10...30 мм) діаметрів в жароміцних і титанових сплавах. При наданні мітчику коливань з частотою  $f = 18...44$  кГц і амплітудою коливань  $\xi_m = 3...5$  мкм крутний момент і осьова сила знижуються на 25...30 %, поліпшується якість різьблення. Коливання не погіршують точності нарізі.

Ультразвукове зміцнювально-чистове оброблення ефективно для деталей з термооброблених сталей, інструментів і деталей з твердих сплавів, деталей малої жорсткості і з тонкими покриттями. До цього оброблення відносять ультразвукове алмазне вигладжування, яке дозволяє знизити висоту мікронерівностей у 8...10 разів, отримати високу поверхневу мікротвердість, створити в поверхневому шарі залишкові стискувальні напруги. У результаті оброблення відбувається перерозподіл залишкових напружень по всій деталі, знижуються післязварювальні напруги і зменшується концентрація напружень біля пір, мікротріщин і т. д., що призводить до підвищення опору, втоми і корозійної стійкості. Ультразвукове вигладжування алмазним інструментом у порівнянні з поліруванням забезпечує підвищення межі витривалості деталей з аустенітних і мартенситних сталей на 36...44 %, зносостійкість їх зростає в 1,5 рази.

До ультразвукового оздоблювального оброблення відносять ультразвукове суперфінішування, ультразвукове хонінгування та інші.

Ультразвукове суперфінішування – операція оброблення поверхні металів абразивними або алмазними брусками, яким окрім звичайного зворотно-поступального переміщення надається коливальний рух з ультразвуковою частотою по нормалі до оброблюваної поверхні. При використанні брусків середньої твердості з дрібним зерном досягається шорсткість поверхні  $Ra = 0,04...0,08$  мкм при досить високій продуктивності. Після видалення припуску поверхня піддається «вигладжуванню» без ультразвуку.

При ультразвуковому хонінгуванні накладення на алмазний брусок хона ультразвукових коливань сприяє значному підвищенню продуктивності процесу, поліпшенню якості поверхні. При ультразвуковому хонінгуванні заготовки зі сталі 45 чотирма брусками АСВ 100/80 овальність отвору знижена в 4,5 рази. Шорсткість поверхні відповідає  $Ra = 0,63$  мкм при початковій шорсткості  $Ra = 1,25...2,5$  мкм.

До нової сучасної технології оброблення ультразвуком відноситься безабразивна ультразвукова фінішна обробка металів (БУФО). БУФО піддаються деталі зі сталі, алюмінію, міді та інших кольорових металів. Застосовується дана технологія до різних конструктивних форм поверхонь металів: циліндричних, плоских, зовнішніх і внутрішніх, торцевих, конічних і кульових; до різних виступів і западин; прямокутних і радіусних канавок. Технологія БУФО дозволяє за один фінішний прохід випромінювача ультразвуку при початковій шорсткості  $R_a = 6,3$  мкм отримати поверхню з  $R_a = 0,1$  мкм; за умови оброблення загартованих сталей і підшліфування їх до 7...8 класу – 12...13 класу шорсткості. Дозволяє обробити зовнішні поверхні різних конструктивних форм; внутрішні діаметри до 400 і понад 400 мм; отвори діаметром понад 70 мм на глибину до 1500 мм. Оброблення проводиться за допомогою пристроїв для безабразивного фінішного оброблення – комплектів БУФО, які легко встановлюються на будь-які верстати: токарні, стругальні, фрезерні, плоскошліфувальні та інші, призначені для металооброблення.

Фрикційно-зміцнювальне оброблення (ФРЗО) засноване на збільшенні тертя між оброблюваною деталлю й інструментом, що забезпечує необхідні тиск і температуру для утворення БШ. Бабій Ю. І. розробив методи ФРЗО, засновані на принципі шліфувальних операцій, провів різні дослідження, визначив оптимальні режими оброблення і вивів закономірності. ФРЗО-1 полягає в тому, що замість абразивного круга на шпинделі круглошліфувального верстата моделі 3Б12 встановлюється металевий диск ( $D = 320...350$  мм,  $B = 8...10$  мм), а оброблення аналогічне шліфуванню, тільки в зону контакту деталь-інструмент вводиться масло АС-8, розбавлене гасом для більшої рідкотекучості. Оброблення ФРЗО-2 здійснювали на токарно-гвинторізних верстатах 1К62 або 165 за допомогою спеціального пристосування, яке встановлюється на супорті верстата або в різцетримачі, як в горизонтальному, так і у вертикальному положенні (більш раціонально, оскільки дозволяє з однієї установки робити точіння і зміцнення). Обробку ФРЗО-3 проводили на заточувальному верстаті моделі 3А64М також з використанням фортуни, тільки деталі зміцнюються торцевою поверхнею круга, а також на плоскошліфувальному верстаті моделі 3510 при зміцненні напрямних станин (СЧ 21-40) фрезерного верстата 6520Ф3 або плоских зразків. Отже, шліци, зуби муфт можна зміцнювати на шліцешліфувальних і заточувальних верстатах, зміцнення плоских деталей робити на плоскошліфувальних, стругальних, фрезерних та інших верстатах, як ободом, так і торцевою частиною диска. Обробку ФРЗО-2 здійснювали на токарно-гвинторізних верстатах, монтуючи пристосування з вилкоподібним зміцнювачем у різцетримачі. Притискання вилки, армованої твердим сплавом, здійснювалося через пружину, встановлену у спрямовуючий циліндр. При зміцненні маложорстких тонких деталей використовували лунет. Характерною особливістю ФРЗО є можливість зміцнення не тільки тіл обертання, а й різного профілю деталей, в тому числі різьблення. БШ можна отримувати на всіх гартованих сталях, сірих, високоміцних та інших чавунах [19].

Широкі можливості підвищення зносостійкості деталей надає поверхневе термооброблення методами термофрикційного оброблення (ТФО) [33]. До них відносять ТФО-зміцнення обертовим диском. Це оброблення реалізується на універсальних верстатах: шліфувальних, фрезерних, токарних. Використовується для зміцнення деталей із сталей 45, 40Х, У8А та інших. Досягнута твердість після ТФО-зміцнення поверхневого шару сталевих деталей становить 45...65 HRC; зносостійкість зростає в 2...8 разів; глибина зміцненого шару досягає 1,5...2,0 мм. Поверхневий шар має дрібнозернисту структуру.

До перспективних методів відноситься метод трибоелектричного оброблення (ТЕО), що включає поверхневе деформування тертям при одночасному протіканні постійного електричного струму в зоні контакту оброблюваної деталі з інструментом [34–36].

В якості об'єкта дослідження використовується сталь 45 в нормалізованому стані у вигляді плоских циліндричних дисків. Циліндричні поверхні після точіння мали шорсткість  $Rz = 20$  мкм. Обробку проводили на установці, що складається з понижуючого трансформатора, токарного верстата з електроконтактним пристроєм до патрона, із затискною в супорті верстата пружинною державкою з твердосплавним інструментом тороїдальної форми. Триботехнічні властивості оброблених зразків визначали на машині тертя ОМЦ-2 за схемою тертя «ролик-ролик». Вплив ТЕО на механічні властивості оцінювали за зміною мікротвердості поверхні зразків. Для отримання даних про характер зміни механічних властивостей за глибиною шару змінювали навантаження на індентор приладу ПМТ-3. Для дослідження структури поверхневого шару використовували оптичний мікроскоп МІМ-8. Аналіз мікроструктури зразків показав, що при ТЕО внаслідок високошвидкісного нагрівання й охолодження формується поверхневий шар з мартенситною структурою. Дослідження мікротвердості оброблених зразків показало, що в результаті ТЕО відбувається зміцнення поверхневого шару на глибині до 200 мкм. Найбільше впливають величина сили струму і швидкість оброблення, максимальне зміцнення спостерігається у зразків, оброблених з максимальною силою струму  $I = 400$  А. На глибині 2,5 мкм відбулося збільшення мікротвердості в 4 рази.

Методика зміцнення сталей із застосуванням магнітного поля і високошвидкісного тертя була запропонована і розроблена Євдокимовим В.Д. і Кошарською Л.В. [37]. При розробці методики була обрана схема з одним диском, що обертається, що спрощувало проведення досліджень і створення експериментальної установки, але заздалегідь виключало виникнення знакозмінних зсувних деформацій зразків. У роботі було розроблено схему робочого вузла трибомагнітної установки, що складається з фрикційного диска, полюсів електромагніту, обмотки і магнітопроводу, і описані умови її роботи, а також оптимальні режими оброблення. Застосування такої комбінованої методики зміцнення підвищує зносостійкість зразків тертя в 1,5 рази і більше і відбувається протягом 30 секунд за умови попереднього вибору

раціональних режимів з обов'язковим отриманням у поверхневих шарах деталей суцільних білих шарів.

Запропонований вище метод був удосконалений О. М. Євдокімовою у зв'язку з пропозицією генерувати в поверхневих шарах знакозмінні деформації шляхом використання спільної роботи двох дисків. Отже, нею було виявлено, що під час знакозмінного деформування виникають більш екстремальні умови для створення БШ, що збільшує його товщину в 1,5...2 рази і твердість у 1,2...1,4 рази [37].

В наш час фрикційно-зміцнювальне оброблення застосовується також для підвищення довговічності технологічного оснащення, яку проводили на модернізованому плоскошліфувальному верстаті моделі ЗБ722. При цьому як інструмент застосовувався диск ( $D = 400$  мм,  $B = 20$  мм) з пазами, а в якості технологічного середовища використовували поверхнево-активну полімеромістку мастильно-охолоджуючу рідину МХО-64а, що надходить через систему подачі верстата. Твердість зміцненого шару перевіряли за допомогою електроакустичного твердоміра типу НРV-10 фірми «Kraut – Kremer».

Перші спроби застосування електричного розряду в рідині в практичних цілях відносяться до ХХ століття. У 40-і роки почали використовувати цей ефект, і лише в 1950 р. Л. А. Юткін вперше розробив принципову схему установки і виготовив дослідний зразок. Все це послужило поштовхом до розвитку електрогідроімпульсного оброблення (ЕГІО), сутність якого полягає в імпульсному високовольтному електричному розряді в рідині. При цьому саме в каналі розряду, який представляє собою щільну низькотемпературну плазму, виникають високі температури і тиск. Для отримання БШ використовуються методи ЕГІО-1 і ЕГІО-2. При ЕГІО-1 імпульсний нагрів і силовий вплив на оброблюваний метал тривають протягом  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с. Тиск в каналі досягає більше  $10^2 \dots 10^3$  МПа; температура – близько  $2 \cdot 10^4$  К. При ЕГІО-2 оброблювана деталь знаходиться на деякій відстані від каналу розряду. ЕГІО застосовується для очищення виливків, штампування, розвальцьовування та інших аналогічних технологій. У той же час ЕГІО використовують в якості одного з можливих методів імпульсного зміцнення сталі і чавуну.

Одним з технологічних процесів, що мають дуже високу щільність енергії, є випромінювання оптичних квантових генераторів (ОКГ) – лазерів. Лазери бувають як з імпульсною, так і з безперервною генерацією. ОКГ є джерелом концентрованої світлової енергії, а технологічний процес характеризується високою інтенсивністю енергії ( $1,8 \dots 2,2$  ГВт/м<sup>2</sup>), імпульсним її впливом і тим, що вона передається оброблюваному металу без участі проміжного середовища. Лазерну обробку застосовують для підвищення стійкості деталей штамсів, прес-форм, різального інструменту і деталей з доступними для оброблення променем лазера робочими поверхнями. Лазерному зміцненню піддають сталі: вуглецеві, низьковуглецеві, леговані (У8А, У10А, 45, ХВГ, 9ХС та ін.), високолеговані (Х12, Х12М,



X12Ф, ХВГ, ХШ15, 5ХВ2С), низьковуглецеві цементовані (20,12ХН3А), хромисті корозійностійкі (4Х13), швидкорізальні (Р18, Р12, Р5, Р6М5, Р9).

У роботах Євдокимова В. Д. розглянув режими лазерного оброблення інструментальних сталей на установках «Квант-16» і «Квант-18»; він представив схему керування переміщенням лазерного променя в просторі при зміцнювальній обробці площини, отворів, внутрішнього торця, зовнішнього торця, криволінійної поверхні з центральним отвором. Виділив, що твердість у зоні оброблення підвищується з 650...800 до 850...1100 НВ, глибина зміцненої зони досягає 0,2 мм, шорсткість після лазерного оброблення не змінюється. Лазерну обробку можна проводити в атмосфері повітря або захисного газу (наприклад, аргону), де середня продуктивність термозміцнення в аргоні до 500 мм<sup>2</sup>/хв, а на повітрі – до 800 мм<sup>2</sup>/хв [37].

Створення потужних експериментальних лазерів УФ-діапазону стимулювало пошук можливостей їх застосування для нових технологій. Цим пояснюється підвищений інтерес до експериментальних і теоретичних досліджень із взаємодії УФ-випромінювання з металами. У роботі [38] представлені результати експериментальних досліджень впливу ХеСІ-лазера на зразки метала (сталь 45), що свідчить про підвищення їх мікротвердості і зносостійкості у залежності від режимів променевого оброблення. Доведено, що за рахунок теплових режимів впливу УФ-випромінювання можна задавати певні властивості з мікротвердості металевих поверхонь на глибині до 300 мкм.

Вплив лазерного оброблення актуальний і в наші дні, так, в [39] досліджувався вплив імпульсного лазерного оброблення (ІЛО) на процеси структуроутворення в поверхневих шарах багатологованих силумінів евтектичного (АЛ25) і заевтектичних (АЛ26) складів, що є порівняно новим видом локального теплового впливу на поверхні силумінів. Зростання зносостійкості при ІЛО досягається в результаті збільшення твердості поверхні за рахунок диспергізації структури.

Сучасні конструктивні рішення спрямовані на використання в нових виробках деталей складної форми. Однак лазерне зміцнення і наплавлення таких деталей досі відносять до невирішених технічних завдань. В Інституті машинознавства ім. Благонравова А. А. РАН розроблена і діє дослідно-промислова автоматизована лінія для лазерного зміцнення і наплавлення. За допомогою оптичної системи промінь транспортується на сканер для просторового керування лазерним променем при зміцненні і наплавленні деталей складної просторової форми. У роботі [40] використовувалися лазерні установки TRUMPF HL4006D з ламповим накачуванням потужністю випромінювання до 4 000 Вт і ЛС 3 – волоконний лазер з потужністю до 3 000 Вт. Лазерному зміцненню піддавали зразки розміром 5×20×70 мм із сталі 40Х після попереднього термічного оброблення до твердості 260...280 НВ. Діаметр лазерного променя становить 8 мм, ширина зміцненої зони – 5 мм, глибина зміцненого шару складає близько 1,2 мм. На цьому режимі до глибини 1,2 мм твердість змінюється в межах 7 600...5 200 МПа. Лазерне зміцнення сталі 40Х при отриманій твердості

забезпечує значне підвищення зносостійкості в порівнянні з традиційними методами термообробки. Це дає можливість заміни дорогих сталей 12ХНЗА, 1ПХГТ на сталь 40Х. Таким чином, встановлені параметри зон термічного впливу при впливі потужними твердотільними і волоконними лазерами. Визначено значення твердості зміцненого шару, а також залежності мікротвердості від глибини. Потужність, що витрачається волоконним лазером на практично рівноцінні за обсягом зони гарту, нижче в 5...20 разів в залежності від типу твердотільного лазера.

Різновидом лазерного оброблення є лазерне гідропроменеве зміцнення, назва якого пов'язана з тим, що взаємодія лазерного випромінювання з поверхнею деталі відбувається не в газовому середовищі або вакуумі, а в рідині. В роботі [41] відпрацювання технологічного процесу проводили на технологічному СО<sub>2</sub>-лазері «Катунь». Гідропроменевій обробці піддавали сірі перлітні чавуни і високоміцні чавуни з кулястим графітом. Експерименти показали, що зміцнена зона складена двома чітко розмежованими шарами. Верхній шар складається з дрібнозернистого ледебуриту загальною товщиною 0,41...0,55 мм при обробці в технологічній рідині, 0,37 мм – при обробці на повітрі і 0,36...0,48 мм – при обробці в середовищі азоту. Розташований під ледебуритним шаром другий шар товщиною 2...3 мкм складається з дрібногочастого безструктурного мартенситу і включень графіту.

Результати дослідження свідчать, що спосіб гідропроменевого лазерного оброблення виробів дозволяє здійснювати мікрометалургійні перетворення поверхневих шарів металу і створення їх з наперед заданим фазовим складом. Встановлено відсутність викривлення, деформацій і зміни шорсткості зміцнених поверхонь, що виключає подальшу механічну обробку або доведення цих поверхонь. Гідропроменевій лазерній обробці можуть піддаватися не тільки деталі, але й складальні одиниці, що забезпечує точність виробів. Така можливість зумовлена тим, що лазер легко вбудовується в технологічний потік. Прикладом можуть слугувати головки блоків двигунів або біметалеві поршні зі вставкою під верхнє компресійне кільце.

Отже, лазерне зміцнення забезпечує: зміцнення локальних обсягів матеріалу в місцях їх зношування; локальне зміцнення поверхонь важкодоступних поглиблень або порожнин за рахунок введення нескладних оптичних пристроїв; «плямисте» поверхнєве зміцнення значної площі деталі і т. д.

На основі систематизації знань і аналізу можливостей методів імпульсного зміцнення поверхонь деталей машин з'являється необхідність в експериментальних дослідженнях технологічних можливостей більш сучасних методів імпульсного оброблення – електромеханічного чистового точіння і фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів. Методика передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості і шорсткості після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів.

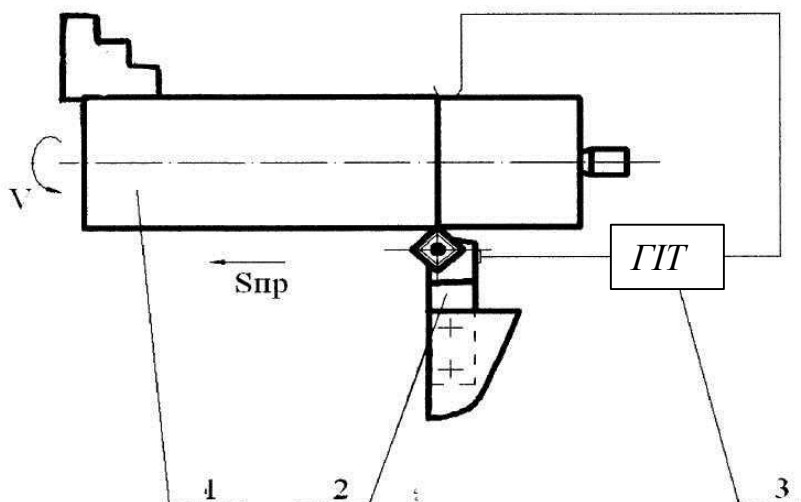
Приймемо наступні змінювані фактори:

- сила струму 50...200 А;
- частота імпульсних струмів 300...700 Гц.

Експериментальна установка складається з наступного обладнання:

- токарно-револьверний верстат мод. 1П365;
- генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_{и} = 20 \dots 8\ 000$  Гц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 2 \dots 6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>; регулювання шпаруватості 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна.

Схема експериментальної установки для проведення електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів представлена на рисунку 3.16.



*1 – заготовка; 2 – різець, 3 – генератор імпульсних струмів (ГИТ)  
Рисунок 3.16 – Схема експериментальної установки для проведення електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів*

У якості різального інструмента застосовується різець з МКП, Т15К6. Експеримент проводиться на заготовках таких матеріалів: сталь 45 і 50Г2.

Для проведення першої серії експериментів використовується заготовка зі сталі 45 ГОСТ 1050–88, діаметр 72 мм, твердість 228 НВ, шорсткість  $Ra = 6,3$  мкм.

Оброблення здійснюється при наступних режимах:

- глибина різання 0,3 мм;
- поздовжня подача інструменту 0,12 мм/об;
- швидкість оброблення 119,8 м/хв;
- частота обертання 530 об/хв;
- шпаруватість 50 %.

Вимірювання твердості поверхневого шару заготовки після оброблення виконується за допомогою електронного твердоміра малогабаритного ЕТМ-01. Вимірювання шорсткості поверхневого шару заготовки після оброблення виконується за допомогою електронного тестера TR-100.

Результати серії експериментів заносяться в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експериментів (сталь 45)

Частота імпульсного струму $f$ , Гц	Сила струму $I$ , А	Твердість, НВ			Шорсткість $R_a$ , мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
300	50	252	252	249	2,9	3,0	2,8
500		249	249	252	2,7	2,9	2,9
700		252	249	248	2,6	2,6	2,5
300	125	255	253	255	3,0	3,1	3,1
500		251	252	251	3,0	3,0	3,0
700		252	250	249	2,7	2,8	2,7
300	200	260	258	260	3,2	3,3	3,2
500		255	256	258	3,1	3,0	3,1
700		254	252	255	2,8	2,9	2,7

Для проведення першої серії експериментів використовується заготовка зі сталі 50Г2 ГОСТ 4543–71, діаметр 114 мм, твердість 305 НВ, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Оброблення здійснюється при наступних режимах:

- глибина різання 0,3 мм;
- поздовжня подача інструменту 0,12 мм/об;
- швидкість оброблення 137,8 м/хв;
- частота обертання 385 об/хв;
- шпаруватість 50 %.

Результати серії експериментів заносяться в таблицю 3.3.

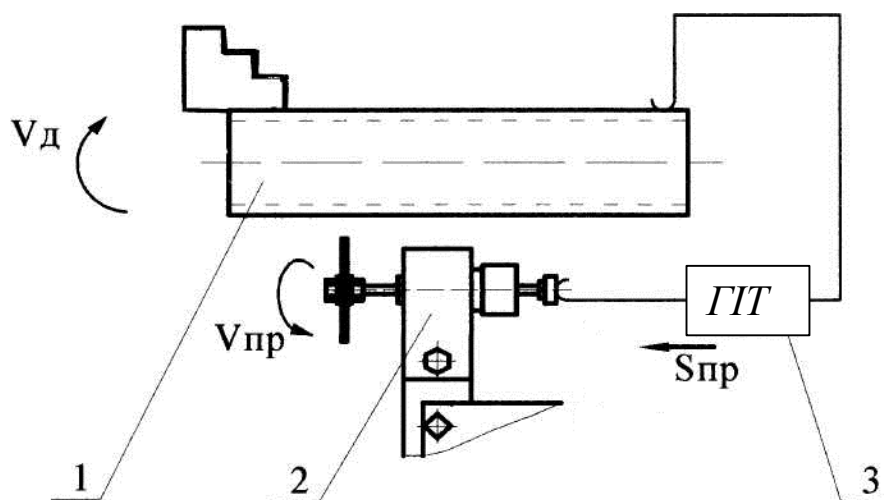
Таблиця 3.3 – Результати експериментів (сталь 50Г2)

Частота імпульсного струму $f$ , Гц	Сила струму $I$ , А	Твердість, НВ			Шорсткість $R_a$ , мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
300	50	334	335	334	2,1	2,0	1,9
500		330	330	331	1,8	1,7	1,8
700		332	332	329	1,8	1,5	1,6
300	125	337	340	335	2,0	2,1	2,1
500		334	335	333	1,9	2,0	2,0
700		336	336	337	1,9	1,6	1,7
300	200	342	341	342	2,3	2,2	2,3
500		340	340	340	2,0	1,9	1,9
700		338	337	338	1,9	1,8	1,8

Методика досліджень [42] передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості і шорсткості після фрикційно-зміцнювального оброблення із застосуванням імпульсних струмів.

Експериментальна установка (рис. 3.17) складається з наступного обладнання:

- токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625;
- генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_{и} = 20...8\ 000$  Гц; сила струму  $I = 0...200$  А; напруга  $U = 2...6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6}...10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 108...109$  А/м<sup>2</sup>; регулювання шпаруватості 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна.



*1 – заготовка; 2 – спеціальне пристосування для установки фрикційного диска; 3 – генератор імпульсних струмів (ГІТ)*

*Рисунок 3.17 – Схема експериментальної установки*

Детальніше експериментальна установка для фрикційно-зміцнювального оброблення наведена на рисунку 3.18.

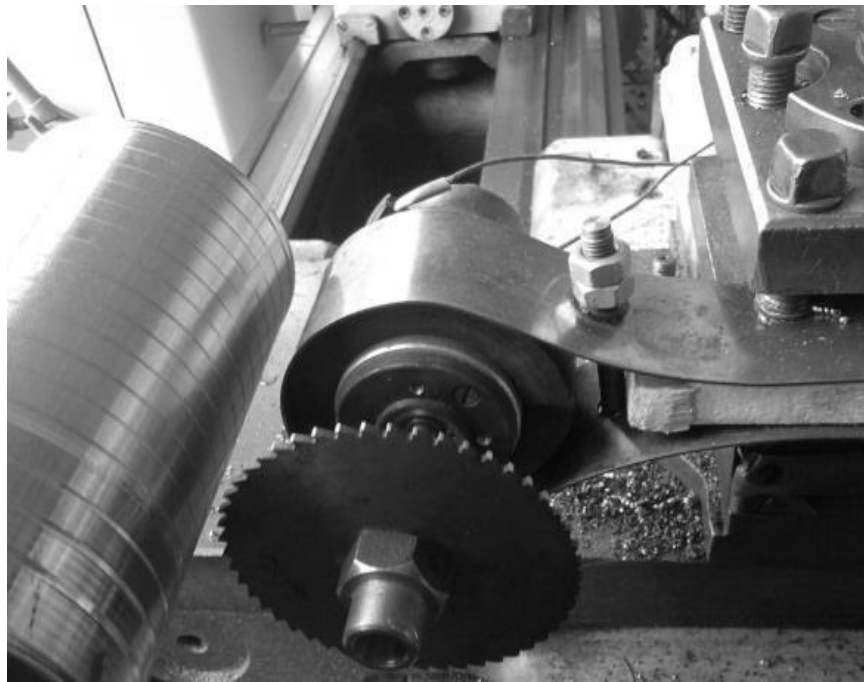
Експерименти проводяться на заготовках, виготовлених зі сталі 50Г2 і чавуну СЧ 20-41.

Оброблення здійснюється при наступних режимах:

- частота обертання диска 2 000 об/хв;
- подача 0,17 мм/об;
- частота імпульсних струмів 1000 Гц;
- шпаруватість 50 %.

Приймаються наступні змінювані фактори:

- сила струму 125...200 А;
- швидкість лінійна 785...974 м/хв.



*Рисунок 3.18 – Експериментальна установка для фрикційно-зміцнювального оброблення*

В якості зміцнювального інструменту застосовується дискова фреза діаметром 100 мм, Р6М5. Вимірювання мікротвердості проводиться за методом Хрущова – Берковича шляхом вдавнення в випробувану поверхню алмазної піраміди. Вимірювання шорсткості поверхневого шару заготовки після оброблення виконується за допомогою електронного тестера TR-200.

Для проведення першої серії експериментів використовується заготовка зі сталі 50Г2 ГОСТ 4543–71, діаметр 110 мм, мікротвердість  $H_v = 2\,434$  МПа, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Результати експериментів представлені в табл. 3.4.

*Таблиця 3.4 – Результати експериментів (сталь 50Г2)*

Сила струму $I$ , А	Швидкість лінійна $V_\Sigma$ , м/хв	Мікротвердість $H_v$ , МПа			Шорсткість $R_a$ , мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
125	800,7	2 722	2 660	2 660	1,8	1,7	1,8
200		3 064	2 990	2 920	1,5	1,5	1,4
125	973,4	2 775	2 851	2 775	1,9	2,0	2,0
200		3 140	3 140	3 064	1,6	1,5	1,5

Для проведення другої серії експериментів використовується заготовка з чавуну СЧ 20-41 ГОСТ 1412–79, діаметр 100 мм, мікротвердість  $H_v = 2722$  МПа, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Результати експериментів представлені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати експериментів (чавун СЧ 20–41)

Сила струму I, А	Швидкість лінійна V <sub>Σ</sub> , м/хв	Мікротвердість Hv, МПа			Шорсткість Ra, мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
125	785	3 662	3 566	3 566	3,0	2,6	3,0
200		4 204	3 974	4 086	2,5	2,3	2,8
125	942	3 762	3 662	3 762	3,1	3,0	3,4
200		4 899	4 578	4 899	2,7	2,7	2,9

Швидкість лінійна визначається за формулою

$$V_{\Sigma} = V_{\partial} + V_{det},$$

де  $V_{\partial}$  – швидкість фрикційного диска, м/хв;

$V_{det}$  – швидкість деталі, м/хв.

При електромеханічному чистовому точінні в ході проведення досліджень були виконані експерименти з вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості і шорсткості поверхні після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів. Для кожного матеріалу було виконано по три серії експериментів.

Обробку експериментальних даних і встановлення ступеня впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні виконаємо за допомогою методу нейросітьового моделювання. В якості входів приймемо технологічні режими (частота імпульсного струму  $f$ , сила струму  $I$ ), а в якості виходів по черзі – твердість НВ і шорсткість обробленої поверхні Ra.

За отриманими експериментальними даними виконаємо математичну обробку за допомогою програми NeuroPro для заготовок із сталі 45 і 50Г2. У результаті нейросітьового моделювання отримано вербальні описи моделей залежностей шорсткості і твердості від режимів оброблення.

Вербальний опис нейросітьової моделі (сталь 45):

1. Поля бази даних (вихідні симптоми):

F

I

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

НВ

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$F = (F - 500) / 200$$

$$I = (I - 125) / 75$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (0,001816018 * F - 0,003654891 * I)$$

Синдроми 2-го рівня:

Синдром2\_1 = Сигмоїда2 (Синдром1\_1)

Синдром2\_2 = Сигмоїда2 (- Синдром1\_1)

Кінцеві синдроми :

НВ = - Синдром2\_1 + Синдром2\_2 - 0,1548836

Постоброблення кінцевих синдромів:

НВ = ((НВ \* 12 + 508) / 2)

2. Поля бази даних (вихідні симптоми):

F

I

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

РА

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

F = (F - 500) / 200

I = (I - 125) / 75

Функціональні перетворювачі:

Сигмоїда1 (A) = A / (0,1 + | A |)

Сигмоїда2 (A) = A / (0,1 + | A |)

Синдроми 1-го рівня:

Синдром1\_1 = Сигмоїда1 (- 0,04229765 \* F - 0,2083129 \* I)

Синдром1\_2 = Сигмоїда1 (0,1814775 \* F - 0,003325883 \* I)

Синдроми 2-го рівня:

Синдром2\_1 = Сигмоїда2 (0,4298148 \* Синдром1\_2 - 0,1071725)

Синдром2\_2 = Сигмоїда2 (-0,2729212 \* Синдром1\_1 - 0,1152457 \* Синдром1\_2)

Кінцеві синдроми :

РА = - 0,5822359 \* Синдром2\_1 + 0,557686 \* Синдром2\_2 - 0,145061

Постоброблення кінцевих синдромів:

РА = ((РА \* + 0,799999952316284) + 5,79999995231628) / 2

За допомогою нейросітьового моделювання отримано значущості входів, які показують, що в процесі зміцнення деталі зі сталі 45 найбільше впливає на твердість сила струму зі значимістю 1, менше – частота імпульсного струму зі значимістю 0,53, а на шорсткість найбільше впливає частота імпульсного струму зі значимістю 1, менше – сила струму зі значимістю 0,57.

Вербальний опис нейросітьової моделі (сталь 50Г2):

1. Поля бази даних (вихідні симптоми):

F

I

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

НВ

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

F = (F - 500) / 200

I = (I - 125) / 75

Функціональні перетворювачі:

Сигмоїда1 (A) = A / (0,1 + | A |)



$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (0,04651758 * F - 0,1858104 * I + 0,0004102224)$$

Синдроми 2-го рівня:

$$\text{Синдром2\_1} = \text{Сигмоїда2} (- 0,4097168 * \text{Синдром1\_1} + 0,2437939)$$

$$\text{Синдром2\_2} = \text{Сигмоїда2} (0,2731502 * \text{Синдром1\_1} + 0,09283963)$$

Кінцеві синдроми :

$$\text{НВ} = 0,4950112 * \text{Синдром2\_1} - 0,5791982 * \text{Синдром2\_2} - 0,05650925$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$\text{НВ} = (\text{НВ} * 13 + 671) / 2)$$

2. Поля бази даних (вихідні симптоми):

F

I

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

RA

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$F = (F - 500)/200$$

$$I = (I - 125)/75$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (0,01103386 * F - 0,005260899 * I - 0,006029048)$$

Синдроми 2-го рівня:

$$\text{Синдром2\_1} = \text{Сигмоїда2} (\text{Синдром1\_1} - 0,1053491)$$

$$\text{Синдром2\_2} = \text{Сигмоїда2} (\text{Синдром1\_1} + 0,1884531)$$

Кінцеві синдроми:

$$\text{RA} = - \text{Синдром2\_1} - \text{Синдром2\_2} - 0,01554895$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$\text{RA} = ((\text{RA} * + 0,799999952316284) + 3,79999995231628)/2$$

За допомогою нейросітьового моделювання отримано значущості входів, що показують, що в процесі зміцнення деталі зі сталі 50Г2 найбільше впливає на твердість сила струму зі значимістю 1, менше – частота імпульсного струму зі значимістю 0,46, а на шорсткість найбільше впливає частота імпульсного струму зі значимістю 1, менше – сила струму зі значимістю 0,44.

Обробку експериментальних даних і встановлення ступеня впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні при фрикційно-зміцнювальному обробленні виконаємо за допомогою методу нейросітьового моделювання. В якості входів приймемо технологічні режими (сила струму I, швидкість лінійна  $V_{\Sigma}$ ), а в якості виходів по черзі – мікротвердість  $H_v$  і шорсткість обробленої поверхні Ra.

За отриманими експериментальними даними виконаємо математичну обробку за допомогою програми NeuroPro для заготовок із сталі 50Г2 і чавуну СЧ 20-41. У результаті нейросітьового моделювання отримано вербальні описи моделей залежностей мікротвердості і шорсткості від режимів оброблення.

Вербальний опис нейросітьової моделі (сталь 50Г2):

1. Поля бази даних (вихідні симптоми):

I

V

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

HV

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$I = (I - 162,5) / 37,5$$

$$V = (V - 887) / 86$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (-0,1554175 * I + 0,02837388)$$

$$\text{Синдром1\_2} = \text{Сигмоїда1} (0,1312293 * V - 0,06317067)$$

$$\text{Синдром1\_3} = \text{Сигмоїда1} (0,2405654 * I - 0,003818467)$$

Кінцеві синдроми:

$$\text{Синдром1\_2} = -0,3898733 * \text{Синдром1\_1} + 0,3591174 * \text{Синдром1\_3} + 0,03569015$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$HV = (HV * 480 + 5800) / 2$$

2. Поля бази даних (вихідні симптоми)

I

V

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

RA

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$I = (I - 162,5) / 37,5$$

$$V = (V - 887) / 86$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (0,2890824 * I - 0,2662913 * V + 0,06135077)$$

Синдроми 2-го рівня:

$$\text{Синдром2\_1} = \text{Сигмоїда2} (-0,613772 * \text{Синдром1\_1} + 0,1946034)$$

Кінцеві синдроми:

$$RA = \text{Синдром2\_1} - 0,03252933$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$RA = ((RA * 0,600000023841858) + 3,39999997615814) / 2$$

За допомогою нейросітьового моделювання отримано значущості входів, які показують, що в процесі зміцнення деталі зі сталі 50Г2 найбільше впливає на мікротвердість сила струму зі значимістю 1, менше – швидкість лінійна зі значимістю 0,52, а на шорсткість найбільше впливає швидкість лінійна зі значимістю 1, менше – сила струму зі значимістю 0,92.

Вербальний опис нейросітьової моделі (чавун СЧ 20-41):

1. Поля бази даних (вихідні симптоми)

I

V

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

HV

Попереднє оброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$I = (I - 162,5) / 37,5$$

$$V = (V - 863,5) / 78,5$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

$$\text{Сигмоїда3 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (-0,3476431 * I - 0,3141893 * V + 0,1451551)$$

$$\text{Синдром1\_2} = \text{Сигмоїда1} (0,1817159 * I + 0,01851444 * V + 0,08022907)$$

Синдроми 2-го рівня:

$$\text{Синдром2\_1} = \text{Сигмоїда2} (-0,3520436 * \text{Синдром1\_1} + 0,2843367 * \text{Синдром1\_2} - 0,04705161)$$

Синдроми 3-го рівня:

$$\text{Синдром3\_1} = \text{Сигмоїда3} (-0,5034214 * \text{Синдром2\_1} - 0,09413926)$$

Кінцеві синдроми:

$$HV = -0,9608597 * \text{Синдром3\_1} - 0,03854867$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$HV = (HV * 1333 + 8465) / 2$$

2. Поля бази даних (вихідні симптоми)

I

V

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

RA

Попереднє оброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$I = (I - 162,5) / 37,5$$

$$V = (V - 863,5) / 78,5$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1} (0,2443676 * I - 0,2693527 * V + 0,008404665)$$

Кінцеві синдроми:

$$RA = -0,6704669 * \text{Синдром1\_1} + 0,01526261$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$RA = ((RA * + 1,10000014305115) + 5,70000004768372) / 2$$

За допомогою нейросітьового моделювання отримано значущості входів, що показують, що в процесі зміцнення деталі з чавуну СЧ 20-41 найбільше впливає на мікротвердість сила струму зі значимістю 1, менше –

швидкість лінійна зі значимістю 0,79, а на шорсткість найбільше впливає швидкість лінійна зі значимістю 1, менше – сила струму зі значимістю 0,91.

За допомогою нейросітьового моделювання були отримані результати випробувань на нейросітьовій моделі при електромеханічному чистовому точінні і результати випробувань на нейросітьовій моделі при фрикційно-зміцнювальній обробці.

У даний час все більше популярні різні варіанти багатошарових сітей прямого поширення, які автоматично нарощуються в процесі виконання завдання. Прикладом таких моделей можуть служити так звані каскадні сіті, в яких кожен шар нейронів передає свої виходи всім наступним шарам.

Алгоритм побудови каскадної сіті є рекурентним і повністю описується операцією додавання одного нейрона. На рисунку 3.19 показана структура каскадної нейронної сіті в порівнянні з прямою нейронною сіттю.

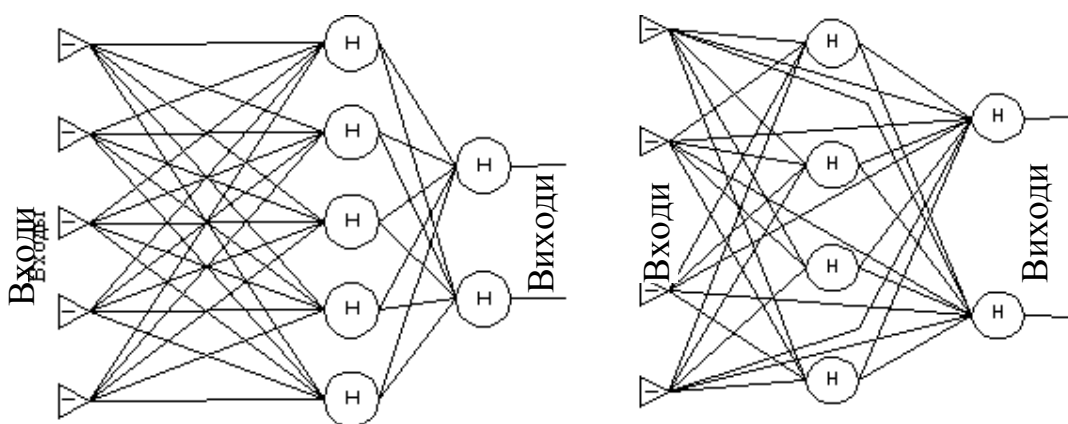


Рисунок 3.19 – Прямочна і каскадна нейронна сіть

Сіті з каскадними зв'язками, як і сіті з прямими зв'язками, можуть застосовуватися для виконання функцій, що класифікують, а також функцій розпізнавання образів. Такі нейронні сіті мають у кожному шарі синаптичні зв'язки не тільки від попереднього шару, а й від вхідного. Ці зв'язки, як правило, викликають більш тривале навчання нейронної сіті в порівнянні з сіттю з прямими зв'язками.

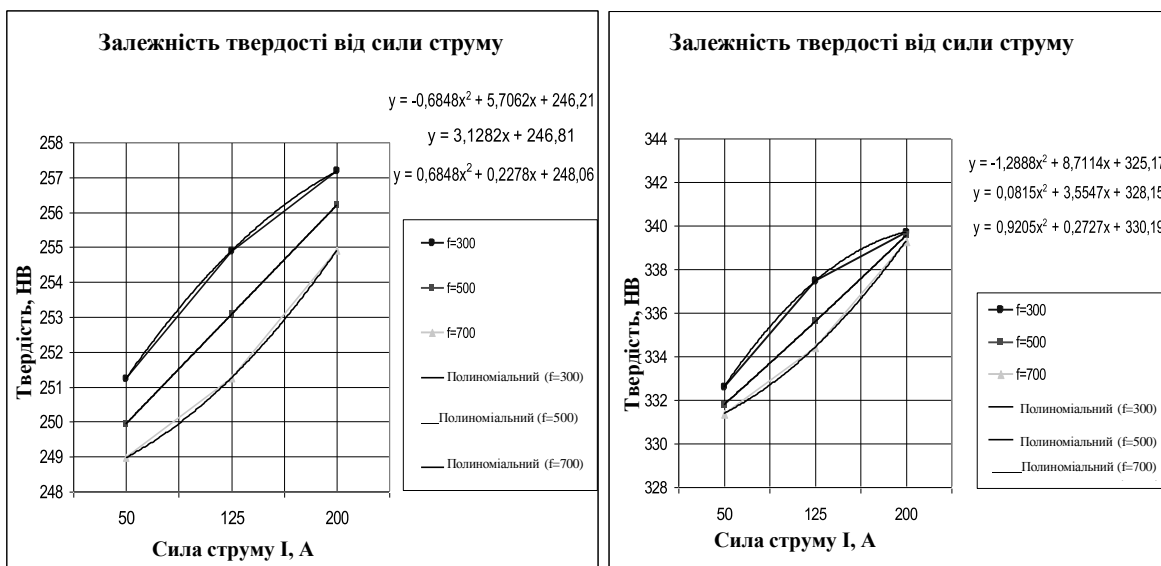
Побудуємо нейросітьову модель процесу електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів для сталі 45 з виходом «шорсткість» із застосуванням каскадної структури нейронних сітей у цифровому і у формульному вигляді. На підставі отриманих даних побудуємо залежність помилки, отриманої на кожному шарі, від рівня побудованої каскадної сіті.

Визначимо технологічні можливості електромеханічного чистового точіння за допомогою графічних залежностей.

Зв'язок технологічних режимів з показниками якості обробленої поверхні представимо у вигляді залежностей (рис. 3.20, 3.21), побудованих на основі даних нейросітьового моделювання. На залежностях представлено вплив найбільш значущих чинників на якість обробленої поверхні для матеріалів сталі 45 і 50Г2.

Аналізуючи графічні залежності (рис. 3.20, 3.21), можна зробити висновки, що зі збільшенням сили струму твердість заготовки із сталі 45 і 50Г2 збільшується. Найбільше значення твердості заготовки зі сталі 45 досягається при  $I = 200$  А,  $f = 300$  Гц, сталі 50Г2 – при  $I = 200$  А,  $f = 300$  Гц і  $f = 500$  Гц; найменша твердість сталі 45 і 50Г2 досягається при  $I = 50$  А,  $f = 700$  Гц.

Із збільшенням частоти імпульсного струму шорсткість заготовки із сталі 45 і 50Г2 зменшується. Найменше значення шорсткості на сталі 45 і 50Г2 досягається при  $f = 700$  Гц,  $I = 50$  А, а найбільше – при  $f = 300$  Гц і  $I = 200$  А.

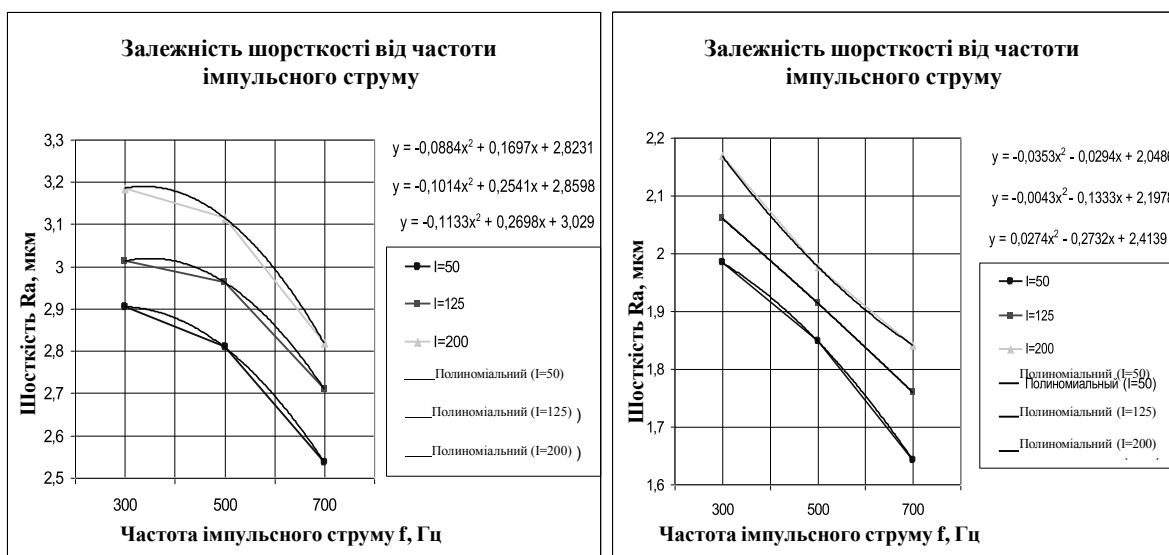


а)

б)

а – сталь 45; б – сталь 50Г2

Рисунок 3.20 – Залежність твердості від сили струму



а)

б)

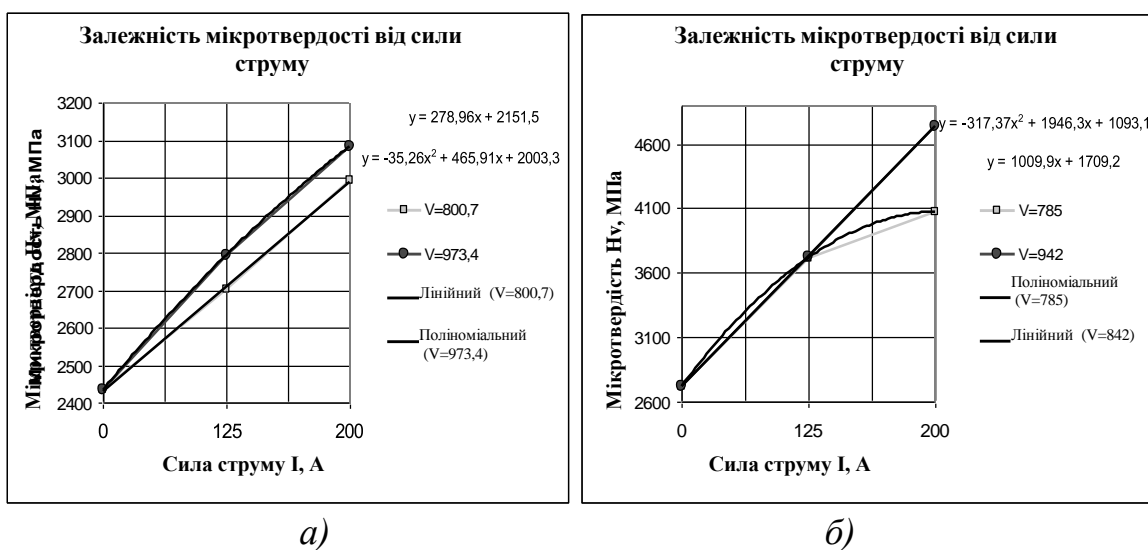
а – сталь 45; б – сталь 50Г2

Рисунок 3.21 – Залежність шорсткості від частоти імпульсного струму

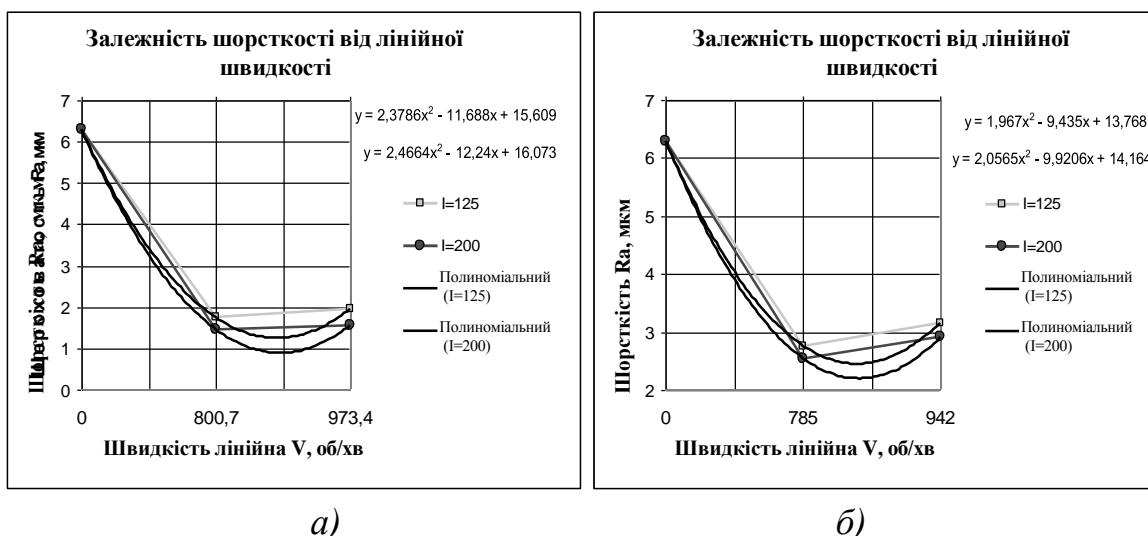
У результаті проведених експериментів встановлено, що технологічними можливостями електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів є одержання на середньовуглецевій сталі твердості поверхні в інтервалі 248...260 НВ, шорсткості – в інтервалі  $Ra = 3,2...2,5$  мкм; на легованій сталі твердості поверхні в інтервалі 329...342 НВ, шорсткості – в інтервалі  $Ra = 2,3...1,5$  мкм.

Визначимо технологічні можливості електромеханічного чистового точіння за допомогою графічних залежностей.

Зв'язок технологічних режимів з показниками якості обробленої поверхні представимо у вигляді залежностей (рисунок 3.22...3.23), побудованих на основі даних нейросітьового моделювання. Покажемо вплив найбільш значущих чинників на якість обробленої поверхні для матеріалів: сталь 50Г2 і чавун СЧ 20-41.



а – сталь 50Г2; б – чавун СЧ 20-41  
 Рисунок 3.22 – Залежність мікротвердості від сили струму



а – сталь 50Г2; б – чавун СЧ 20-41  
 Рисунок 3.23 – Залежність шорсткості від лінійної швидкості

Аналізуючи графічні залежності (рис. 3.22), можна зробити висновки, що у порівнянні з базовою мікротвердістю  $H_v = 2434$  МПа сталі 50Г2 і  $H_v = 2722$  МПа чавуну СЧ 20-41, сила струму позитивно впливає на мікротвердість. При збільшенні сили струму мікротвердість збільшується. Найбільше значення мікротвердості на сталі 50Г2 досягається при  $I = 200$  А,  $V_\Sigma = 973,4$  об/хв, на чавуні СЧ 20-41 – при  $I = 200$  А,  $V_\Sigma = 942$  об/хв; найменша мікротвердість на сталі 50Г2 досягається при  $I = 125$  А,  $V_\Sigma = 800,7$  об/хв, а на чавуні СЧ 20-41 – при  $I = 125$  А,  $V_\Sigma = 785$  об/хв (за наявності оброблення).

Аналізуючи графічні залежності (рис. 3.23), відзначимо, що у порівнянні з базовою шорсткістю  $Ra = 6,3$  мкм шорсткість поверхні при впливі лінійної швидкості значно знижується. Але при лінійній швидкості в інтервалі  $V_\Sigma = 800,7...973,4$  об/хв (оброблення сталі 50Г2) і в інтервалі  $V_\Sigma = 785...942$  об/хв (оброблення чавуну СЧ 20-41) шорсткість збільшується. Найменша шорсткість досягається при  $V_\Sigma = 800,7$  об/хв,  $I = 200$  А (сталь 50Г2) і при  $V_\Sigma = 785$  об/хв,  $I = 200$  А (чавун СЧ 20-41); найбільша шорсткість на сталі 50Г2 досягається при  $V_\Sigma = 973,4$  об/хв,  $I = 125$  А (сталь 50Г2) і при  $V_\Sigma = 942$  об/хв,  $I = 125$  А (чавун СЧ 20-41) (за наявності оброблення).

Таким чином, технологічними можливостями фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів є отримання при обробці легованої сталі мікротвердості в інтервалі  $H_v = 2\ 660...3\ 140$  МПа, шорсткості в інтервалі  $Ra = 1,4...2,0$  мкм; при обробці чавуну отримання мікротвердості в інтервалі  $H_v = 3\ 566...4\ 899$  МПа, шорсткості в інтервалі  $Ra = 2,3...3,4$  мкм.

Для визначення мікроструктури зразків після імпульсного оброблення були здійснені металографічні дослідження.

Досліджувані матеріали:

- сталь 50Г2 (після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів);
- сталь 50Г2 (після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів);
- чавун СЧ 20-41 (після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів).

Для дослідження мікроструктури металів використовували мікроскоп МІМ-7 (збільшення 100 разів).

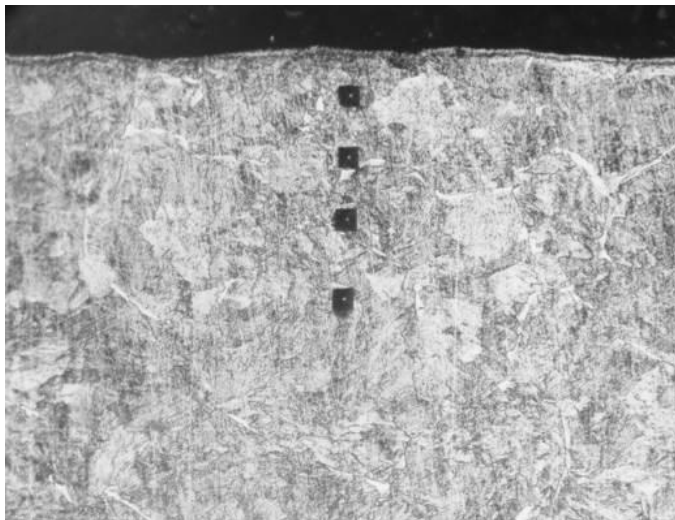
Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою твердоміра ПМТ-3 за методом Хрущова – Берковича. Мікротвердість за методом Хрущова – Берковича визначається шляхом вдавнення в випробувану поверхню алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині  $136^\circ$  під навантаженням від 2 до 200 г. Розрахунок мікротвердості здійснюється за формулою

$$H = 1,854 \times \frac{P}{d^2},$$

де  $P$  – навантаження, г;

$d$  – діагональ відбитка, мкм.

Значення мікротвердості визначали за шкалою твердоміра ПМТ-3.  
Мікроструктура зразка зі сталі 50Г2 після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів наведена на рис. 3.24.  
Режими оброблення зразка:  $I = 200 \text{ А}$ ,  $f = 300 \text{ Гц}$ .



*Рисунок 3.24 – Мікроструктура зразка зі сталі 50Г2 після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів ( $I = 200 \text{ А}$ ,  $f = 300 \text{ Гц}$ ),  $\times 100$*

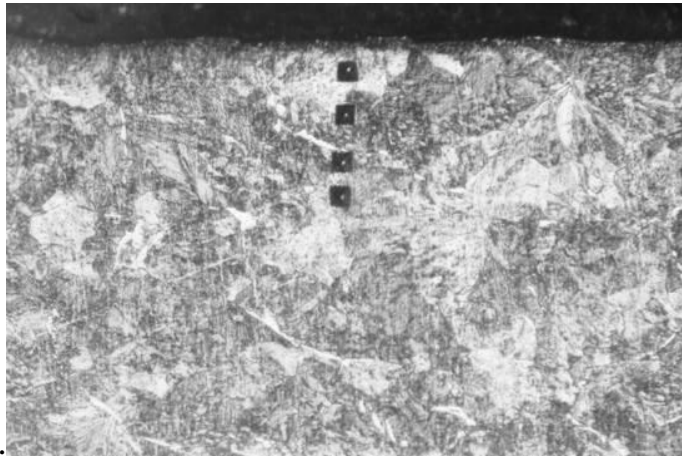
Аналіз мікроструктури зразка зі сталі 50Г2 (див. рис. 3.24) після електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів показав, що в поверхневому шарі обробленої деталі з базовою мікротвердістю  $H_v = 2\,434 \text{ МПа}$  утворюється загартований шар з утворенням мартенситно-аустенітної структури. Отриманий шар має високу твердість і знижену травимість. Мікротвердість зміцненого шару досягає  $H_v = 4\,578 \text{ МПа}$ . Це свідчить про те, що зміцнення поверхневого шару зростає в 1,9 разів. Товщина зміцненого шару досягає 10 мкм.

Мікроструктура зразка зі сталі 50Г2 після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів наведена на рис. 3.25.

Режими оброблення зразка:  $I = 200 \text{ А}$ ,  $V_{\Sigma} = 973,4 \text{ м/хв}$ .

Аналіз мікроструктури зразка зі сталі 50Г2 (рис. 3.25) після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів показав, що в поверхневому шарі обробленої деталі з базовою мікротвердістю  $H_v = 2\,434 \text{ МПа}$  утворюється шар середньої твердості та інтенсивної травимості, що вказує на недостатнє легування аустеніту при високошвидкісному нагріванні до температур вище  $A_{C3}$  і недостатню його стійкість, розпад і перетворення на тростит при наступному охолодженні. Мікротвердість зміцненого шару досягає  $H_v = 3\,140 \text{ МПа}$ . Це свідчить про те, що зміцнення поверхневого шару зростає в 1,3 рази. Товщина зміцненого шару досягає 20 мкм.

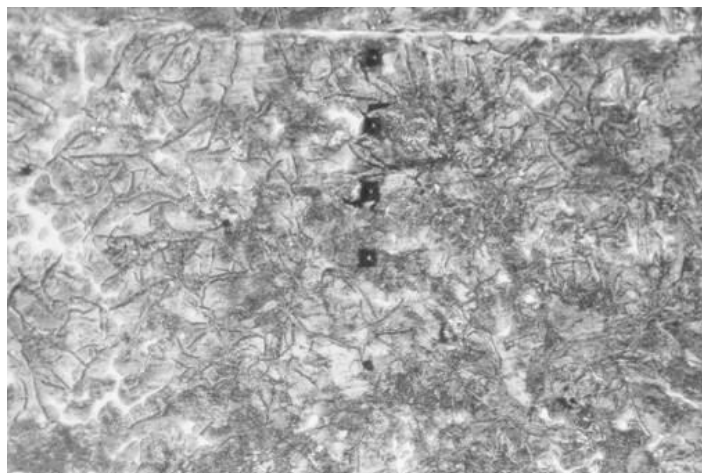




*Рисунок 3.25 – Мікроструктура зразка зі сталі 50Г2 після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів ( $I = 200$  А,  $V_{\Sigma} = 973,4$  м/хв),  $\times 100$*

Мікроструктура зразка з чавуну СЧ 20-41 після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів наведена на рисунку 3.26.

Режими оброблення зразка:  $I = 200$  А,  $V_{\Sigma} = 942$  м/хв.



*Рисунок 3.26 – Мікроструктура зразка з чавуну СЧ 20-41 після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів ( $I = 200$  А,  $V_{\Sigma} = 942$  м/хв),  $\times 100$*

Аналіз мікроструктури зразка зі сталі 50Г2 (див. рис. 3.26) після фрикційно-зміцнювального оброблення з використанням імпульсних струмів показав, що в поверхневому шарі обробленої деталі з базовою мікротвердістю  $H_v = 2\,722$  МПа утворюється загартований шар з утворенням мартенситно-аустенітної структури. Отриманий шар має високу твердість і низьку травимість. Мікротвердість зміцненого шару досягає  $H_v = 4\,899$  МПа. Це свідчить про те, що зміцнення поверхнього шару зростає в 1,8 рази. Товщина зміцненого шару досягає 10...15 мкм [43–46].

### 3.3 Електромагнітно-абразивне оброблення

Основною метою технологічних процесів сучасного машинобудування є забезпечення формоутворення деталей з високою точністю, низькою шорсткістю робочих поверхонь, особливими і достатніми характеристиками міцності, зносостійкості. При цьому особливого значення набувають технології фінішного оброблення, які безпосередньо впливають на комплекс фізико-механічних властивостей поверхні деталей. Одним з найбільш поширених на заключних стадіях технологічних процесів виготовлення деталей є абразивне оброблення. Ці методи забезпечують точність і якість поверхонь, але не забезпечують зміцнення і достатню твердість тертьових поверхонь деталей.

Найбільш актуальними та ефективними, поряд із традиційно застосовуваними технологіями, є нові або вдосконалені технології, які спрямовані на зміцнення матеріалів, зміну найважливіших експлуатаційних параметрів, які практично не впливають на конструкцію і розміри деталі.

До таких нововведень в галузі технологічних процесів відносять технологію електромагнітно-абразивного оброблення. Цей метод забезпечує точність, високу якість оброблених поверхонь, ефективно зміцнення деталей машин, дозволяє покращувати експлуатаційні характеристики, такі як міцність, зносостійкість.

Розвиток сучасної техніки, створення машин і агрегатів вимагають розробки нових технологічних процесів, що забезпечують якість, високі експлуатаційні властивості і товарний вигляд продукції, що випускається, здатної конкурувати в умовах ринкової економіки. Важливою умовою вирішення цих завдань є вдосконалення та розвиток фінішного оброблення, зокрема абразивного. Одним з ефективних методів є комбіноване оброблення.

Комбіновані методи оброблення (МО) є поєднанням різних технологічних прийомів, у кожному з яких намагаються використовувати і посилити позитивні ознаки, необхідні для технологічного процесу виготовлення деталі. При різному поєднанні магнітного, хімічного, механічного та теплового впливів створена ціла гамма комбінованих методів оброблення.

У роботах Бабічева А. П., Тамаркіна М. А., Лебедева В. А., Анкудімова Ю. П. розкриваються принципи побудови комбінованих МО, їх класифікація та різновиди. Автори пишуть, що створення комбінованих МО ґрунтується на одночасному використанні різних видів енергії і спричинених ними відповідних фізико-хімічних ефектів, способів підведення їх в зону оброблення, комбінуванні обробних інструментів.

Використання комбінованих МО призводить до підвищення як продуктивності оброблення, так і якості деталі. У ряді випадків освоєння комбінованих способів оброблення дозволяє досягти нових технічних ефектів, наприклад, значно збільшити міцність, зносостійкість та інші експлуатаційні параметри деталей.

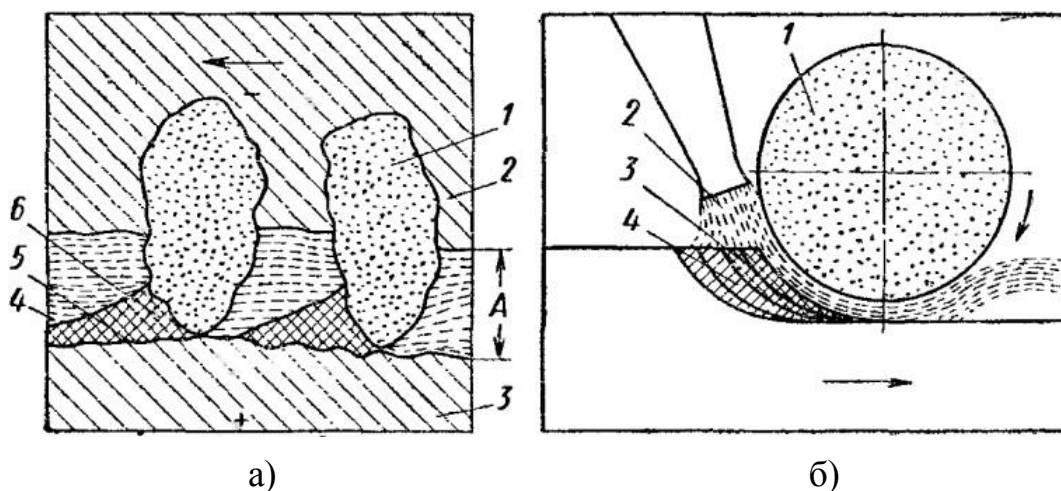
Визначальний внесок у питання електролітичного шліфування зробили Балашов Ю. А., Гостєв В. В. [51], Гурвіч Р. А. [53], Семко М. Ф. [50], Захаренко І. П., Савченко Ю. А та ін.

Електролітичне шліфування (ЕЛШ) – комбінація шліфування і механічного оброблення, при якій алмазний з металевою матрицею абразивний круг є катодом у фізичному контакті з анодом – заготовкою. Контакт відбувається через шар відповідного електроліту.

ЕЛШ застосовують для підвищення продуктивності, якості та геометричної точності оброблюваних деталей з твердих, магнітних, жароміцних сплавів та інших матеріалів. Метод заснований на поєднанні електрохімічного анодного розчинення металу з механічною різальною дією абразивних або алмазних зерен. Інструментом при електролітичній алмазній і абразивній обробці є струмопровідний алмазний або абразивний круг на металевій зв'язці.

У ланцюзі джерела постійного струму круг підключають як катод, а оброблювану деталь – як анод. Анодне розчинення металу досягається застосуванням спеціального електроліту.

При електролітичному процесі абразивні або алмазні зерна круга 1 (рис. 3,27, а), закріплені в крузі струмопровідною зв'язкою 2, утворюють між струмопровідною зв'язкою і заготовкою міжелектродний зазор А.



а: 1 – круг; 2 – зв'язка, 3 – заготовка; 4 – електроліт; 5 – плівка;  
 б – продукти анодного розчинення; б: 1 – круг; 2 – електроліт;  
 3 – продукти анодного розчинення; 4 – заготовка

Рисунок 3.27 – Схема алмазно-електролітичного шліфування

У цей зазор безперервно подається робочий електроліт 4. Електричний струм, протікаючи від заготовки, що є анодом, проходить через струмопровідний електроліт. Заготовка 3 піддається електролітичному анодному розчиненню. Утвориться міцна пасивувальна плівка 5, і продукти б анодного розчинення видаляються зернами круга 1, що має обертальний і поступальний рух. Оптимальний міжелектродний зазор  $A = 0,05$  мм. Кількість

матеріалу, що знімається електрохімічним шляхом, обернено пропорційна величині міжелектродного зазору  $A$ .

Для електролітичного алмазного і абразивного оброблення характерна висока продуктивність, яка пояснюється великою щільністю струму, що досягає при малому електродному зазорі  $80 \dots 100 \text{ А/см}^2$ .

Зношення алмазного і абразивного кругів при електролітичній обробці в порівнянні зі зношенням їх при звичайному шліфуванні в  $2 \dots 10$  разів менше, шорсткість обробленої поверхні  $Ra = 0,02 \dots 0,32 \text{ мкм}$ .

В роботі [50] представлені результати досліджень впливу умов алмазно-електролітичного шліфування на структурні зміни в поверхневому шарі швидкорізальних сталей P18 і P12. Встановлено, що після оброблення спостерігалася відсутність в поверхневому шарі аустеніту. Це обумовлено наявністю в зоні різання температур, достатніх для додаткового відпуску. У ІСМ АН України була проведена експериментальна робота з електролітичного шліфування швидкорізальних сталей і різального інструменту з них кругами із синтетичних алмазів і кубоніта [55].

Свій початок електрохімічне оброблення (ЕХО) веде від процесу електрохімічного полірування, запропонованого в 1911 р. російським хіміком Шпітальським Є. І.

Розробка основ електрохімічного методу і технологічного його застосування належить Гусеву В. М. У 1929 р. він отримав патент на ЕХО. Перші досліди з розмірного електрохімічного оброблення металів були проведені в 40-х роках минулого століття.

Значні успіхи в розвитку теорії та вдосконаленні технології були досягнуті завдяки роботам Петрова Ю. М., Мороза І. І., Гостева В. В. [51] та ін.

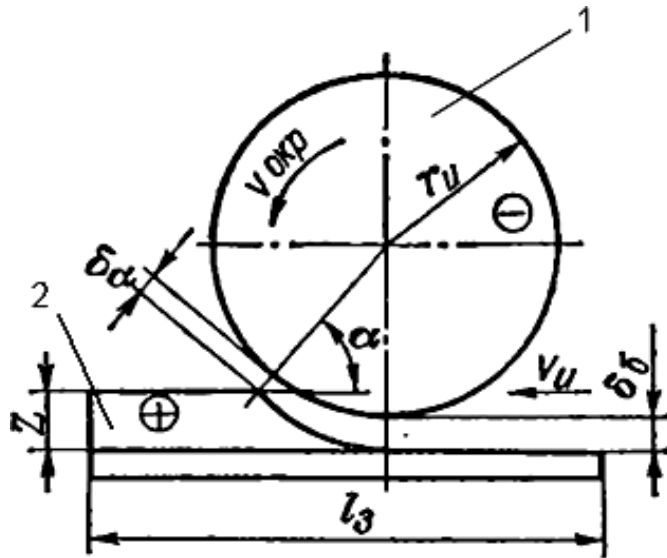
Процес електрохімічного шліфування (ЕХШ) забезпечує зняття припуску в результаті анодного (електрохімічного) розчинення, механічного та електроерозійного впливу на нього. Механічний вплив полягає у видаленні продуктів розчинення зернами шліфувального круга, а також мікрорізання поверхневого шару. Зерна шліфувального круга, які виступають з електропровідної зв'язки, створюють міжелектродний зазор між зв'язкою (катодом) і поверхнею оброблюваної деталі (анодом) [57].

У процесі ЕХШ постійний струм від круга 1 (рис. 3.28) до деталі 2 протікає через шар робочої рідини (електроліту), що займає простір між зернами круга.

При цьому в зоні оброблення відбувається дисоціація атомів оброблюваного матеріалу, що забезпечує анодне розчинення його найтоншого шару, з утворенням на поверхні окисної анодної плівки. Зерна шліфувального круга безперервно видаляють цю плівку.

Безперервне утворення і видалення анодної плівки зернами круга забезпечує високу інтенсивність знімання металу.

Частина електрохімічного знімання металу залежить від факторів: сили струму, опору міжелектродного проміжку, металевої зв'язки круга, розміру абразивних (алмазних) зерен, складу електроліту та ін.



1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка  
Рисунок 3.28 – Схема електрохімічного шліфування

Шорсткість поверхні при ЕХШ менше, ніж при звичайному алмазно-абразивному шліфуванні, і практично не залежить від зернистості круга.

На продуктивність ЕХШ впливає електропровідність електроліту і його склад. У виробництві найчастіше використовуються водні розчини солей натрію, наприклад  $\text{NaNO}_3$  – 6%,  $\text{NaNO}_2$  – 2%.

У порівнянні зі звичайним абразивно-алмазним шліфуванням продуктивність ЕХШ підвищується в 2...3 рази, скорочується витрата кругів у 3 рази. Продуктивність до  $1\,000\text{ мм}^3/\text{хв}$  при шорсткості поверхні до  $Ra = 0,32\text{...}0,08\text{ мкм}$ . За рахунок підвищення якості оброблених поверхонь і відсутності шару на різальних поверхнях заточеного інструменту на 30 % підвищується його стійкість.

Механічні режими ЕХШ: швидкість шліфувального круга знаходиться в інтервалі 25...30 м/с, величина питомого тиску 5...10  $\text{кг}/\text{см}^2$ , швидкість поздовжнього переміщення деталі щодо круга 4...6 м/хв [61].

Переваги ЕХШ у порівнянні з традиційними способами шліфування: виключаються скоси і тріщини при обробці крихких сплавів (типу ЮНДК35Т5), припікання при обробці нержавіючих сталей (типу 12Х18Н9Т), різко підвищується продуктивність при шліфуванні твердих сплавів (типу ВК) [62].

Питомі витрати енергії на різання в умовах ЕХШ у 2,5...3 рази нижче при обробці твердих сплавів і в 1,2...1,5 рази – при обробці сталей, ніж при звичайній алмазно-абразивній обробці. Зменшення сили різання і температури в зоні оброблення при високій продуктивності знімання металу визначили область використання ЕХШ. Цей спосіб широко застосовується при обробці твердосплавного інструменту на всіх стадіях його механічного оброблення – операціях чорнового, чистового і доводочного шліфування [61].

У роботі [50] приведена аналітична модель ЕХШ у вигляді лінійних феноменологічних рівнянь:

$$\begin{aligned} n^0 &= L_{11} \frac{\Delta \tau}{\alpha} + L_{12} \eta + L_{13} \Delta \sigma_m ; \\ i &= L_{21} \frac{\Delta \tau}{\alpha} + L_{22} \eta + L_{23} \Delta \sigma_m ; \\ \bar{j}_{sm} &= L_{31} \frac{\Delta \tau}{\alpha} + L_{32} \eta + L_{33} \Delta \sigma_m , \end{aligned}$$

де  $L_{11}, L_{12}, L_{13}$  – феноменологічні коефіцієнти, які знаходять експериментально;

$n^0$  – щільність потоку дислокацій, обумовленого пластичною деформацією;

$\dot{i}$  – щільність струму;

$\bar{j}_{sm}$  – швидкість зміни вільної поверхні окисованого металу;

$\Delta \tau$  – зміцнення металу;

$\eta$  – перенапруження анодної реакції;

$\Delta \sigma_m$  – зміна поверхневої енергії окисованого металу.

В роботі [62] визначено такі залежності:

1. Швидкість оброблення при ЕХШ визначається за формулою

$$V_u = \frac{k_v \chi_{\text{эф}} \eta_a (U_{\text{э}} - \Delta \varphi) r_u}{\delta_{\alpha} \sqrt{2r_u z - z^2}},$$

де  $k_v$  – об'ємний електрохімічний еквівалент;

$\chi_{\text{эф}}$  – ефективна питома електропровідність електроліту, що підводиться до МЕР;

$\eta_a$  – коефіцієнт виходу металу по струму;

$U_{\text{э}}$  – ефективна напруга;

$\Delta \varphi$  – сума електропровідних потенціалів;

$r_u$  – радіус шліфувального круга;

$\delta_{\alpha}$  – значення міжелектродного зазору (МЕЗ);

$z$  – припуск заготовки.

2. Тривалість ЕХШ визначається за формулою

$$\tau_{\text{э}} = l_{\text{э}} + 2\sqrt{2r_u - z^2} / V_u,$$

де  $l_{\text{э}}$  – довжина оброблюваної поверхні заготовки.

На думку авторів статті [60], металізовані абразивні круги на керамічній зв'язці здатні конкурувати з алмазними. При цьому електрохімічне шліфування (порівняно із звичайним шліфуванням) дозволяє в кілька разів підвищити продуктивність оброблення.

Анодно-абразивне оброблення (ААО) [54] є чистовим комбінованим методом, при якому механічна дія здійснюється абразивним інструментом. Найбільш поширеним видом цього оброблення є анодно-механічне шліфування. Електропровідний шліфувальний круг, що складається з абразивних зерен, електропровідного наповнювача і зв'язки, з'єднується за допомогою ковзного контакту з негативним полюсом джерела постійного струму, тобто круг одночасно є катодом і різальним інструментом. Заготовка слугує анодом. У зазор між оброблюваним металом і кругом через форсунку подається електроліт. Електропровідні абразиви отримують заповненням розплавленим металом пір звичайних шліфувальних кругів на керамічній зв'язці, осадженням металів і їх солей в пори шліфувального круга або виготовленням абразивних інструментів на електропровідній зв'язці. Електроліти являють собою водні розчини калієвої або натрієвої селітри з добавками нітриту натрію як інгібітору корозії, наприклад 5...10 %-й водний розчин. Основний робочий процес при анодно-абразивній обробці обумовлений наступним фізико-хімічними механізмом:

- 1) анодне розчинення зрізаного шару, що призводить до зняття частини металу й утворення плівки;
- 2) нагрівання матеріалу зрізаного шару внаслідок пропускання постійного струму і періодичних коротких розрядів через зону оброблення, яка має значний опір;
- 3) електроерозійне руйнування, що проявляється у вигляді слабкого іскріння (навіть при обробці на м'яких режимах);
- 4) механічне зрізання металу, попередньо розм'якшеного анодним впливом, тепловим і електроерозійним процесом.

При застосуванні анодно-абразивного шліфування (ААШ) порівняно із звичайним шліфуванням знижується параметр шорсткості, виходить дзеркально-блискуча поверхня з  $Ra = 0,04...0,16$  мкм при малому рівні структурних змін і достатніх напруг.

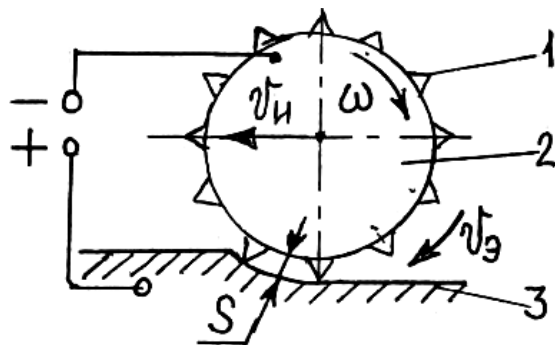
Перевагою ААШ порівняно із звичайним шліфуванням є відсутність значного тепловиділення, тому в поверхневому шарі не виникають значні структурні перетворення і внутрішні напруження. Працездатність шліфувального круга підтримується його самозаточуванням у процесі оброблення, яке відбувається внаслідок викришування виступаючих чи сильно зношених абразивних зерен, а також порушення зв'язки і наповнювача при електричних розрядах. Ці процеси зумовлюють отримання малих високих параметрів шорсткості поверхні, чому значно сприяє анодне розчинення виступаючих мікронерівностей поверхні.

ААШ слід виконувати при невеликому тиску, великих швидкостях різання і інтенсивному відносному русі заготовки та інструмента (подвійних ходах).

Розрізняють декілька різновидів використання ААО:

- 1) абразивонесучим струмопровідним інструментом;
- 2) електронейтральним інструментом;
- 3) вільним абразивом.

На рис. 3.29 наведена схема анодно-абразивного шліфування абразивонесучим струмопровідним інструментом.



*1 – абразивне зерно; 2 – інструмент (круг); 3 – заготовка*  
Рисунок 3.29 – Схема анодно-абразивного шліфування абразивонесучим струмопровідним інструментом

При шліфуванні інструмент 2 виконаний у формі абразивного або алмазного круга на металевій зв'язці. Абразивні зерна 1 можуть бути рівномірно розподілені по всьому об'єму інструмента 2 або розташовуватися тільки на його поверхні.

Алмазні зерна зазвичай закріплюють у формі кільця на зовнішній окружності інструмента або вдавлюють їх у зовнішню поверхню оправки. Інструмент 2 і заготовку 3 підключають до полюсів джерела живлення. У процесі оброблення інструмент обертають і подають на врізання зі швидкістю  $V_u$ . Міжелектродний зазор  $S$  обмежений виступом зерен абразиву 1, тому немає необхідності застосовувати складні системи, що стежать, для підтримки постійних зазорів.

Електроліт подають поливом на поверхню або прокачують через внутрішню порожнину інструмента. В останньому випадку він повинен мати пори для протікання рідини. Завдяки обертанню інструмента електроліт протікає через зазор зі швидкістю до 15...20 м/с.

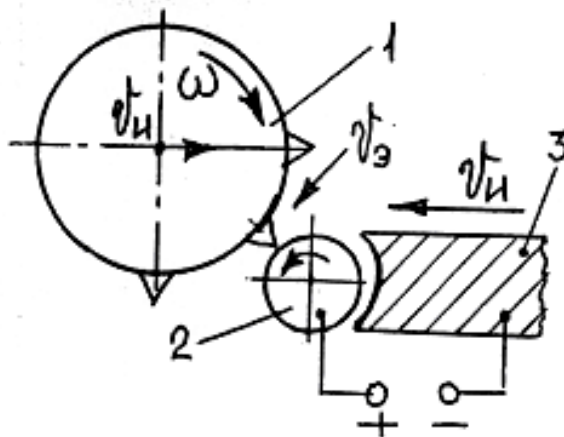
Отже, в просторі між інструментом 2 і заготовкою 3 є всі умови для інтенсивного процесу ЕХО: малі зазори, достатня швидкість протікання електроліту, можливість протікання струму.

Виступаючі зерна залежно від зусилля притиску інструмента до заготовки видаляються, зрізується як матеріал заготовки, так і продукти анодного розчинення.

У другому випадку (рис. 3.30), коли використовують діелектричний абразивний круг 1, то напругу подають на спеціальний електрод –



інструмент 3. Такий різновид методу називають ААО з електронейтральним інструментом.

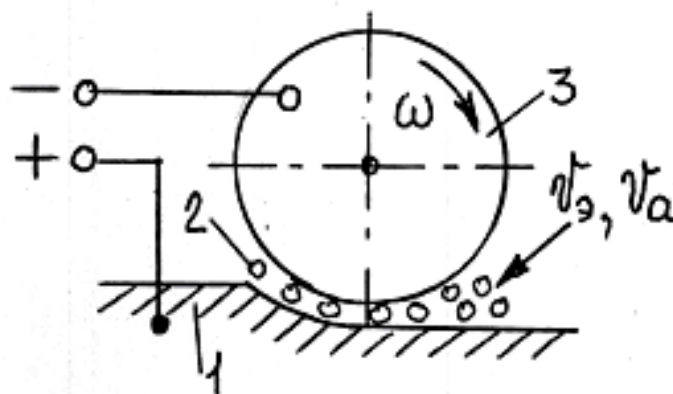


1 – абразивний круг; 2 – заготовка; 3 – електроінструмент

Рисунок 3.30 – Схема анодно-абразивного шліфування електронейтральним інструментом

ААО електронейтральним інструментом може застосовуватися для шліфування, полірування, притирання, хонінгування, суперфінішних операцій. Необхідні спеціальні пристрої для підтримки зазору між електродом-інструментом 3 та заготовкою 2. Із цією метою зазвичай використовують діелектричні упори. При шліфуванні абразивний інструмент (круг) 1 має швидкість до 25...30 м/с. Круг і електрод-інструмент 3 подають до заготовки 2 зі швидкістю  $V_u$ . Електроліт надходить через зазор зі швидкістю  $V_э$ . Процес знімання металу протікає за рахунок абразивного знімання й анодного розчинення.

При ААО непов'язаним абразивом (рис. 3.31) абразивні зерна не пов'язані із заготовкою або інструментом. Їх називають вільними. Зерна можуть і не мати абразивних властивостей, тоді їх називають наповнювачем.



1 – заготовка; 2 – вільний абразив; 3 – інструмент

Рисунок 3.31 – Схема анодно-абразивного оброблення вільним абразивом

Абразивні зерна або наповнювач 2 разом з електролітом подають у зазор між струмопровідним інструментом 3 і заготовкою 1. Абразив переміщається інструментом зі швидкістю  $V_a$ , видаляє частину припуску і разом з електролітом виносить продукти анодного розчинення із зазору. Необхідний зазор підтримується абразивними зернами, що знаходяться між інструментом 3 та заготовкою 1. Якщо необхідно тільки видалити плівку, яка викликає пасивацію оброблюваної поверхні, застосовують наповнювач з порцелянових, скляних або пластмасових кульок, діаметр яких менше заданого значення зазору між інструментом і заготовкою [61].

Анодно-алмазне оброблення є різновидом ААО. Найбільш широко застосовують анодно-алмазне шліфування (ААлШ). Його здійснюють струмопровідними алмазними кругами в середовищі електроліту. Цей метод поєднує високу швидкість електрохімічного розчинення, обумовлену великими поверхневими щільностями струму (до  $200 \text{ А/см}^2$ ) і малими зазорами, з алмазним шліфуванням, що забезпечує інтенсивне видалення продуктів розчинення. Низька напруга знижує інтенсивність ерозійних руйнувань. Це дозволяє отримувати низькі параметри шорсткості поверхні при великій продуктивності оброблення.

Електроалмазне шліфування – комбінований метод оброблення, заснований на керованому мікроруйнуванні оброблюваного матеріалу в електричному полі при одночасній дії алмазних зерен шліфувального круга, електролітичного розчинення й електроерозії [50].

На рис. 3.32 показана схема електроабразивного круглого шліфування.

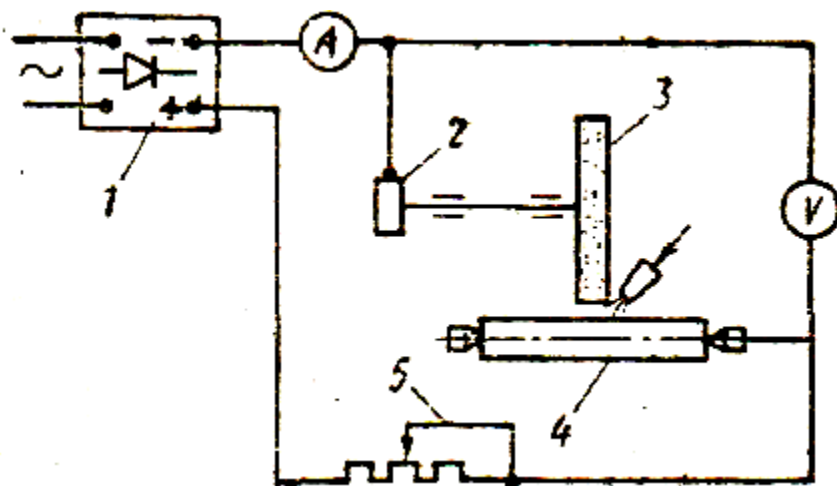


Рисунок 3.32 – Схема електроабразивного круглого шліфування

Струмопровідний абразивний круг 3 контактом, що ковзає, 2 з'єднаний з негативним полюсом джерела 1 постійного струму. Оброблювана заготовка 4 приєднується до позитивного полюса. Резистор 5 дозволяє регулювати силу струму в ланцюзі. У зону оброблення подається електроліт, що має високу локалізацію процесу розчинення, наприклад,  $\text{NaNO}_3$  – 6 %,  $\text{NaNO}_2$  – 2 %.

На рис. 3.33 показана схема процесу електроабразивного оброблення.

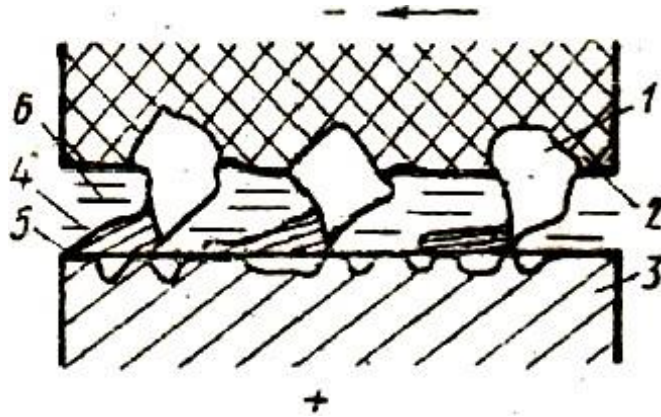


Рисунок 3.33 – Схема процесу електроабразивного оброблення

Електроабразивний круг складається з абразивних зерен 1 і зв'язки 2. У зазор 4, утворений абразивними зернами, безперервно подається робоча рідина 6. При проходженні електричного струму заготовка-анод 3 піддається анодному розчиненню з утворенням плівки 5 з високим електричним опором. При обертанні круга абразивні зерна видаляють продукти анодного розчинення із заготовки і захоплюють частинки електроліту, безперервно оновлюючи його в робочій зоні. Міжелектродний зазор між анодом і катодом забезпечується абразивними (алмазними) діелектричними зернами. У зазор подається електроліт, що містить вільні іони натрію, нітрату, гідроксилу та ін. Під впливом електричного струму посилюється дисоціація молекул електроліту і хімічна взаємодія вільних іонів з анодом. У результаті на катоді виділяється водень, а на деталях утворюється плівка оксидів і гідратів окислів металу-анода.

Плівка, що утворюється на поверхні деталі, пасивує електрод і гальмує процес подальшого розчинення анода. Однак абразивні зерна катода, що обертається з великою швидкістю, руйнують цю плівку, і процес анодного розчинення оброблюваної деталі триває. У процесі оброблення струмопровідна зв'язка шліфувального круга може торкатися поверхні деталі, що оброблюється. При цьому в точці дотику виникають контактні-дугові (ерозійні) розряди, вони частково приймають участь у руйнуванні дотичних електродів [61].

Електроабразивне оброблення застосовується для оздоблювального оброблення заготовок із важкооброблюваних матеріалів, а також нежорстких заготовок, тому що сили різання тут незначні. При цьому методі оброблення відсутні припіки оброблюваної поверхні.

Продуктивність ЕАШ визначається за формулою

$$Q_{\text{ЕАШ}} = Q_M + Q_{\text{ЭХ}} + Q_{\text{ЭФ}} + Q_{\text{С.В}},$$

де  $Q_M$  – продуктивність, обумовлена різанням алмазними зернами;

$Q_{\text{ЭХ}}$  – електрохімічна складова оброблення;

$Q_{\text{ЭФ}}$  – продуктивність, обумовлена електрофізичним впливом на оброблювану поверхню;

$Q_{\text{С.В}}$  – продуктивність, визначається спільним впливом перерахованих факторів.

Найбільш перспективним можна вважати електроалмазне шліфування виробів з одночасним автономним електролітичним керуванням рельєфом алмазного круга [72]. Цей метод забезпечує високу продуктивність і якість обробленої поверхні.

Винахід застосовується для електроабразивного шліфування. На оправці закріплені частини корпусу, по периметру яких розташований компенсатор, а у виїмках – порожнисті сферичні абразивні елементи. Корпус і оброблювана деталь підключені відповідно до негативного і позитивного полюсів джерела живлення. Технологічна рідина подається в зону оброблення через отвори в оправці. Подвійне проходження рідини через стінки абразивних елементів забезпечує високий ступінь її очищення, що покращує умови оброблення, а періодичний поворот сфер підвищує загальний період стійкості інструмента.

Досліджено процес електроабразивного чистового шліфування (ЕАШ) з використанням спеціальних струмопровідних кругів на органічних зв'язках, що допускають профільну правку звичайними правлячими засобами. Розглянуто закономірності утворення похибок при чистовому ЕАШ плоских і профільних поверхонь, а також приклади ефективного застосування процесу в авіадвигунобудівництві і перспективи його подальшого вдосконалення та застосування в технологіях виготовлення високо-температурних відповідальних деталей авіаційних та енергетичних ВМД.

Результати досліджень показали, що для отримання необхідної величини шорсткості поверхні в ході електроабразивного шліфування необхідно визначити оптимальні значення електричних і механічних параметрів оброблення.

*Електроерозійне абразивне й алмазне шліфування.* Електроерозійне оброблення (ЕЕО) полягає в зміні форми, розмірів, шорсткості і властивостей поверхні заготовки під впливом електричних розрядів у результаті електричної ерозії (ГОСТ 25331–82).

Електроерозійний спосіб оброблення був відкритий Лазаренко Б. Р. і Лазаренко Н. І. Спосіб алмазного електроерозійного шліфування вперше був запропонований у 1976 р. і досліджений у Харківському політехнічному інституті групою вчених під керівництвом Беззубенко Н. К. Подальший розвиток метода був здійснений у роботах лабораторії абразивного оброблення ЕНДМВ під керівництвом Гродзинського Е. Я. [52].

В основі лежить контакт-ерозійний вплив на абразивний інструмент. Сутність контакт-ерозійної взаємодії зводиться до механічного контактування абразивного струмопровідного інструмента з металом, замикання електродів продуктами шліфування по локальним плямам контакту зв'язки

з металом, розплавлення контактних містків наскрізним струмом, утворення розрядів і подальших електроерозійних явищ.

Процес алмазного шліфування з уведенням електророзрядного струму в зону різання називається алмазним контактним-ерозійним шліфуванням (АКЕШ).

Суть методу полягає в тому, що абразивний інструмент і деталь підключають до полюсів технологічного джерела імпульсного струму і збуджують між ними в зоні різання імпульсні електричні розряди. Обробку ведуть в діелектричному рідкому середовищі, причому деталь використовують якправлячий електрод. Цей спосіб шліфування був поширений з огляду помітного підвищення ріжучої здатності абразивного інструмента протягом значного часу експлуатації. Останнє обумовлено впливом електричних розрядів на зв'язку інструмента, що забезпечує постійне оголення абразивних зерен і усунення засолювання міжзернового простору. Крім того, алмазне електроерозійне шліфування має ряд інших експлуатаційних переваг. Так, замість електролітів, застосовуваних при алмазному електрохімічному шліфуванні, в даному випадку використовують водні розчини МОР. Для реалізації процесу потрібна менша вихідна потужність джерела струму [59].

Схема електроерозійного шліфування наведена на рисунку 3.34.

Металевий електрод-інструмент 1 у формі диска здійснює обертовий і поступальний рух до заготовки 2 зі швидкістю  $V_m$ . Заготовка може обертатися так, як показано на рисунку 3.34. Рідину подають поливом з насадки 3. Інструмент – чавунний або мідний диск. Обробку ведуть на постійному або змінному струмі. Використовувана напруга – 10...40 В.

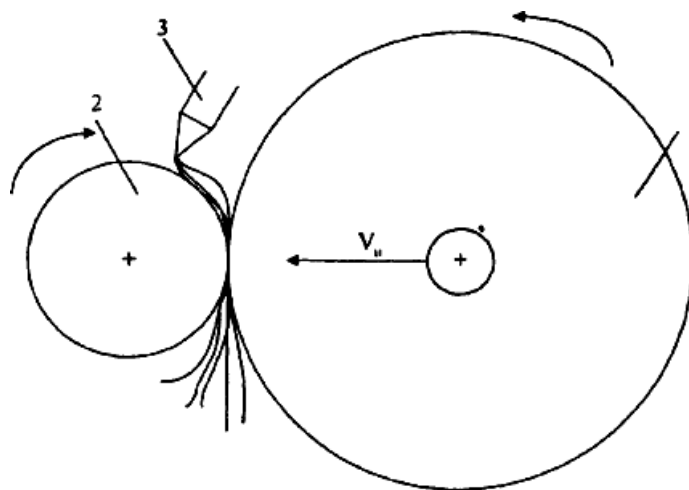


Рисунок 3.34 – Схема електроерозійного шліфування

Процес електроерозійного шліфування застосовують для чистового оброблення важкооброблюваних матеріалів, магнітних та твердих сплавів. Відхилення розмірів профілю після електроерозійного шліфування знаходиться в межах від 0,005 до 0,05 мм, шорсткість  $Ra = 2,5...0,25$  мкм, продуктивність складає  $260 \text{ мм}^3/\text{хв}$ .

Наближений розрахунок технологічних характеристик ЕЕО [62]:

1. Зв'язок між параметром шорсткості  $R_z$  і енергією імпульсу визначається за формулою

$$R_z = \frac{\beta^2}{3} k_4^3 \sqrt{W_u},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт перекриття лунок, що характеризує ступінь накладення лунок один на одного;

$k_4$  – постійна величина, яка не залежить від тривалості та енергії імпульсу;

$W_u$  – енергія імпульсу.

2. Оптимальна тривалість імпульсу  $\tau_u$  при енергії імпульсу  $W_u = const$  визначається за формулою

$$\tau_u = \frac{4}{\pi} \frac{[k_4 c \rho t_{nl} (1 + \frac{q_{nl}}{ct})]_{nl}^2}{B_0^2} \times W_u^{2/3},$$

де  $C$  – теплоємність, Дж/К;

$\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{nl}$  – температура плавлення матеріалу, °С;

$q_{nl}$  – тепловий потік, Вт;

$B_0$  – коефіцієнт, що залежить від теплофізичних констант.

3. Продуктивність оброблення розраховується за формулою

$$Q = k_5 f W_u,$$

де  $k_5$  – коефіцієнт;

$f$  – частота проходження імпульсів, с<sup>-1</sup>.

4. Зона термічного впливу визначається за формулою

$$h_c = 4\sqrt{\pi a_1 \tau_u} - R_z,$$

де  $a_1 = \lambda_T / (c\rho)$ ;

$\tau_u$  – тривалість імпульсів, мкс.

Винахід може бути використано при електрофізичній обробці струмопровідних матеріалів. При накладенні імпульсів технологічного струму між електродами і деталлю, що обертається, між ними подають струм

мінерального масла. Підвищення якості оброблення і ККД процесу досягають тим, що між електродами створюють питомий тиск до 0,5 МПа, амплітудні значення напруги підтримують на рівні від 1 до 50 кВ, а струму – від 1 мкА до 100 мА.

Метою роботи [58] є розробка методів стабілізації вихідних параметрів при шліфуванні важкооброблюваних матеріалів залежно від фізичних явищ, які викликають погіршення різальної здатності робочої поверхні круга, за допомогою електроерозійних впливів на неї. Запропонований метод визначення оптимальних режимів шліфування з електроерозійними впливами на РПК дозволяє до 6 разів зменшити трудомісткість їх пошуку та розповсюдити на шліфування за жорсткою схемою. Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими впливами на РПК при обробці ванадієвих інструментальних сталей зі збільшеними дугами контактування круга із заготовкою дозволяє збільшити продуктивність оброблення до 5 разів і знизити собівартість оброблення в 2,2...4 рази.

*Рекомендації щодо підвищення якості та продуктивності алмазного контактано-ерозійного шліфування важкооброблюваних матеріалів.* Абразивне оброблення є одним з основних методів отримання точних поверхонь деталей машин. Беручи до уваги, що вимоги до точності деталей машин постійно підвищуються, стає явною перспективність розвитку процесів абразивного оброблення. Їх універсальність і гнучкість забезпечує їм переваги перед іншими способами отримання точних поверхонь деталей машин.

Найбільш ефективним методом є комбіноване абразивне оброблення, засноване на використанні еластичної зв'язки або незакріпленого абразиву. Одним з перспективних способів забезпечення високої якості робочої поверхні є технологія магнітно-абразивного оброблення. Це метод простий у здійсненні, екологічно чистий, забезпечує високу якість оброблених поверхонь деталей, має високу продуктивність і успішно замінює процеси хімічного та електрохімічного оброблення.

Однак основні технологічні закономірності застосування цього методу при обробці поверхонь недостатньо вивчені. У цьому аспекті є необхідність у подальшому розвитку досліджень у цій області, розробках нових способів комбінованого абразивного оброблення, що забезпечують високу продуктивність при досягненні заданої якості поверхні і високих експлуатаційних властивостей. Результатами реалізації інженерних рішень є нововведення або інновації. До таких нововведень у галузі технологічних процесів відносять технологію електромагнітно-абразивного оброблення.

Таким чином, розробка наукових основ електромагнітно-абразивного оброблення, технологічних принципів його формування та їх реалізація є актуальною проблемою, вирішення якої має велике теоретичне і практичне значення.

Предметом досліджень є управління якістю оброблення деталей шляхом оптимізації технологічних режимів електромагнітно-абразивного оброблення.

Методика досліджень [56] передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості і шорсткості після електромагнітно-абразивного оброблення з одночасним нанесенням на поверхню зносостійкого покриття.

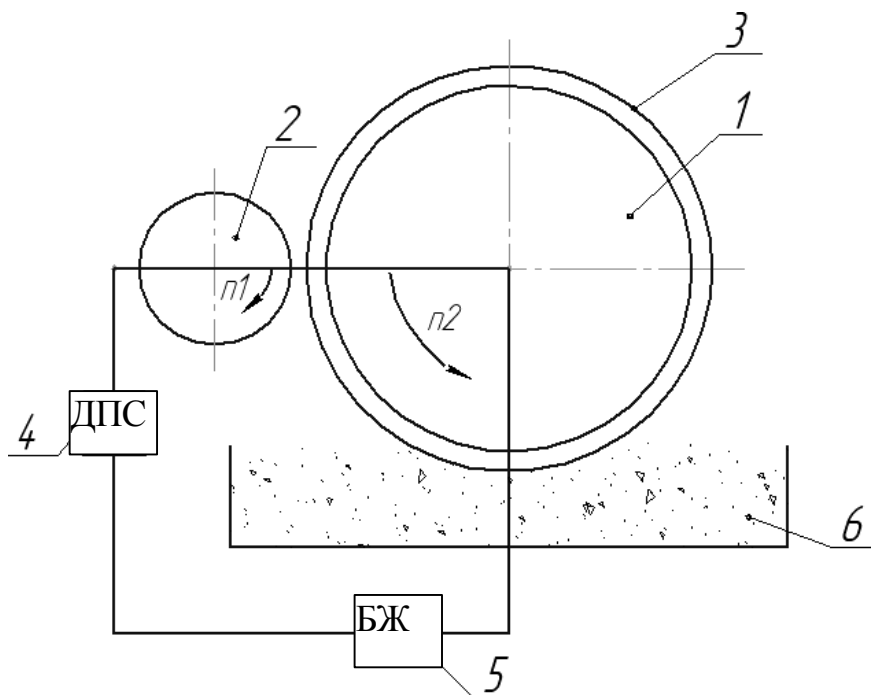
Експериментальна установка складається з наступного обладнання:

– токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625;

– блок живлення зі структурними характеристиками: сила струму

$I = 0 \dots 2,5 \text{ A}$ ; напруга  $U = 0 \dots 30 \text{ В}$ .

Схема експериментальної установки для електромагнітно-абразивного оброблення представлена на рис. 3.35.



1 – магніт; 2 – заготовка; 3 – барабан; 4 – двигун постійного струму (ДПС); 5 – блок живлення; 6 – тара з абразивом і алюмінієвою пудрою

Рисунок 3.35 – Схема експериментальної установки

Детальніше експериментальна установка для проведення електромагнітно-абразивного оброблення наведена на рисунку 3.36, а...в.

Для проведення експерименту використовуються дві заготовки: сталь 40Х і сталь 05 кп.

Приймаються наступні змінювані фактори:

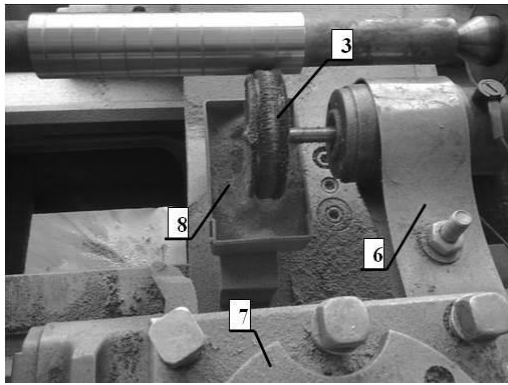
– сила струму  $0 \dots +2 \text{ A}$ ;

– лінійна швидкість  $107 \dots 295 \text{ м/хв}$ ;

– час оброблення  $5 \dots 15 \text{ хв}$ ;

– процентний вміст алюмінієвої пудри ПАП ГОСТ 2494–71  $10 \dots 50 \%$ .

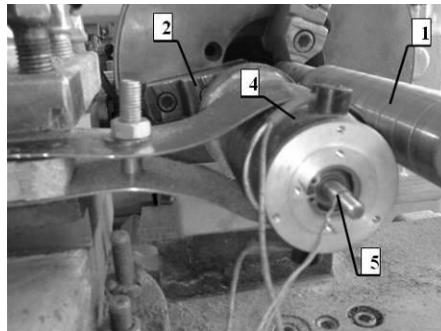




а)



б)



в)

1 – заготовка (сталь 40Х); 2 – патрон ГОСТ 2675-80; 3 – барабан;  
 4 – двигун постійного струму (ДПС); 5 – струмознімач; 6 – тримач;  
 7 – різцетримач; 8 – тара з абразивним порошком і Al пудрою  
 Рисунок 3.36 – Експериментальна установка для електромагнітно-абразивного оброблення

В якості різального інструменту застосовується барабан з магнітом діаметром 75 мм.

Зміст алюмінієвого порошку у феромагнітній абразивній масі знаходиться в межах 10...50 % (мас).

Вимірювання твердості поверхневого шару заготовки після оброблення виконуємо за допомогою електронного твердоміра малогабаритного ЕТМ-01.

Вимірювання шорсткості поверхневого шару заготовки після оброблення виконуємо за допомогою електронного тестера TR-200.

Для проведення першого експерименту використовується заготовка зі сталі 40Х ГОСТ 4543–71, діаметр 40 мм, твердість 215 НВ, шорсткість  $R_a = 3,2$  мкм.

Обробку експериментальних даних і встановлення ступеня впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні виконаємо за допомогою методу нейросітьового моделювання. В якості входів приймемо технологічні режими (сила струму  $I$ , лінійна швидкість  $V_{\Sigma}$ , час оброблення  $t$ , процентний вміст  $Al$  в суміші), а в якості виходів по черзі – твердість НВ і шорсткість обробленої поверхні  $R_a$ .

За отриманими експериментальними даними виконаємо математичну обробку за допомогою програми NeuroPro для заготовок зі сталі 40X ГОСТ 4543–71 і 05кп ГОСТ 7417–75. У результаті нейросітьового моделювання отримано вербальні описи моделей залежностей твердості і шорсткості від режимів оброблення.

За допомогою нейросітьового моделювання отримано значущості входів, що показують, що в процесі зміцнення деталі зі сталі 40X найбільше впливає на твердість процентний вміст Al зі значимістю 1, найменше – сила струму зі значимістю 0,29, а на шорсткість найбільше впливає процентний вміст Al зі значимістю 1, найменше – лінійна швидкість оброблення зі значимістю 0,29. У процесі зміцнення деталі зі сталі 05кп найбільше впливає на твердість процентний вміст Al зі значимістю 1, найменше – лінійна швидкість оброблення зі значимістю 0,14, а на шорсткість найбільше впливає процентний вміст Al зі значимістю 1, найменше – сила струму зі значимістю 0,22.

За допомогою нейросітьового моделювання були отримані результати випробувань на нейросітьовій моделі при електромагнітно-абразивній обробці.

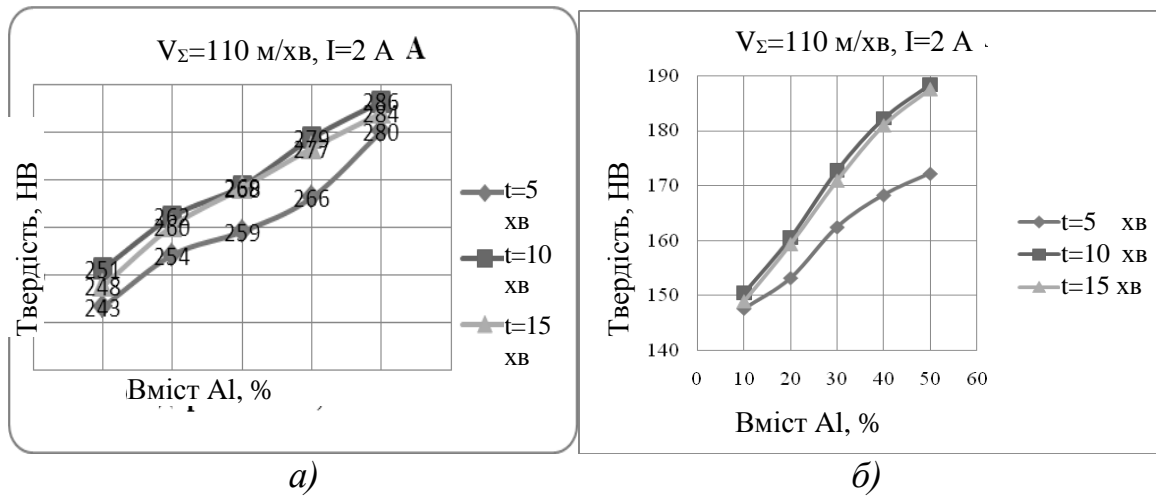
Оптимізацію технологічних режимів електромагнітно-абразивного оброблення здійснювали за допомогою модуля «Пошук рішення» програми Excel. Контрольованими параметрами були твердість і шорсткість оброблених поверхонь. Цей модуль дозволив простежити залежність твердості й шорсткості від режимів оброблення: вмісту алюмінію в суміші, часу оброблення, лінійної швидкості й сили струму. Знайдено оптимальні поєднання чинників для заданих величин твердості й шорсткості.

Таким чином, визначено технологічні можливості електромагнітно-абразивного оброблення на низьковуглецевій сталі: отримання твердості поверхні в інтервалі 137...193 НВ, шорсткості в інтервалі  $Ra = 1,78...1,1$  мкм; на легованій сталі: твердості поверхні в інтервалі 231...297 НВ, шорсткості в інтервалі  $Ra = 1,42...0,69$  мкм.

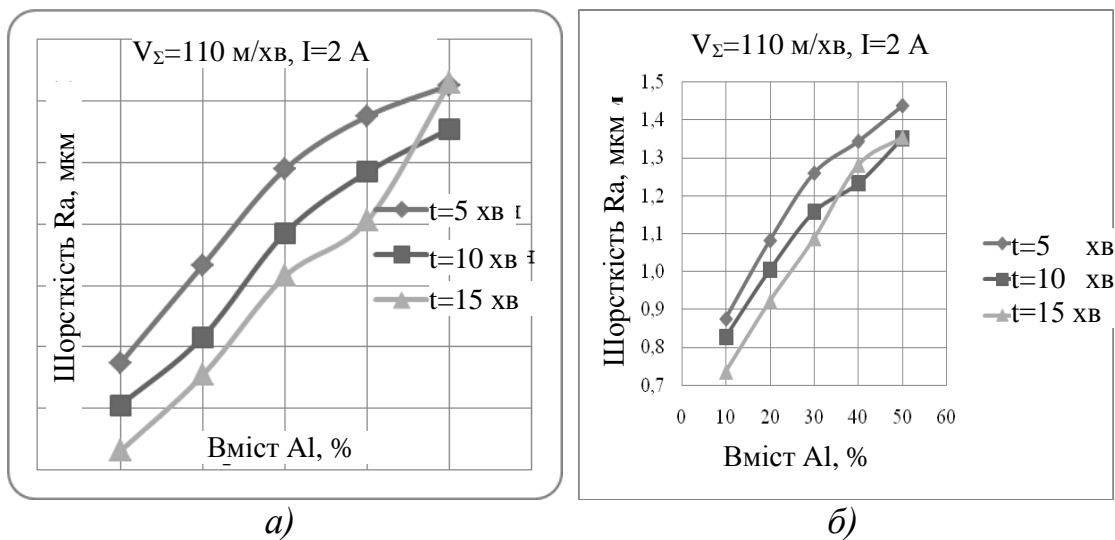
Визначимо технологічні можливості електромагнітно-абразивного оброблення, проаналізувавши залежності (рис. 3.37, 3.38).

Аналізуючи графічні залежності (див. рис. 3.37), в порівнянні з базовою твердістю 215 НВ (сталь 40X) і 130 НВ (сталь 05кп), вміст алюмінію позитивно впливає на твердість. При збільшенні вмісту алюмінію – твердість збільшується. Найбільша твердість 286 НВ (сталь 40X) досягається при вмісті Al = 50 %,  $t = 10$  хв; твердість 188 НВ (сталь 05кп) – при вмісті Al = 50 %,  $t = 10$  хв і  $t = 15$  хв; найменша твердість – 243 НВ (сталь 40X) і 148 НВ (сталь 05кп) досягається при вмісті Al = 10 %,  $t = 5$  хв.

Аналізуючи графічні залежності (див. рис. 3.38), бачимо, що для заготовок зі сталі 40X і 05кп шорсткість поверхні при впливі алюмінію значно збільшується.



а – сталь 40X; б – сталь 05kp  
Рисунок 3.37 – Залежність твердості від вмісту алюмінію



а – сталь 40X; б – сталь 05kp  
Рисунок 3.38 – Залежність шорсткості від вмісту алюмінію

Найменша шорсткість  $R_a = 0,63$  мкм (сталь 40X) і  $R_a = 0,74$  мкм (сталь 05kp) досягається при вмісті Al = 10 %,  $t = 15$  хв; найбільша шорсткість  $R_a = 1,23$  мкм (сталь 40X) досягається при вмісті Al = 50 %,  $t = 5$  хв і  $t = 15$  хв;  $R_a = 1,44$  мкм (сталь 05kp) при: вміст Al = 50 %,  $t = 5$  хв [63-68].

### 3.4 Зміцнення поверхонь виробів у технологічному середовищі

Експлуатаційна надійність машин визначається в основному кількісним станом робочих поверхонь деталей, формованих на фінішних операціях технологічних процесів (напружено-деформований стан поверхневого шару, технологічні залишкові напруги, динаміка навантаження, фізико-механічні властивості матеріалу, макро- і мікрогеометрія, геометрична

точність). Наприклад, підвищення твердості деталей машин здійснюється різними технологічними методами, але вони занадто енергоємні, тривалі, конструкції для їх застосування займають занадто багато місця в цехах, витрачається маса робочої сили, майже всі ці методи спрямовані на зміцнення лише великогабаритних деталей і, до того ж, не завжди призводять до бажаного результату.

За допомогою створення коливань в пружному середовищі підвищується несуча здатність і, відповідно, експлуатаційна надійність деталей. Застосування такого оброблення в поєднанні із застосуванням вібрацій є досить перспективним напрямком, який відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями контактуючих поверхонь, а також підвищує продуктивність праці, знижує енерговитрати і покращує якість продукції, роблячи її більш конкурентоспроможною на світовому ринку, що є актуальним.

Працездатність машин значно залежить від зносостійкості деталей. Останнім часом встановлено, що 70 % виходу з ладу машин залежить від зношення деталей, тому зміцнення їх робочої поверхні відіграє особливу роль у забезпеченні ресурсу різних виробів.

Зміцнення в технології металів – це підвищення опірності матеріалу заготовки або виробу руйнуванню або залишковій деформації.

Зміцнення матеріалу заготовок і виробів досягається механічними, термічними, хімічними та іншими впливами, а також комбінованими способами (хіміко-термічними, термомеханічними та ін.). Найбільш поширений вид зміцнювального оброблення – поверхнєве пластичне деформування (ППД) – простий і ефективний спосіб підвищення несучої здатності і довговічності деталей машин і частин споруд, особливо що працюють в умовах знакозмінних навантажень (осі, вали, зубчасті колеса, підшипники, поршні, циліндри, зварні конструкції, інструменти тощо). Залежно від конструкції, властивостей матеріалу, розмірів і характеру експлуатаційних навантажень деталей застосовуються різні види ППД: накатка і розкочування роликami і кульками, обкатка зубчастими валками, алмазне вигладжування, дорнування, гідроабразивне, вібраційне, дробоструминне та ін. способи оброблення. Часто ППД, крім зміцнення, значно зменшує шорсткість поверхні, підвищує зносостійкість деталей, поліпшує їх зовнішній вигляд (зміцнювально-опоряджувальне оброблення). Зміцнення при термічній обробці металів забезпечується, зокрема, при загартуванні з наступним відпуском. Поліпшенню міцності значно сприяють і певні види термомеханічного оброблення (у т. ч. гарячий і холодний наклеп). Зміцнення хіміко-термічним впливом може здійснюватися шляхом азотування, ціанування, цементації, дифузійної металізації (насиченням поверхні деталі алюмінієм, хромом та ін. металами) [73].

Зміцнення забезпечується також застосуванням електрофізичних та електрохімічних методів оброблення: ультразвукового, електроерозійного, магнітоімпульсного, електрогідравлічного, електронно-променевого, фотонно-променевого, анодно-хімічного, електроіскрового, а також впливом

вибухової хвилі, лазера та ін. Зміцнювальне оброблення може бути поверхневим (наприклад, пластичне деформування з виникненням поверхневого наклепу), об'ємним (наприклад, ізотермічне гартування) і комбінованим (наприклад, термічне оброблення з наступним ППД). Об'ємне і поверхнево-зміцнювальне оброблення можуть вестися послідовно декількома методами.

Вібраційні методи оброблення та відповідні машини й обладнання за останній час набули широкого поширення в різних галузях народного господарства. Їх впровадження сприяє інтенсифікації різних процесів, підвищує рівень механізації і автоматизації багатьох трудомістких робіт, сприяє удосконаленню або розробці нових технологічних процесів, збільшує економічну ефективність і продуктивність праці.

Підвищена інтенсивність протікання процесів при наявності вібрацій обумовлюється характером впливу їх на оброблювані предмети і робоче середовище, можливістю оброблення одночасно всій поверхні великої кількості деталей. Вібраційне оброблення в технології машинобудування є новим, прогресивним напрямком, можливості якого й область застосування ще не повністю виявлені.

Широкі технологічні можливості цього методу в поєднанні з високою продуктивністю на очисних, доводочних, шліфувально-полірувальних і зміцнювальних операціях ставлять його в число найбільш актуальних і перспективних способів оброблення та зміцнення деталей машин і приладів.

У теперішній час фахівці різних галузей машинобудування ведуть дослідження в цій області; спільно з підприємствами ведуться роботи з промислового освоєння віброоброблення на різних операціях [73].

Поняття «вібраційна технологія» з'явилося порівняно недавно, десь у 60-і роки, як наслідок розвитку процесів, що використовують вібраційний вплив. Виникло це поняття в середовищі фахівців, що працюють в області технологічного використання низькочастотного спектру коливань. Воно відображає процеси, засновані на використанні коливань, що впливають на об'єкт оброблення як безпосередньо, так і (частіше) на обробні середовища та інструменти різних характеристик.

Загальна фізична природа, яка характеризує процеси вібраційної технології, досить складна і пов'язана з такими явищами, як удар, кавітація, абразивне зношування, багатоконтактна взаємодія оброблюваних предметів, хвильові процеси (взаємодія ударних хвиль з матеріалом або середовищем), адгезійні явища та ін. Вібраційна технологія ґрунтується на таких фундаментальних розділах фізики, як акустика, удар і ударні явища, коливання і хвилі, молекулярна акустика.

Незважаючи на вражаючі успіхи в розвитку теорії коливань і практики використання вібраційних процесів і пристроїв, інтерес до цієї проблеми не зменшується, а навпаки, ще більше посилюється. Це підтверджує актуальність проблеми, перспективи її розвитку, доцільність постановки та вирішення нових, більш масштабних завдань.

Руйнування деталей при досить інтенсивних вібраціях – це хоча і небажане, але зрозуміле явище. На жаль, руйнування може настати і поіншому. Безсумнівно, що найбільш неприємним наслідком вібрації може стати втома металу, армованої пластмаси або якого-небудь іншого конструкційного матеріалу. Такий тип руйнування зазвичай настільки ж катастрофічний, наскільки і несподіваний. Найчастіше втомне руйнування відіграє дуже підступну роль, так як зазвичай йому не передують будь-які сигнали про небезпеку, що насувається: деталь, яка успішно працювала в режимі вібрацій протягом деякого проміжку часу, потім раптово ламається. Незважаючи на багаторічні дослідження, причина цього явища досі повністю не з'ясована.

Область використання вібраційних технологій у різних галузях народного господарства досить багатогранна і має тенденцію до подальшого розширення. У технології машинобудування і приладобудування – це опереджувально-зачисне й опереджувально-зміцнювальне оброблення, вібраційне стабілізуюче оброблення, суміщені процеси оздоблювального оброблення і покриттів, мийка та сушка, транспортування, вдосконалення процесу складання, інтенсифікація гальванічних і хімічних процесів, втомні випробування матеріалів, зміна параметрів процесу і стану матеріалу та ін. У ряді випадків процеси вібраційного оброблення та транспортування поєднуються, і за продуктивністю така схема вібраційного оброблення виходить на рівень роторних схем оброблення.

У металургійному і ливарному виробництві – це вібрування рідкого металу, регенерація формувальних матеріалів, очищення заготовок і транспортування. У заготівельно-штампувальному виробництві – вібровигладжування і віброштампування.

Сьогодні у машинобудуванні досить широко поширене оброблення з накладенням вібрацій, особливо при виконанні оздоблювальних операцій – хонінгування, суперфінішування, доведення – притирання і полірування. Це такі процеси, як віброгалтування, віброполірування, які відносять до так званої віброабразивної обробки.

Вібраційне оброблення деталей в абразивному середовищі являє собою механічний або хіміко-механічний процес знімання матеріалу з оброблюваної поверхні частинками (гранулами, зернами) робочого середовища. Частинки робочого середовища здійснюють коливання, викликані дією вібрацій.

Розробки технологічного застосування коливань пояснюють їх доцільністю і економічністю. Можна сказати, що ефективність використання вібрацій в багатьох випадках пов'язана зі своєрідним проявом законів механіки в умовах вібраційного впливу на різні механічні системи.

Фізична природа хвильових процесів, пов'язаних з ударними явищами, досить складна, у зв'язку з чим значний інтерес становлять експериментальні дослідження. При аналізі цих результатів відзначено зміна мікротвердості і структури по перетину зразка. На відміну від статичного, при динамічному (віброударному) навантаженні осередки деформації

утворюються одночасно в багатьох зонах по перетину зразка: утворюються вузли, сітки, решітки з дислокацій, що мають як плоску, так і просторову орієнтацію. Відзначається зростання кількості й щільності дислокацій. У поверхні, що сприймає ударні імпульси, і у протилежної (вільної) відзначається підвищення мікротвердості [76].

При загальній оцінці вібраційне оброблення являє собою складний комплекс механо-фізико-хімічних явищ, що істотно впливають на стан на-самперед поверхні і поверхневого шару оброблюваної деталі або середовища, а за певних умов – і всього обсягу. Фізична сутність процесу характеризується комплексним впливом на оброблювані деталі та їх поверхню ряду факторів, викликаних вібрацією, і наявністю робочого середовища відповідної характеристики [78].

Вібраційне оброблення в залежності від характеру застосовуваного робочого середовища являє собою механічний або хіміко-механічний процес знімання найдрібніших частинок металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування частинками робочого середовища, які здійснюють у процесі роботи коливальний рух. Процес супроводжується послідовним нанесенням на поверхню оброблюваних деталей великого числа мікроударів частинками робочого середовища при їх взаємному зіткненні і ковзанні [79].

На швидкість циркуляційного руху робочого середовища впливає амплітуда і частота коливань. З їх збільшенням швидкість циркуляції робочого середовища зростає. Дещо менший вплив на швидкість циркуляції надає ряд інших факторів: кількість і характер застосовуваного розчину, грануляція і форма частинок робочого середовища, ступінь заповнення робочої камери та ін.

Динамічний вплив робочого середовища залежить від глибини занурення, відстані від стінок робочої камери, режимів вібрації (амплітуди і частоти коливань), розмірів і щільності частинок робочого середовища. Динамічний вплив робочого середовища і величина сил мікроударів окремих її частинок зростає із збільшенням амплітуди і частоти коливань, глибини занурення, розмірів і щільності частинок робочого середовища.

Формування поверхневого шару в процесі вібраційного оброблення відбувається під дією багаторазово повторюваних мікроударів частинок робочого середовища. Форма і розміри слідів оброблення визначаються характером робочого середовища, режимами оброблення і характеристикою оброблюваного матеріалу [80].

Існує кілька технологічних схем виконання процесу вібраційного оброблення:

- оброблення насухо або з циркуляцією розчину;
- оброблення вільно завантажених деталей порівняно невеликих розмірів з періодичним або безперервним їх завантаженням і розвантаженням;
- оброблення важких і великогабаритних деталей, закріплених у спеціальних пристроях;

– оброблення довгомірних деталей типу труб, прутків, профілів і дроту шляхом повільного проштовхування і протягування їх через вікна, виконані в стінках робочої камери.

Технологічні можливості вібраційного оброблення досить широкі і визначаються особливостями взаємодії робочого середовища з поверхнею оброблюваних деталей, режимами оброблення, характеристикою робочого середовища [77].

Поєднання таких елементів процесу, як послідовне нанесення безлічі мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища та оброблюваних деталей при різній їх взаємній орієнтації, супроводжуваних, залежно від характеристики і складу робочого середовища і режимів вібрування, зніманням металу, його оксидів і поверхневим пластичним деформуванням, створює умови для виконання операцій:

- очищення литих заготовок;
- видалення облою на заготовках з металів, пластмас і гуми;
- очищення деталей і заготовок від окалини і корозії;
- шліфування і полірування поверхні;
- видалення задирок;
- округлення і полірування гострих кромок;
- створення поверхневого наклепу, миття та сушіння деталей, очищення деталей від нагару, накипу і щільно прилеглого ґрунту при ремонті та ін.

Конструкція устаткування для вібраційного оброблення дозволяє розмішувати і застосовувати різні тверді, рідкі та змішані склади робочих середовищ. Це створює умови як для протікання процесів механічного оброблення (мікрорізання і пластичне деформування), так і фізико-хімічних процесів (хімічних реакцій, дифузії, адгезії, адсорбції) та їх суміщення шляхом уведення до складу робочого середовища відповідних порошкоподібних матеріалів, розчинів суспензій, електролітів [81].

Нові види вібраційного оброблення створені шляхом введення в робочу зону магнітного і теплового полів електрохімічного процесу та додавання оброблюваним деталям додаткових рухів.

На цій основі створені:

- шпindelьне вібраційне оброблення;
- віброобразивне електрохімічне оброблення;
- магнітовіброобразивне оброблення;
- вібраційне механотермічне оброблення.

Шпindelьне вібраційне оброблення являє собою процес оздоблювального оброблення поверхонь деталей, що контактують з робочим середовищем, що не передбачає зміни точності їх розмірів. Оброблення в залежності від характеристики робочого середовища здійснюється внаслідок знімання найдрібніших частинок металу, його оксидів або пластичного деформування оброблюваної поверхні в результаті відносного ковзання і зіткнення з досить точною високою швидкістю оброблюваної поверхні і



частинок робочого середовища. Шпindelне віброоброблення дозволяє здійснювати шліфувально-полірувальні, очисні, оздоблювально-зміцнювальні операції, видалення задирок та ін. [82].

З початку XXI століття вчені та інженери все більше винаходять різноманітні види віброоброблення для досягнення в науці й техніці необхідних результатів, ними отримано патенти за такими темами, як: моделювання вібрацій із застосуванням ЕОМ; оцінка ефективності трансформаційних змін низькочастотного вібраційного оброблення для зниження залишкових зварювальних напруг, стабілізації форми і розмірів зварних конструкцій; пристрій для контролю процесу вібростабілізації внутрішніх напружень; демпфер вібрації; аналіз реакції матеріалу на навантаження ультразвуковими вібраціями при точінні сплаву Inconel 718; використання вібрацій для зняття остаточних напруг [75].

Наукові розробки та дослідження носять багатогалузевий характер і мають тенденцію подальшого розвитку. Створені наукові заділи та досвід практичного застосування вібраційних технологій дають у свою чергу новий імпульс розвитку досліджень у цій області.

Сьогодні в машинобудуванні досить широко поширене оброблення з накладенням вібрацій, особливо при виконанні оздоблювальних операцій – хонінгування, суперфінішування, доведення-притирання і полірування. Це такі процеси, як віброгалтування, віброполірування, які відносять до так званого віброабразивного оброблення.

Вібраційне оброблення деталей в абразивному середовищі являє собою механічний або хіміко-механічний процес знімання матеріалу з оброблюваної поверхні частинками (гранулами, зернами) робочого середовища. Частинки робочого середовища здійснюють коливання, викликані дією вібрацій.

Застосовується метод механічного або хіміко-механічного оброблення деталей і заготовок шляхом згладжування мікронерівностей і знімання частинок матеріалу з оброблюваної поверхні частинками абразивного середовища, яке коливається під дією вібрації камери, в якій знаходяться оброблювані деталі і робоча середа. Обробку здійснюють у сухому середовищі або в розчині, до складу якого можуть вводитися різні хімічні добавки.

Вібраційну обробку застосовують для очищення литва, видалення окалини та продуктів корозії з поверхні заготовок і деталей, зняття задирок і округлення гострих кромek, видалення облоя з литих, штампованих і пресованих деталей, зменшення шорсткості поверхні (наприклад, віброшліфування), а також для підготовки поверхні під гальванічні і лакофарбові покриття, декоративне полірування та інші види обробки. У процесі вібраційного оброблення відбуваються також вирівнювання напружень у поверхневих шарах металу і зміцнення їх шляхом наклепу [85].

Процес вібраційного оброблення, здійснюваний з метою зниження шорсткості поверхні, або зміцнення поверхневого шару оброблюваних деталей проводиться за допомогою інструменту – робочого середовища, що складається з твердих частинок у вигляді сталевих кульок або абразивних

гранул і рідини – робочого розчину. В основному в якості робочого розчину використовується вода. Для підвищення продуктивності вібраційного оброблення можуть використовуватися різні хімічно-активні розчини, наприклад склад розчину, використовуваного для шліфування сталевих деталей, це – шавлева кислота, перекис водню, сірчана кислота; розчин для полірування сталевих деталей – сода кальцинована, триетаноламін, олеїнова кислота, їдкий калій [82].

Як відомо, однією з проблем, що виникають при вібраційній обробці, є проблема злипання деталей між собою і їх налипання на стінки контейнера. На процеси злипання і налипання деталей впливає ряд факторів, одним з яких є в'язкість робочого розчину, що застосовується при обробці. Як відомо, в'язкість проявляється при відносному русі сусідніх шарів рідини, що й повинно позначатися на русі одного зразка щодо іншого, бо за вібраційної обробки здійснюється відносний циркуляційний і пошаровий рух деталей або гранул відносно один одного в сусідніх шарах.

Розглянуто вплив в'язкості на процес злипання деталей на прикладі звичайних поверхнево-активних миючих засобів (ПАР), які мають досить високу щільність і в'язкість, на прикладі «Gala».

Найбільш поширеним методом оброблення вільними абразивами є вібраційне оброблення. Вібраційне оброблення в залежності від характеру застосовуваного робочого середовища являє собою механічний або хіміко-механічний процес знімання найдрібніших частинок і їх окислів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування частинками робочого середовища, які здійснюють в процесі роботи коливальний рух.

Вібрації і струси виливків під час затвердіння подрібнюють структуру металу, полегшують дегазацію злитку, змінюють характер ліквідації, підвищують механічні властивості, прискорюють кристалізацію, викликають у виливках з чавуну подрібнення графітових включень, сприяють заповненню тонких ребер в процесі лиття, підвищують щільність виливків.

Корисне застосування вібрація знайшла в порошковій металургії, завдяки чому вдалося отримати заготовки на 10...20 % щільніші, ніж при звичайному пресуванні високим статичним тиском, і знизити зусилля пресування. Використання вібрації при обробці металів тиском розширює технологічні можливості пластичної деформації [84].

Вібраційне навантаження знижує напруги деформування, збільшує пластичність металів; знижує залишкові напруги, забезпечує більш рівномірний розподіл деформацій і напруг, сприяє отриманню більш однорідної і дрібнозернистої структури. Такий вплив вібрації на технологічні і механічні властивості металів пояснюється зменшенням як внутрішніх, так і зовнішніх сил опору деформації, найбільш значною частиною яких є контактне тертя.

Практично верхня межа ультразвукових коливань відповідає частоті теплових коливань молекул речовини. Існують різні типи віброзбуджувачів – гідравлічні, пневматичні, електромагнітні, електромеханічні, гідродинамічні і магнітострикційні.

Для збудження високочастотних коливань використовують ультразвуковий генератор, потужність якого передається до магнітострикційного перетворювача. Властивості магнітострикції – зміни геометричних розмірів під дією магнітного поля – мають феромагнітні матеріали: залізо, кобальт, нікель, сплави на їх основі. З підвищенням температури магнітострикційний ефект зменшується і при температурі, що відповідає точці Кюрі, стає рівним нулю. Найкращим матеріалом є пермендюр, точка Кюрі якого відповідає 958 °С, а частота 20...60 кГц.

Основними параметрами ультразвукових хвиль є: частота, довжина хвилі і швидкість її поширення. Співвідношення між цими величинами виражається рівнянням ультразвукової хвилі, яка коротше звукової. Малою довжиною ультразвукових хвиль можна пояснити схожість у властивостях ультразвукових і світлових хвиль. Ультразвукові хвилі, так само, як і світлові, не розсіюються при поширенні, а утворюють вузькі пучки. Як і світлові промені, вони підкоряються законам геометричної оптики, можуть відбиватися, переломлюватися і фокусуватися [84].

Швидкість поширення ультразвукових коливань у різних середовищах різна і визначається пружними властивостями середовища і його щільністю. На швидкість поширення ультразвукових хвиль впливають такі фактори, як температура, тиск, наявність домішок та ін. Використання ультразвукових коливань у промислових цілях обмежується існуючими в даний час потужностями ультразвукових установок.

Застосовуючи вібрацію в процесах оброблення металів, необхідно враховувати разом з позитивними сторонами і недоліки методу. До них відносяться, перш за все, підвищена витрата енергії на деформацію, часткове знеміцнення матеріалу робочого інструменту, погіршення роботи технологічного устаткування внаслідок вібрації. Тому, визначаючи технологічні режими одержання виробів із застосуванням вібродеформації, слід зіставляти ефективність методу, як за окремими операціями, так і процесом в цілому.

Одним з найбільш ефективних видів вібраційних впливів, що використовуються в промислових цілях, є вібраційне об'ємне оброблення. Воно базується на використанні таких нових, що виявляються при впливі вібрації, фізичних та фізико-хімічних ефектах, як перетворення дії сил тяжкості, зниження ефективних сил сухого і в'язкого тертя, створення інерційного поля, вихорів і циркуляційних рухів в оброблюваних дисперсних середовищах, руйнування фізико-хімічних структур високо наповнених дисперсних систем, віброзрідження і віброкипіння дисперсних середовищ.

До вібраційної об'ємної обробки відносяться змішування в камерних змішувачах, подрібнення, мийка, гранулювання, формування, ущільнення і пресування виробів з бетону та інших матеріалів. Вібраційне об'ємне оброблення дуже широко застосовується при виконанні оздоблювально-зачищувальних робіт, наприклад при фінішній обробці сантехнічної арматури і зміцнювальних операціях [82].

Одними з основних у промисловості є процеси змішування сипучих, рідко-в'язких, пастоподібних і, в загальному випадку, різноманітних Т-Ж-Г дисперсних середовищ. При цьому особливі труднощі виникають при необхідності досягнення високої однорідності змішуваних багатокомпонентних високов'язких і жорстких дисперсних середовищ.

Серед різних форм механічних впливів на дисперсні системи в технологічних масообмінних процесах вібрація займає особливе місце, як найбільш ефективний засіб створення регульованого динамічного стану дисперсних систем. Головна відмітна особливість вібрації – можливість передачі системі енергії великої питомої потужності при малій амплітуді коливань. Разом з тим можливість регулювання параметрів вібрації в широких межах дозволяє поширити її дію, як на значні обсяги дисперсної системи, що переробляється, так і навпаки (у разі необхідності), обмежити найтоншим шаром в декілька мікрон, безпосередньо дотичним з поверхнею, яка генерує механічні коливання.

Застосування вібрації в процесах змішування доцільне в поєднанні з іншими видами безперервних механічних впливів, наприклад безперервним зсувом в процесі деформації двофазних пластично-в'язких систем. Розроблено камерні змішувачі вібраційного принципу дії, в яких процес змішування здійснюється в результаті циркуляційних рухів шарів суміші, що знаходиться у вібруючій камері змішувача. Для управління процесами циркуляції в камері встановлюються дефлектори.

Вібростабілізуюча обробка (ВО) великогабаритних деталей значно скорочує технологічний час порівняно з термічною обробкою (ТО) і забезпечує високу ефективність зниження залишкових напруг і стабілізацію геометричних розмірів великогабаритних зубчастих коліс, виготовлених з поковок, зварних конструкцій і лиття. Додатковою перевагою цієї технології є її екологічна чистота.

Поряд з перевагами економіко-екологічних факторів, суттєвою є і відмінність умов проведення вібростабілізуючої обробки в порівнянні з термостабілізацією. Перший спосіб виконується в умовах температури навколишнього середовища, і, відповідно, деталі не відчувають температурних деформацій.

Світова практика показала, що вдосконалення власного виробництва здійснюється на основі впровадження більш ефективних, більш гнучких сучасних технологій, а отже – відмови від застарілих технологій та нормативних документів.

Очевидно, що випуск конкурентоспроможної промислової продукції, що відповідає світовим стандартам якості, можливий при використанні у виробництві кращих світових досягнень науки і техніки, що дозволяють поряд з підвищенням якості скоротити енергетичні витрати і витрати на виробництво. В якості одного із шляхів для досягнення цієї мети пропонуємо використовувати екологічно чистий і безпечний технологічний процес вібростабілізуючого оброблення.

Вібростабілізуюче оброблення (ВСО) – найбільш сучасний, надійний і ефективний технологічний процес, заснований на світових досягненнях науки і техніки і призначений для заміни окремих видів термічного оброблення (ТО).

ВСО має такі переваги порівняно з ТО:

1. Витрати електроенергії на здійснення техпроцесу приблизно в 500...1 000 разів менше, ніж на ТО.

2. Тривалість техпроцесу ВСО (20...30 хв) дуже мала в порівнянні з ТО, на яке часом витрачається до 2...3 діб.

3. Вартість віброобладнання для ВСО мала не тільки в порівнянні з вартістю термічної печі, але навіть і в порівнянні з річною економією електроенергії.

4. Витрати з обслуговування та експлуатації обладнання для ВСО дуже малі в порівнянні з витратами на експлуатацію термічної печі.

5. Після ВСО забезпечується збереження зовнішнього вигляду виробів (фарбування, покриття, полірування тощо), а при ТО на поверхні виробу утворюється окалина, якість поверхні знижується.

6. Після ВСО зберігаються характеристики міцності металу, а при ТО відбувається зниження цих характеристик приблизно на 20 %.

7. ВСО дозволяє зняти залишкові напруги в конструкціях з різнорідних матеріалів, коли немає можливості застосувати ТО. Це відноситься до стільникових конструкцій, а також до деталей з поверхнями, підданими загартуванню СВЧ, СПЧ.

8. Відпадає необхідність у будівництві дорогих термічних печей.

9. Скорочується багато непродуктивних витрат, так як відпадає необхідність перевезення деталей для ТО в інші цехи або на інші підприємства, де є термічні печі відповідних габаритів. Це дозволяє поліпшити організацію виробництва, ритмічність роботи цехів, скоротити транспортні операції.

10. ВСО дозволяє зняти залишкові напруги в зварних конструкціях дуже великих габаритів, для яких немає відповідних за розмірами термічних печей. Тут слід зазначити, що вібростабілізуюче оброблення не замінює термічне при необхідності отримання заданої металургамі структури зерна в металі (мартеніт, аустеніт, перліт).

11. Застосування вібростабілізуючого методу дозволяє швидко виявити дефекти в зварних конструкціях і деталях (наприклад, невидимі оком небезпечні тріщини та інші дефекти). Це дозволяє запобігати поломкам і аваріям в процесі експлуатації деталей і конструкцій.

Крім того, при термічній обробці зазвичай виникають великі поводки (деформації) конструкцій і деталей в результаті нерівномірного нагрівання або охолодження. Це тягне за собою необхідність передбачати великі припуски на наступну механічну обробку і, як наслідок, збільшення витрати металу, обсягу верстатних робіт, витрати різального інструменту, електроенергії, витрат на оплату праці й т. п. [83].

Вібраційне оброблення та застосування пружного середовища залишаються прогресивними напрямками в машинобудуванні, можливості яких і область застосування ще не повністю виявлені.

Проблемами вібростабілізуючої обробки та шляхами їх раціонального вирішення займалися Ковалевський С. В. та Колот А. В.

Ковалевський С. В. спільно з колегами з Донецької академії автомобільного транспорту, Матвієнко С. А., Денщиківим О. Ю., Лукічовим О. В., досліджували моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнюючій віброобробці в пружному середовищі.

У зв'язку з тим, що в умовах ринкової економіки однією з умов збереження конкурентоспроможності продукції є використання ресурсозберігаючих технологічних процесів, одним з перспективних напрямів є застосування технологічної операції зміцнення, заснованої на віброобробці в пружному середовищі.

Експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні про підвищення твердості деталі після вібраційного оброблення в пружному середовищі (маслі І-40 + дріб), а також після вібраційного оброблення в пружному середовищі (маслі І-40 + дріб), при впливі магнітного поля на деталь.

Пропонується використовувати новий метод фінішного оброблення – зміцнювальне віброоброблення в пружному середовищі, засноване на зміцненні тонкого поверхневого шару. Рідина забезпечує ретельну обробку поверхні і може застосовуватися для фінішного оброблення деталей. Деталі піддаються поздовжнім або поперечним звуковим коливанням необхідної амплітуди. Теоретична модель процесу визначається опором рідкого середовища коливань деталі, за рахунок відбору імпульсу рухомого тіла елементами пружного середовища. ППД визначається дією пружного середовища. У процесі оброблення на поверхню деталей діє велика кількість мікроударів частинками робочого середовища. Згладжування мікронерівностей відбувається при ППД частинками робочого середовища, які здійснюють коливальний рух.

Деталі від перетворювача надається вібрація з частотою її власних коливань для досягнення резонансу. Зовні витрачається мінімум енергії на підтримку резонансу, а всередину системи надходить максимум енергії, що підводиться. При обробці деталі робоче середовище безперервно здійснює два види рухів: коливання і повільне переміщення всієї маси (циркуляційний рух). Від деталі вібрація передається прилеглим шарам робочого середовища, потім наступним шарам і так далі. Інтенсивність вібраційного оброблення залежить від режиму і тривалості, характеристики і складу робочого середовища, механічних властивостей деталей та ін.

Дія безлічі мікроударів частинок пружного робочого середовища, викликаних дією спрямованих вібрацій, на поверхню деталей створює передумови для зміни фізико-механічних властивостей їх поверхневого шару, викликає руйнування нерівностей на поверхні, змінює її мікрогеометрію, а також створює на поверхні рівномірний наклеп. Перевага зміцнювального

віброоброблення в пружному середовищі – реалізація його коливальною установкою, без складного обладнання.

Сутність зміцнювального віброоброблення в пружному середовищі наступна: деталь знаходиться у в'язкій рідині і здійснює гармонійні коливання в пружному середовищі, впливаючи на частинки середовища, прилегли до поверхні, змушує їх здійснювати вимушені коливання. Середина поблизу тіла коливається, деформується, і в ній виникають пружні сили. Поступово всі частинки середовища залучаються до коливального руху. Під ударами робочого середовища шорсткість поверхні деталі пластично деформується, заповнюються западини на поверхні, що сприяє підвищенню твердості поверхневого шару. У поверхневому шарі виникають стискаючі напруги, що сприяє підвищенню втомної міцності і зносостійкості, значно знижується шорсткість поверхні обробленої деталі.

Особливість методу полягає в тому, що робоче середовище легко приймає форму оброблюваної поверхні, що забезпечує відносну рівномірність оброблення і можливість зміцнювати деталі складної форми.

На підставі вищенаведених гіпотез і припущень розроблено методику експериментальних досліджень, яка передбачає вивчення впливу зміцнювальної віброобробки в пружному середовищі на твердість і шорсткість деталей машин.

Основні технологічні параметри методу наступні: пружне середовище, частота коливань, визначальна енергія зіткнення атомів робочого середовища з оброблюваною поверхнею, тривалість процесу оброблення.

Принцип досліджень схематично можна зобразити у вигляді двох етапів (рис. 3.39, 3.40):

1) пластина матеріалу характеризується наявністю власної частоти коливань  $f_0$ ;

2) пластина занурюється в пружне середовище певного обсягу, після чого відбувається процес оброблення при частоті власних коливань, при частоті на 30 % нижче власних коливань, а також при частоті на 50 % вище власних коливань пластини.

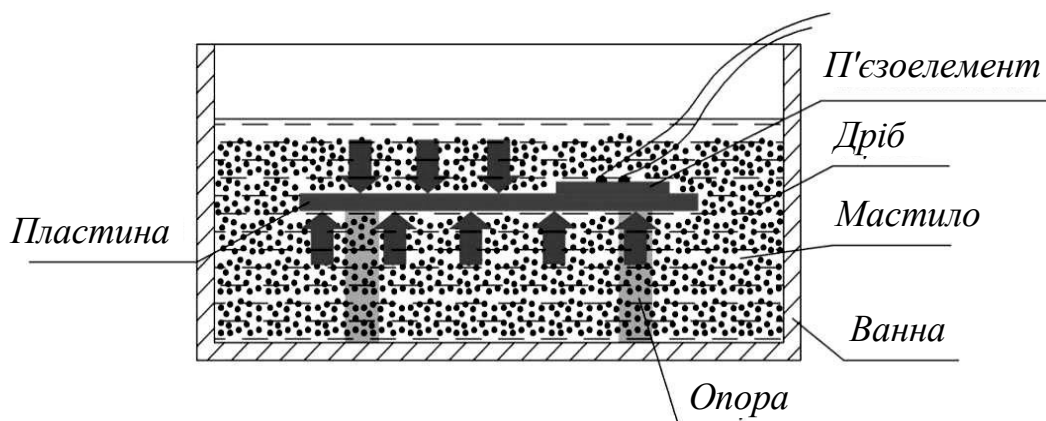


Рисунок 3.39 – Схема установки пластины в пружном середовищі при віброобробленні



*Рисунок 3.40 – Пластина, занурена в пружне середовище*

Експериментальна установка показана на рисунку 3.41. Коливання електричного поля, що подаються з генератора, перетворюються в механічні коливання п'єзовипромінювача, що проходять через зразки. У якості зразків використовуються пластини завдовжки 150 мм, шириною 30 мм, товщиною 3 мм з дюралюмінію. Зразки виконані з різною шорсткістю (одні були оброблені абразивною шкіркою із зерен крупної фракції, інші – абразивною шкіркою із зерен дрібної фракції).



*1 – посудина з пружним середовищем; 2 – експериментальний зразок;  
3 – п'єзоелемент; 4 – з'єднувальні дроти; 5 – генератор звуковий ЛЗ0;  
6 – твердомір; 7 – профілометр; 8 – ЕОМ*

*Рисунок 3.41 – Загальний вигляд експериментальної установки*

Експеримент проводиться в такій послідовності:

1. Знежирюються поверхні зразків; промиваються і висушуються зразки.
2. Прикріпляється по центру поверхні кожного зразка п'єзоелемент.
3. Виміряються резонансні частоти пластин.
4. Опускається зразок в посудину з пружним середовищем.



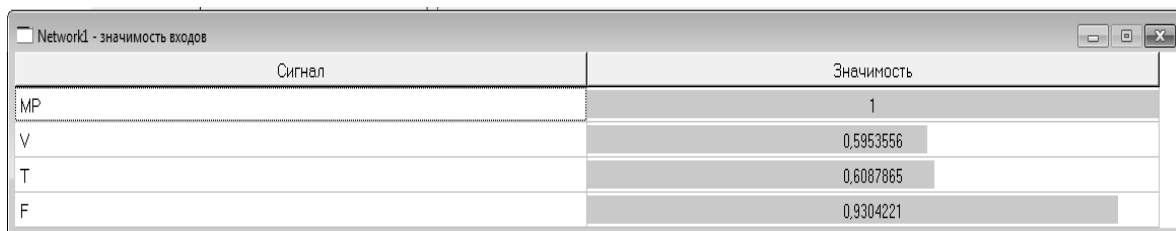
5. По черзі обробляються зразки протягом 2, 5 і 10 хвилин при частотах 2 500, 3 500 і 5 000 Гц.

6. Після оброблення вимірюються твердість і шорсткість зразків. Основне завдання нейросітьового моделювання результатів лабораторних досліджень – виявлення впливу віброобробки в пружному середовищі на твердість і шорсткість деталей машин.

За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro 0.25 була побудована математична модель на основі нейросітьового моделювання, де вхідними симптомами були наявність магнітного поля (MP), обсяг масла (V), час (T), частота звукових коливань (F), а кінцевим синдромом – твердість зразків (HV) і шорсткість (Ra). Була побудована одношарова сіть з початковою кількістю нейронів 10, які скорочувалися після спрощення сіті, для твердості точність становила 1 HV, для шорсткості 0,1 Ra.

У результаті нейросітьової апроксимації експериментальних даних отримано дві математичні моделі для твердості і шорсткості експериментальних зразків.

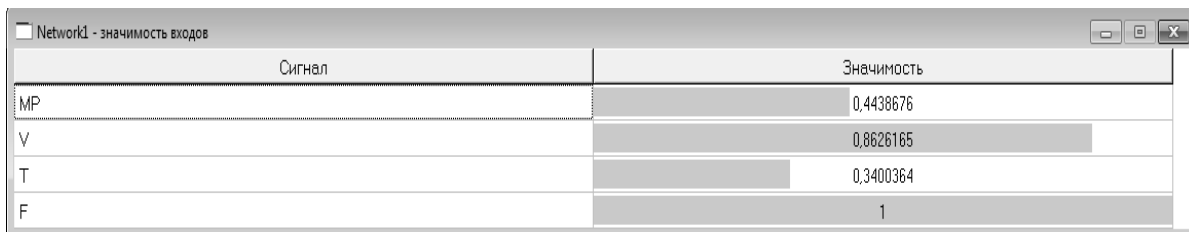
У результаті нейросітьового моделювання значень твердості з'ясувалося, що на зразки найбільший вплив справив параметр MP (наявність впливу магнітного поля), меншою мірою – параметр V (об'єм пружного середовища) (рис. 3.42).



Сигнал	Значимість
MP	1
V	0,5953556
T	0,6087865
F	0,9304221

Рисунок 3.42 – Значимість впливу вхідних параметрів на зразки

У результаті нейросітьового моделювання значень шорсткості поверхні з'ясувалося, що на зразки найбільший вплив справив параметр F (частота звукових коливань), меншою мірою – параметр T (час оброблення) (рис. 3.43).



Сигнал	Значимість
MP	0,4438676
V	0,8626165
T	0,3400364
F	1

Рисунок 3.43 – Значимість впливу вхідних параметрів на зразки

На підставі отриманих моделей для твердості і шорсткості отримані сітьові значення, які збігаються з вихідними значеннями. Отже, математичні моделі адекватні.

За отриманими сітьовими значеннями твердості побудовані графічні залежності твердості від частоти звукових коливань, графічні залежності шорсткості від частоти звукових коливань, а також гістограми, що виражають залежність твердості від часу впливу частоти звукових коливань, і гістограми, що виражають залежність шорсткості від часу впливу частоти звукових коливань (рис. 3.44, 3.45).

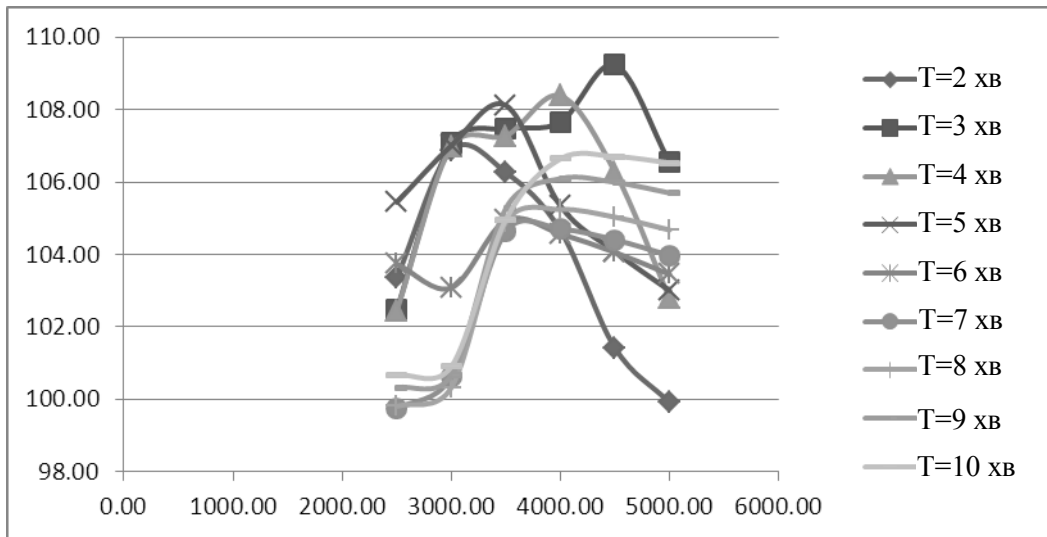


Рисунок 3.44 – Залежність твердості зразків від частоти звукових коливань при обсязі пружного середовища  $V = 300$  мл і впливі магнітного поля

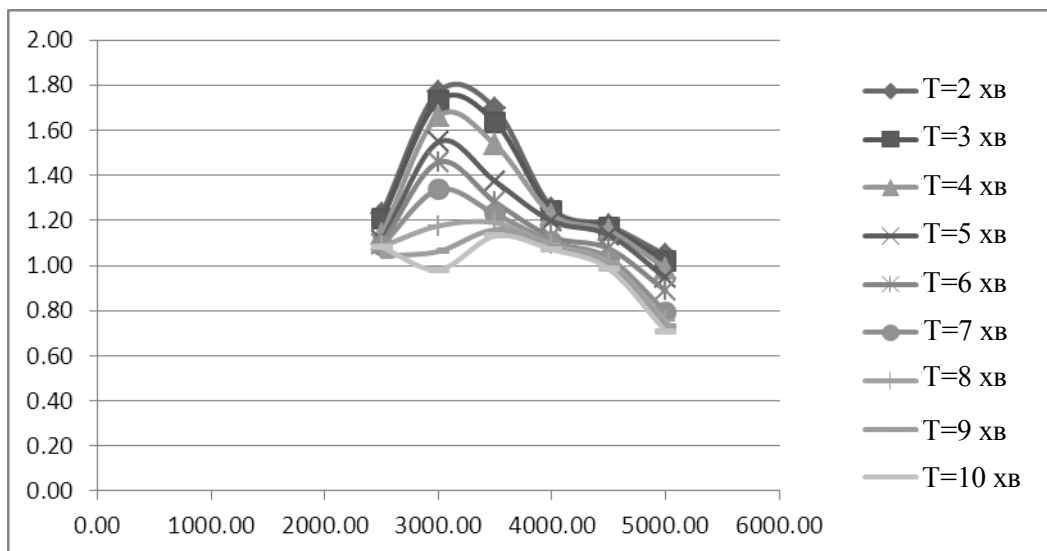
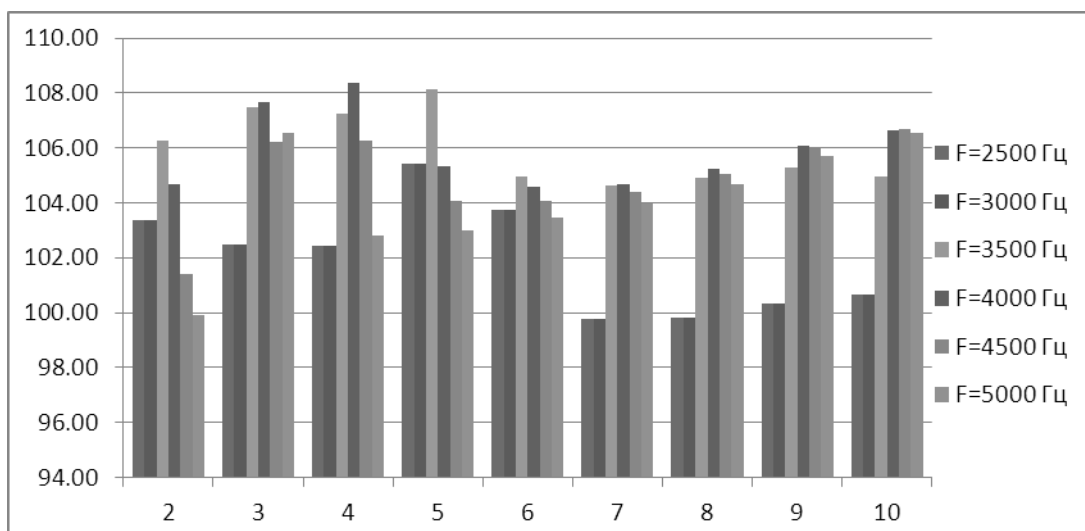


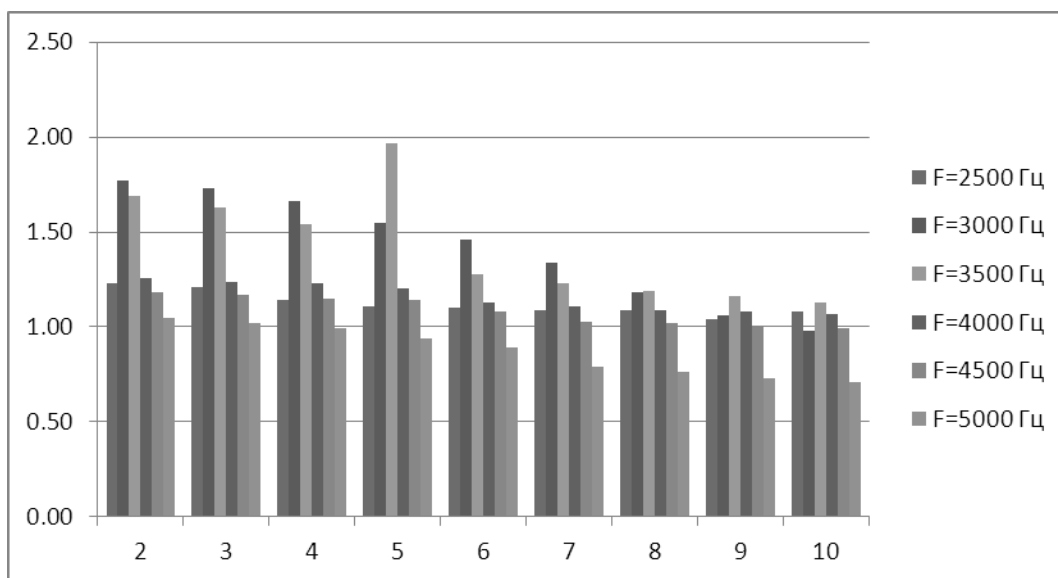
Рисунок 3.45 – Залежність шорсткості поверхні зразків від частоти звукових коливань при обсязі пружного середовища  $V = 300$  мл і впливі магнітного поля

Із залежностей, видно, що на кінцевий результат експерименту вплив вхідних параметрів в кожному досліді був різним. Тому, щоб детально проаналізувати експериментальні дослідження, розглянемо вплив часу впливу частоти звукових коливань на зразки (рис. 3.46, 3.47).

Аналізуючи результати експериментальних досліджень, можна зробити висновки, що застосування методу вібраційного оброблення призводить до підвищення твердості сталі і зниження шорсткості поверхні деталей, а суміщення його з методом оброблення в пружному середовищі при впливі магнітного поля і без нього дає ще більший результат.



*Рисунок 3.46 – Залежність твердості зразків від часу впливу частоти звукових коливань при обсязі пружного середовища  $V = 300$  мл і впливі магнітного поля*



*Рисунок 3.47 – Залежність шорсткості поверхні зразків від часу впливу частоти звукових коливань при обсязі пружного середовища  $V = 300$  мл і впливі магнітного поля*

При обсязі пружного середовища 150 мл без впливу магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 3 500 Гц, зі збільшенням частоти коливань твердість поступово знижується. Максимальні показники спостерігаються на 6 і 7-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 200 мл без впливу магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 4 500 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 9 і 10-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 250 мл без впливу магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 4 500 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 3 і 4-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 300 мл без впливу магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 4 000 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 3 і 4-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 150 мл при впливі магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 4 000 Гц, зі збільшенням частоти коливань твердість поступово знижується. Максимальні показники спостерігаються на 5 і 6-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 200 мл при впливі магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 3 500 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 5 і 6-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 250 мл при впливі магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 3 500 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 4 і 5-й хвилині оброблення.

При обсязі пружного середовища 300 мл при впливі магнітного поля найбільший вплив на значення показника твердості справила частота звукових коливань 4 000 Гц, при менших частотах коливань істотних змін не відбувається. Максимальні показники спостерігаються на 3 і 4-й хвилині оброблення.

Застосування віброобробки при впливі магнітного поля дозволить підвищити якість поверхні і збільшити твердість [70, 71].

### 3.5 Застосування енергії СВС-процесів

Сучасні технології базуються на створенні нових конкурентоспроможних виробів підвищеної якості, що вимагає застосування нових високих технологій при їх виготовленні. Одним з таких методів є високотемпературний синтез [86, 88, 92, 99, 104, 106]. СВС – це процес переміщення хвилі хімічної реакції по суміші реагентів з утворенням твердих кінцевих продуктів, що проводиться з метою синтезу речовин матеріалів. СВС являє собою режим протікання сильної екзотермічної реакції (реакції горіння), в якому тепловиділення локалізовано в шарі і передається від шару до шару шляхом теплопередачі [86, 87, 91, 94, 103]. Високотемпературний синтез дозволяє отримувати тугоплавкі порошки, тугоплавкі сполуки, порошки інтерметалідів, керамічні вироби й покриття.

Напрямок, що розвивається, є обробка матеріалів горінням. Це наплавлення зносостійких продуктів СВС на сталеві поверхні і переплавлення відпрацьованих і бракованих інтерметалічних деталей, деякі інші види нанесення покриттів. Теорія оброблення матеріалів з використанням СВС-процесів, яка розглядала б взаємодію процесів і продуктів СВС з оброблюваним матеріалом, відсутня. Її створення допоможе перевести дослідження в цьому напрямку на якісно новий рівень.

Актуальними в даний час є питання підвищення надійності і довговічності машин, приладів, установок, підвищення їх якості та ефективності роботи, а отже, питання економії металів, боротьби з корозією і зношенням деталей машин. Роль цих проблем у довговічності машин і механізмів, приладів та інших особливо зросла в даний час, через те, що розвиток більшості галузей промисловості (авіаційна, ракетна, теплоенергетика, атомна енергетика, радіоелектроніка та ін.) пов'язаний з підвищенням навантажень, температур, агресивності середовищ, в яких працює деталь. Вирішення цих проблем, насамперед, пов'язане зі зміцненням поверхневих шарів виробів. Поверхнєве зміцнення є невід'ємною частиною технологічного процесу виготовлення деталі, так як забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик виробів і довговічність роботи всього вузла або машини.

Змінити властивості поверхні можна різними способами: нанесенням на поверхню нового матеріалу з необхідними властивостями; зміною складу поверхневого шару металу [88]. У другому випадку поверхнєві шари металу піддають дифузійній хіміко-термічній обробці (ХТО), в результаті якої на поверхні виробу утворюється новий, відмінний від серцевини, сплав. ХТО дозволяє отримати в поверхневому шарі виробу сплав практично будь-якого складу і, отже, забезпечити комплекс необхідних властивостей – фізичних, хімічних, механічних та інших.

Цементация – найпоширеніший у машинобудуванні спосіб хіміко-термічного оброблення сталевих деталей – застосовується для отримання високої поверхневої твердості, зносостійкості і втомної міцності деталей. Ці

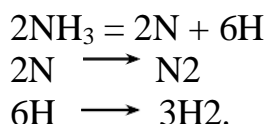
властивості досягаються збагаченням поверхневого шару низьковуглецевої і нелегованої сталі вуглецем до концентрації евтектоїдної або заевтектоїдної і наступною термічною обробкою, що надає поверхневому шару структуру мартенситу з тією чи іншою кількістю залишкового аустеніту і карбідів [123].

Глибина цементованого шару зазвичай знаходиться в межах 0,5...2,0 мм. Цементацию сталевих деталей здійснюють в твердих, газових і рідких карбюраторах. За останні роки все більше розвивається газова цементация.

Азотуванням (або нітруванням) сталі називається процес поверхневого насичення сталі азотом. Азотуванню, як і цементации, піддають деталі, що працюють на знос і сприймають знакозмінні навантаження [124]. Азотовані деталі мають такі переваги: високу твердість, зносостійкість, теплостійкість і корозійну стійкість. Так як азотуванню піддають в основному леговані сталі певних складів і процес має велику тривалість (30...60 год), застосування його є економічно доцільним лише для оброблення відповідальних інструментів і деталей авіадвигунів, дизелів, турбін, приладів і т. п.

Насичуваність заліза молекулярним азотом при атмосферному тиску і температурі до 1 500 °С невелика, однак її можна збільшити, створивши в печі високий тиск (сотні мегапаскалів). Але цей спосіб насичення заліза азотом поки не представляє практичного інтересу, зважаючи на його трудомісткість.

Для насичення доцільніше використовувати атомарний азот, що утворюється в момент розкладання сполук, що містять цей елемент [122]. В якості такого з'єднання зазвичай застосовують аміак, дисоціація якого супроводжується виділенням азоту в атомарному активному стані, який незабаром переходить в молекулярний стан і втрачає свою активність:



Тому азотування інтенсивно протікає лише в тому випадку, коли дисоціація аміаку відбувається в безпосередній близькості від поверхні, яку азотують.

Величезною проблемою в машинобудуванні також є корозія металів. Корозією металів називається їх руйнування внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем [93, 117, 120]. За механізмом протікання процесу розрізняють два типи корозії металів: хімічну і електрохімічну.

Хімічна корозія – це корозійний процес, що протікає в середовищах, які не проводять електричний струм. Хімічна корозія має місце, наприклад, при високотемпературному нагріві сталі для гарячого оброблення тиском або термічного оброблення. При цьому на поверхні металу утворюються різні хімічні сполуки-оксиди, сульфідів та інші – у вигляді плівки [93, 119]. В окремих випадках плівки, що утворилися при хімічній корозії, особливо суцільні, захищають метал від подальшої корозії. Електрохімічна корозія зазвичай супроводжується протіканням електричного струму. Прикладами

можуть служити іржавіння металевих конструкцій та виробів в атмосфері, корпусів судів і сталеві арматури гідроспоруд у річковій і морській воді і т. п. Існують різного роду покриття, які захищають сталеві деталі від корозії [117, 120]. Наприклад, алюміній, олово, свинець, нікель і хром здатні до утворення на поверхні металів щільних захисних плівок. Плівки ж на поверхні сталевих і чавунних виробів неміцні, здатні до розтріскування і проникнення корозії в глиб металу. Мідні покриття захищають сталь від корозії [93, 121]. Дуже хороша електропровідність міді широко використовується в електротехніці й електроніці [118, 120].

Метод високотемпературного синтезу є новим в області нанесення покриттів на деталі машин, але, як показує досвід попередніх досліджень, не менш ефективним.

У 1967 р. під керівництвом Мержанова А. Г. група співробітників виявила новий оригінальний клас процесів горіння, що протікає без кисню. В якості пального в них виступали метали (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta та ін.), а в якості окисника — неметали (B, C, Si). За допомогою локального ініціювання були реалізовані хвильові режими, в яких хімічне перетворення зосереджено в зоні, що переміщається по суміші порошків [86, 90, 95, 113, 114]. Характерною особливістю є те, що в ході процесу практично відсутнє газовиділення і утворюються повністю конденсовані продукти, причому в конденсованій фазі можуть розвиватися дуже високі температури (до 4 000 °С). Можливість такого безгазового горіння обумовлена великим тепловиділенням при хімічній взаємодії реагентів і термічною стабільністю продуктів [89, 101, 111].

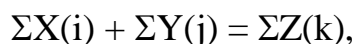
У зазначених процесах відбувається безвідхідний хімічний синтез тугоплавких сполук (боридів, карбідів, силіцидів та ін.), які складають основу широкого класу сучасних неорганічних матеріалів, здатних працювати в екстремальних умовах (жаро- і вогнестійкі, надтверді, зносостійкі, вогнетривкі та ін.)

Реагенти в СВС-процесах використовуються у вигляді тонкодисперсних порошків, тонких плівок, рідин і газів. Найбільш поширені два типи систем: суміші порошків (спресовані або насипної щільності) і гібридні системи газ-порошок (або спресований агломерат). Відомі СВС-процеси і в системах: порошок-рідина, газосуспензія, плівка-плівка, газ-газ.

Умови підбору компонентів СВС-системи:

- екзотермічність взаємодії реагентів;
- отримання корисних твердих продуктів;
- технічна та економічна доцільність.

У найзагальнішому вигляді схему процесу СВС можна представити в наступному вигляді:



де X(i) – метал у твердому стані (Al, Ti, Zr та ін.);

Y(j) – неметал у твердому, рідкому чи газоподібному стані (C, B, Si, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>);

Z (k) – продукти синтезу (карбіди, бориди, силіциди, нітриди, оксиди, гідриди, інтерметаліди).

Характерно, що в більшості поєднань  $x$  і  $y$  виділяється багато тепла і організація самопоширювання процесу не складна [86, 93]. Найбільша кількість здійснених СВС-реакцій відноситься до класів метал-неметал (наприклад,  $Zr + C \rightarrow ZrC$ ). Однак відбуваються самопоширюючі реакції в системах з двох металів ( $Ni + Al \rightarrow NiAl$ ) або двох неметалів ( $3Si + 2N_2 \rightarrow Si_3N_4$ ). Цікаво, що процес здійснюється не тільки на перемішаних конденсованих системах – сумішах порошків, що горять в інертному середовищі, але й за участю газоподібних агентів ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ).

У залежності від хімічної природи провідної реакції горіння і агрегатного стану реагентів всі СВС-системи можна поділити на чотири основні класи: безгазові, фільтраційні, газовидільні системи і системи з відновлювальною стадією [112].

Завдяки високим значенням швидкості й температури горіння і швидкості нагріву речовини у хвилі СВС відносять до категорії екстремальних хімічних процесів.

Для ініціації СВС-процесів необхідний нагрів суміші до високої температури (залежно від складу інгредієнтів – від 600 до 1 000 °C і вище). Якби для ініціації процесу до такої температури необхідний був нагрів всього зразка, то використання СВС-процесів у виробках спецтехніки напевно чи стало б можливим [98, 107, 116]. Однак СВС-склади мають таку ж властивість, що і звичайний порох – властивість локальної ініціації процесу. Достатньо нагріти до стартової температури малу частину СВС-суміші, і хвиля горіння починає поширюватися зразком. Для ініціації СВС-процесів можуть бути застосовані так звані ступінчасті схеми.

Зараз за допомогою реакції СВС синтезовані вже сотні сполук. Це карбіди, бориди, силіциди, нітриди, гідриди, сульфіди і багато інших з'єднань. Саме таким способом виготовляють корисні кераміки, в тому числі надпровідні. Дослідженнями в цій області займалися і займаються багато вчених: Нухули А. Н., Сатбаєв Б. М., Свідерський А. К., Цхай С. Г., Філоєн А. І., Лебедева А. Г., Подболотов К. Б., Какошко Є. С., Дятлова Є. М., Демянюк Д. Г., Рождествіна В. Ю., Євстигнєєв В. В., Мілюкова І. В., Яковлев В. І., Логінова М. В. і, звичайно ж, Мержанов А. Г., Левашов Е. А та ін.

Продукти СВС являють собою тверді речовини довільної форми, різних розмірів. Це порошки різної дисперсності, слабо пов'язані конгломерати частинок, піноматеріали, спеки і злитки з різною міцністю, плівки, волокна, кристали. Маса продуктів залежить від її початкових значень і, в деякій мірі, від механізму процесу [87, 90, 115].

У перемішаних системах макроструктура зазвичай однорідна, в гібридних (пористе тіло-газ) за наявності фільтраційних утруднень може мати місце розподіл складу по перетину зразка після СВС. У спеціальних випадках навмисно створюють неоднорідну макроструктуру продукту горіння (одержання багатошарових і функціонально-градієнтних матеріалів).

Все сказане стосується, по суті, першого етапу, на якому основна увага була приділена хімічному боку питання – умовам утворення сполук заданого складу, їх чистоті, механізму процесу. У прикладних дослідженнях



було вирішене лише найпростіше матеріалознавче завдання – отримання порошків. Для цього утворений продукт спочатку потрібно охолоджувати, а потім подрібнювати і розсіювати. Високотемпературний стан продукту реакції в СВС-процесах, що виникає після проходження хімічної реакції, може бути безпосередньо використано для утворення компактних матеріалів і виробів без стадії порошкової металургії [88, 106, 116].

Такий підхід лежить в основі другого етапу досліджень СВС-процесів.

Температура, що розвивається при СВС-процесі, висока і, як правило, близька до температури плавлення продукту (див. табл. 3.6). Проте, якісного спікання продукту зазвичай не відбувається. І справа тут не в тому, що після проходження хвили синтезу зразок остигає і час перебування його у високотемпературному стані обмежено і часто невеликий. Головне, як з'ясувалося, це домішкове газовиділення. Гази, що виділяються при СВС-процесах, в результаті відновлення окисних плівок або розкладання гідридних домішок, видаляючись із зразка з великою швидкістю, перешкоджають спіканню. Домішкове газовиділення не заважає досягненню повноти синтезу, але на фізичний стан утворених продуктів дуже впливає [86, 99, 109]. Звичайний стан продуктів в таких випадках – пориста, погано спечена речовина, яка легко розвалюється на окремі частки або конгломерати частинок. Об'єм зразка в ході СВС-процесу помітно збільшується (у 1,5...2 рази). Таким чином, домішкове газовиділення є корисним процесом при отриманні порошків, тому що полегшує роздрібнення, і шкідливим при отриманні компактних матеріалів. Незважаючи на домішкове газовиділення, в деяких випадках вдається отримати міцно спечені матеріали.

*Таблиця 3.6 – Найбільш часто реалізовані значення деяких характеристик СВС-процесу*

Швидкість горіння	0,1...20 см/с
Температура горіння	2 300...3 800 К
Швидкість нагріву речовини у хвили	103...106 К/с
Потужність запалювання	10...200 кал/(см <sup>2</sup> ·с)
Затримка запалювання	0,2...1,2 с
Температура запалювання	800...1 200 К

У найзагальнішому вигляді швидкість процесу СВС і температура реакції залежать від цілого ряду фізико-хімічних параметрів. До них відносяться:

– термодинамічні параметри (теплота утворення кінцевих продуктів синтезу, теплоємності продуктів реакції, початкова температура процесу, склад вихідної суміші);

– фізичні параметри (теплопровідність вихідної суміші, щільність зразка, зовнішній тиск газу, форма і розмір часток порошків, полідисперсність порошків, дефектність структури частинок компонентів, наявність зовнішніх впливів);

– технологічні параметри (рівномірність перемішування компонентів суміші, ступінь активації порошків);

– хімічні параметри (ступінь зволоженості порошків, концентрація в них адсорбованих домішок і розчинених газів).

Всі процеси СВС відносяться до розряду гетерогенних, тобто швидкість реакції і тепловиділення пропорційна питомій поверхні реагентів [93, 97, 102, 108].

Для розуміння механізму знаходження прийомів управління, визначення оптимальних умов синтезу, можливостей практичного використання процес і продукти СВС піддають експериментальним дослідженням, тобто здійснюють експериментальну діагностику СВС в кожній конкретній системі або кожному класі близьких систем. Розрізняють три рівні діагностики в залежності від поставленого завдання [89, 91, 106].

#### I рівень. Феноменологія

В експериментах визначають зазвичай режим поширення фронту (стаціонарний, автоколивальний, спіновий) і легко вимірювані характеристики:

– швидкість фронту і максимальну температуру горіння (для стаціонарного режиму);

– середню швидкість фронту і частоту пульсацій (для автоколивального режиму);

– середню швидкість фронту і швидкість спінового вогнища (для спінового горіння).

Прийоми досліджень: фотореєстрація та відеозйомка (з комп'ютерною обробкою), термометрія (з використанням термоелектричних датчиків або пірометрів). Крім цього, аналізують хімічний і фазовий склад продукту, його морфологію, макро- і мікроструктуру звичайними прийомами хімічного і рентгенофазового аналізу та металографії (первинний мінімум), при вирішенні конкретних завдань продукти СВС піддаються більш глибоким дослідженням [99].

#### II рівень. Зонна структура хвилі

Типовий прийом – аналіз термограм (або профілів температури), отриманих за допомогою мікротермопар або динамічної пірометрії. Розшифрування дозволяє охарактеризувати вид профілю (простий, складний), визначати характерні точки (наприклад, плавлення реагентів і продуктів) і за температурними ознаками припускати фізико-хімічний механізм перетворення речовини. Оброблення профілів дає можливість встановлювати певну структуру хвилі і визначати ширину зон і підзон, а також провідну зону горіння. Повні термограми горіння характеризують і ефекти, які проявляються після проходження хвилі горіння.

III рівень. Динаміка фазових та структурних пост-процесів за хвилею горіння

Два прийоми отримали розвиток:

- динамічна рентгенографія (зняття дифрактограм з однієї точки палаючої шихти в різні моменти часу за допомогою синхротронного випромінювання або лабораторного дифрактометра зі спеціальним детектором);

- гартування (зупинення) СВС-процесу з подальшим аналізом частково і повністю згорілої частини шихти.

СВС – наукомісткий процес, для розуміння й опису якого необхідні знання в галузі термодинаміки, кінетики хімічних реакцій, загальної та структурної макрокінетики, матеріалознавства та ін. областей знання [91, 95, 96, 104].

СВС-технологія побудована за традиційною схемою, прийнятою в порошковій металургії: підготовка сировини, синтез, оброблення продуктів. На відміну від порошкової металургії в СВС-технології замість синтетичних печей або плазмотронів використовуються СВС-реактори [91, 110]. Відомі шість технологічних типів (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Комплекс СВС-технологій

ТТ-1	Хімічний синтез (одержання безформних спеків та їх переробка в порошки)
ТТ-2	СВС-спікання (отримання виробів шляхом придання шихті певної форми і її збереження в процесі спалювання)
ТТ-3	Силове СВС-компактування (ущільнення гарячих, що ще не встигли охолонути продуктів горіння шляхом різних механічних впливів)
ТТ-4	Функціонально-градієнтні матеріали (СВС ФГМ)
ТТ-5	Градiєнтні тугоплавкі пластини
ТТ-6	Технологія високотемпературних СВС-розплавів, або СВС-металургія (спалювання висококалорійних сумішей з утворенням продуктів у вигляді розплаву з подальшою металургійною переробкою)

Метод СВС-синтезу забезпечив можливість отримання значної кількості сполук у дисперсному (порошковому) вигляді. Серед матеріалів, технологічні основи синтезу яких найбільш розроблені, особливе місце займають порошки тугоплавких сполук, які широко застосовувані в промисловості завдяки поєднанню твердості, термічної стабільності, стійкості до абразивного зношування і корозійної стійкості. Все ширше застосовуються напилені покриття на основі порошкових матеріалів [100, 105]. При боротьбі з корозією і зношуванням створюється комбінований матеріал, що поєднує міцність основи і стійкість зовнішнього шару до впливів середовища і контактних навантажень. Це зумовило інтерес до розробки дисперсних СВС-матеріалів.

В даний час дослідженнями СВС-процесів займається велика кількість вчених, дослідників у лабораторіях різних країн.

Використання інтерметалічних сполук інтенсивно поширюється в різних областях техніки завдяки унікальним комплексам властивостей (що включають високі температури плавлення, підвищену механічну міцність,

жароміцність і жаростійкість), як у вигляді виробів, так і у вигляді дисперсних матеріалів, призначених для отримання покриттів [96, 104, 109, 112].

Підводячи підсумок, можна сказати, що до цього часу:

- створені оригінальні методи діагностики СВС-процесів;
- розвинуто уявлення про механізм і закономірності безгазового та фільтраційного горіння; виявлені нові, важливі в теорії горіння явища і ефекти (автоколювання фронту і спінові хвилі, неєдиність стаціонарних режимів та ін.);
- створені одномірні і двовимірні моделі СВС-систем;
- розвинена ідеологія і методологія структурної макрокінетики твердопалуменевого горіння;
- синтезовано більше 500 хімічних сполук різних класів;
- створено нові матеріали – однорідні, функціонально-градієнтні, композиційні;
- розроблено комплекс СВС-технологій;
- апробовано і обґрунтовано використання СВС-матеріалів у машинобудуванні (абразиви, тверді сплави, зносостійкі наплавлення), металургії, електротехніці та електроніці.

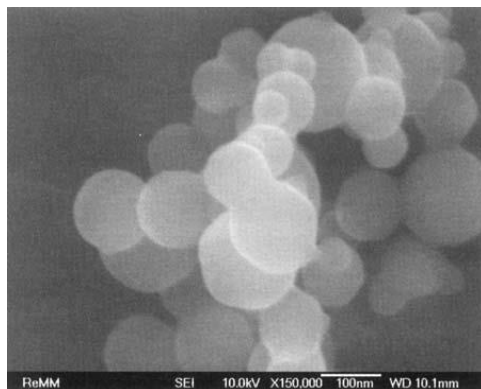
Характеризуючи тенденції розвитку сучасної порошкової металургії, відзначимо, що магістральним шляхом є розвиток так званих «розумних» (адаптуються, самоорганізуються) матеріалів і технологій їх виготовлення. Стосовно матеріалознавства це означає, що при створенні матеріалів повинні закладатися принципи самовідновлення, саморегулювання, самодіагностики; тоді в процесі експлуатації властивості матеріалів не погіршуються, а навіть поліпшуються або залишаються незмінними. Саме тому дослідження в даній області є актуальними.

Малодослідженим, але таким, що розвивається, напрямком є оброблення матеріалів горінням. Це наплавлення зносостійких продуктів СВС на сталеві поверхні і переплавлення відпрацьованих і бракованих інтерметалічних деталей, деякі інші види нанесення покриттів. Теорія оброблення матеріалів з використанням СВС-процесів, яка розглядала б взаємодію процесів і продуктів СВС з оброблюваним матеріалом, відсутня.

Застосування високотемпературного синтезу як методу отримання матеріалів для напилювання захисних покриттів дозволяє отримувати якісні порошкові матеріали інтерметалідів, карбідів, боридів і т. п.

Метод СВС-синтезу, на відміну від традиційних технологій, дозволяє отримувати порошкові матеріали на основі інтерметалідів, легованих третім елементом, або армованих карбідами, боридами і т. д.

До таких зносостійких покриттів багато вчених відносять нітриди, зокрема нітрид алюмінію AlN (рис. 3.48). Нітрид алюмінію і композиції на його основі широко використовуються в техніці високих температур в якості вогнетривкого та електроізоляційного матеріалу, що працює в агресивних середовищах.



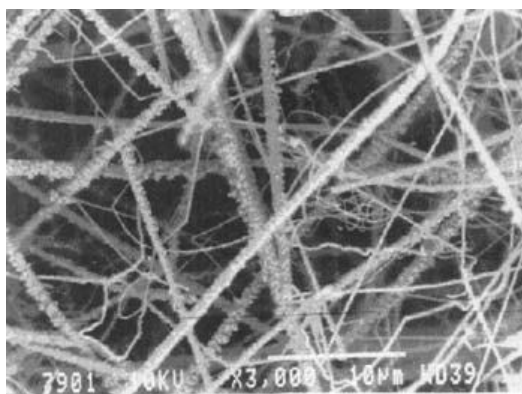
*Рисунок 3.48 – Частинки електровибухового алюмінію*

Основні методи отримання нітриду алюмінію – синтез з простих речовин, відновлення оксиду алюмінію при одночасному азотуванні і метод газофазного осадження в даний час стикаються з великими труднощами через необхідність використання високотемпературної техніки і сильно відстають від запитів промисловості, як за обсягом, так і за якістю продукції.

В даний час розроблений новий спосіб синтезу нітридів різних металів в режимі високотемпературного синтезу із застосуванням твердих реагентів, що азотують (СВС-АІ).

Для отримання порошку композиції АІN-АІ в реакціях горіння використовувалися СВС-системи «алюміній – азид натрію – хлорид амонію» і «алюміній – азид натрію – фторид алюмінію». Розрахунок адіабатичних температур цих систем показав можливість протікання самочинної реакції синтезу композиції АІ-АІN в режимі СВС [111].

Горить електропідривний алюміній у дві стадії: підпалена купка порошку спочатку червоніє, а потім раптово розжарюється до білого світіння. Цьому відповідають дві різні реакції. Спочатку утворюється оксид алюмінію, який потім починає взаємодіяти з рештою частками самого металу і з азотом повітря, пов'язуючи його в оксинітрид алюмінію [94]. Оскільки температура другої стадії реакції перевищує 2 000 °С, то речовини плавляться, випаровуються, а коли суміш остиває – конденсуються. Ось так в результаті горіння округла частка і стає голкою (рис. 3.49).



*Рисунок 3.49 – Голки оксинітриду алюмінію*

Матеріал, багатий нітридом алюмінію, сам по собі – цінна сировина. Його вводять до складу спеціальних видів кераміки, наприклад для мікроелектроніки та космічної техніки; нітрідна частка у формі голки – відмінний компонент будь-якого матеріалу. Справа в тому, що такі довгі й тверді утворення заважають поширенню тріщин. Загалом, добавка голок підвищує опір вібрації і удару.

Авторами подібних досліджень проводилися досліди із уведення нітриду алюмінію тільки в керамічні матеріали.

Метою є дослідження нових зносостійких покриттів, нанесених методом СВС-реакцій, і їх вплив на міцність деталей машин.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) простежити за змінами внутрішньої структури поверхневого шару матеріалів;
- 2) дослідити процес поширення реакції;
- 3) дослідити механічні характеристики отриманих матеріалів;
- 4) створити математичну модель досліджуваних процесів;
- 5) дослідити можливість застосування СВС з іншими видами обробки.

Об'єктом досліджень є процес впровадження металевих сумішей в поверхневі шари сталевих валів і вплив зміни структури поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин. Основними змінними факторами є склади металевих сумішей.

У системі, що складається з суміші порошків хімічних елементів, локально ініціюється екзотермічна реакція синтезу. Тепло, що виділилося в результаті реакції, завдяки теплопередачі нагріває сусідні шари речовини, збуджує в них реакцію і призводить до виникнення процесу, що самопоширюється.

У такому процесі хімічна реакція протікає у вузькій зоні, самочинно переміщається по речовині з певною лінійною швидкістю. Висока температура, необхідна для швидкого перебігу реакції, створюється в результаті звільнення хімічної енергії, запасеної у вихідній системі. Протікання реакції супроводжується яскравим світінням.

У деяких дослідах попередньо наноситься шар міді методом електролізу, створюючи захисну плівку від уведення всередину реагентів СВС-реакції. Ряд дослідів супроводжувався процесом вигладжування після нанесення покриттів.

Прес-порошок отримували шляхом змішування алюмінієвої пудри, перманганату калію, оксиду заліза і чавунного пилу СЧ10 до отримання однорідної маси в однакових пропорціях, але різних поєднаннях. Дослідні зразки виготовлялися змішуванням порошків без спікання із застосуванням в якості зв'язки розчину ацетону з додаванням води. Температура повітря під час експерименту і тиск атмосферного повітря відповідали нормальним умовам.

Обміднення, тобто процес нанесення методом електролізу, проводилося в розчині  $\text{CuSO}_4$  з використанням мідних анодів.

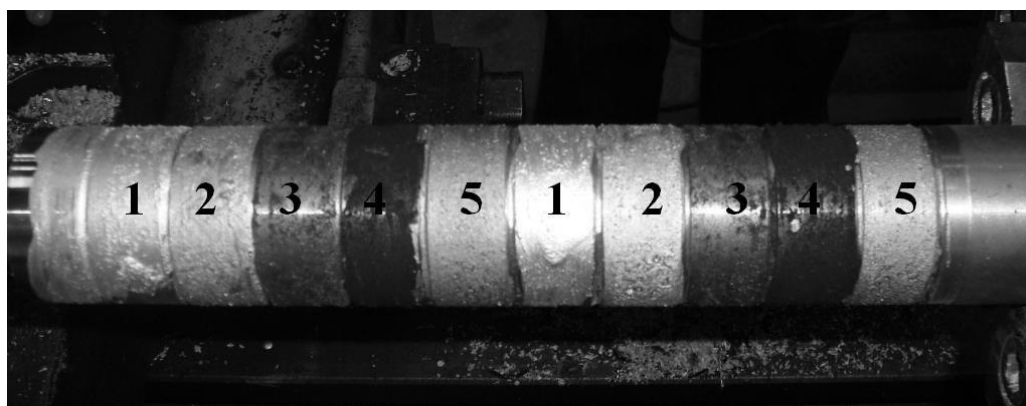
Для ініціювання процесу СВС-синтезу використовувалися генератор постійного струму і вуглецевий електрод. При цьому для ініціювання

процесу використовується промисловий струм з характеристиками напруги  $U = 220$  В, частоти  $f = 50$  Гц. Вчасно проведення експерименту деталь обертається на верстаті з частотою  $n = 50$  об/хв, а переміщення діода здійснюється поздовжньо з величиною подачі  $S = 0,72$  мм/об.

У ході проведення експериментів використовувалися: верстат токарно-револьверний моделі 1ПЗ65; деталі зі сталі 20 діаметром  $d = 25$  мм і шорсткістю  $Ra = 6,3$  мкм; деталі зі сталі 45 діаметром  $d = 45$  мм і шорсткістю  $Ra = 3,2$  мкм; паралелепіпеди  $10 \times 30 \times 10$  (мм) зі сталі 30 шорсткістю  $Ra = 3,2$  мкм; порошкові з'єднання металів:  $KMnO_4$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $СЧ10$ ; ацетон технічний  $СН_3СОСН_3$ ; сульфат міді  $СuSO_4$ ; трансформатор; тара для змішування та зберігання матеріалів; електрод вуглецевий; твердомір ЕТМ-01; мікроскоп цифровий; прилад для вимірювання твердості.

Зразки деталі зі сталі 20 діаметром  $d = 25$  мм і шорсткістю  $Ra = 6,3$  мкм піддаються попередній токарній обробці на токарно-револьверному верстаті мод. 1ПЗ65 різцем прохідним з твердого сплаву Т5К10. Потім оброблена поверхня знежирюється за допомогою ацетону. Попередньо приготовані суміші наносяться на зразки рівномірним шаром товщиною  $1 \dots 2$  мм (рис. 3.50). Потім встановлюються на верстат, і проводиться оброблення. Встановлюються задані режими різання  $S = 0,72$  мм/об і  $n = 50$  об/хв.

Попередньо вуглецевий електрод встановлений в різцетримач і виставлений так, щоб між ним і деталлю залишався зазор в  $0,2 \dots 0,4$  мм. До електроду підведений промисловий струм через трансформатор постійного струму.



1 –  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ; 2 –  $Al_2O_3 + KMnO_4$ ; 3 –  $KMnO_4 + Fe_2O_3$ ;  
4 –  $KMnO_4 + СЧ10$ ; 5 –  $KMnO_4 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$

Рисунок 3.50 – Зразок з нанесеними покриттями до впровадження

У процесі переміщення електрода уздовж обробленої заготовки виникає електрична дуга, яка й ініціює процес горіння суміші. У процесі горіння елементи суміші взаємодіють, і виділяється кисень, який цей процес підтримує. У процесі горіння металеві елементи сумішей впроваджуються в поверхневі шари заготовок. Це тягне за собою зміну металевої структури (зміна решітки), міцності властивостей зразків (твердість), а також є поверхневим легуванням (рис. 3.51).



1 –  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ; 2 –  $Al_2O_3 + KMnO_4$ ;  
 3 –  $KMnO_4 + Fe_2O_3$ ; 4 –  $KMnO_4 + C\dot{C}H_0$ ; 5 –  $KMnO_4 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$   
 Рисунок 3.51 – Зразок після оброблення

Після оброблення зразок знімається з верстата, і проводяться вимірювання. Перед металографічним аналізом необхідно провести обробку поверхні ацетоном і очистити її за допомогою дрібнозернистого абразиву.

Після проведення дослідів 1-ї серії для подальших дослідів використовується суміш, що проявила найбільш значимий ефект –  $Al_2O_3 + KMnO_4$ .

Зразки (сталь 45 діаметром  $d = 45\text{мм}$  і шорсткістю  $Ra = 3,2\ \mu\text{м}$ ) (2-а серія дослідів) піддаються попередній токарній обробці на токарно-гвинторізному верстаті мод. 1К625 різцем прохідним з твердого сплаву Т5К10. Після цього зразки опускаються у вже приготовлений розчин  $CuSO_4$ . При цьому в розчині знаходилися два мідні дроти, які виступають в якості анода, а зразок є катодом. Процес триває до тих пір, поки шар не стане досить помітним. Поверхня зачищається.

Потім попередньо приготована суміш  $Al_2O_3 + KMnO_4$  наноситься на зразки рівномірним шаром товщиною  $1 \dots 2\ \text{мм}$ . Після цього проводиться оброблення при наступних режимах різання:  $S = 0,72\ \text{мм/об}$ ,  $n = 50\ \text{об/хв}$ .

Після проведення СВС-реакції зразки вигладжуються. В якості інструменту застосовується вигладжувач (рис. 3.52) з твердого сплаву Т15К6.



Рисунок 3.52 – Вигладжувач



Оброблення ведеться на наступних режимах:

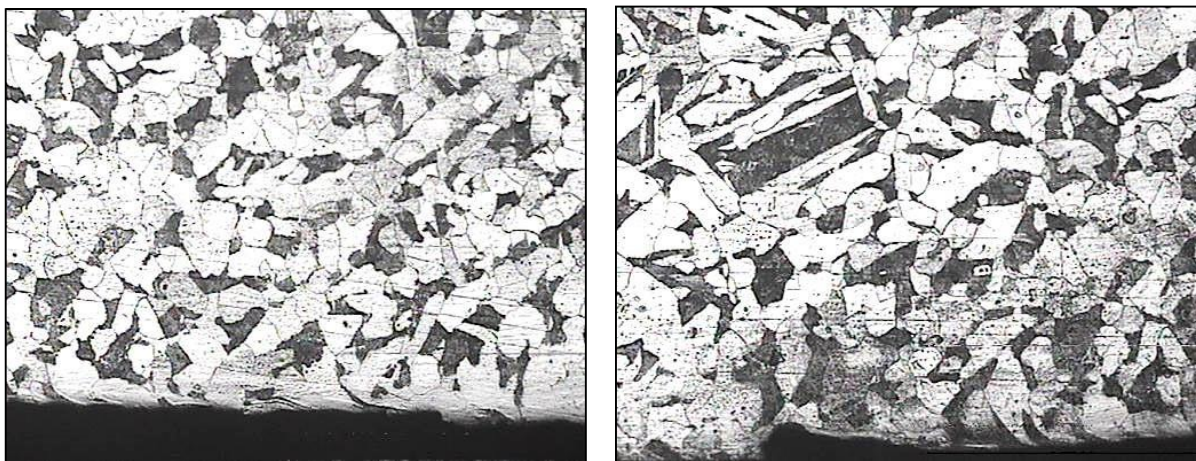
- частота обертання 50 об/хв;
- швидкість оброблення 7,2 м/хв;
- поздовжня подача інструменту 0,35 мм/об;
- сила струму 200 А.

Зразки (паралелепіеди  $10 \times 30 \times 10$  зі сталі 30 шорсткістю  $Ra = 3,2$  мкм) (3-я серія дослідів) піддаються попередній механічній обробці на фрезерно-вертикальному верстаті моделі 6P13, фрезою торцевою Т5К10 ГОСТ 9473-80.

Зразки опускаються в розчин  $\text{CuSO}_4$ , при цьому в розчині знаходяться два мідні дроти, які виступають в якості анода, а зразок є катодом. Процес триває до тих пір, поки шар не стане досить помітним. Поверхня зачищається.

Потім попередньо приготовані суміші наносяться на зразки рівномірним шаром товщиною 1...2 мм. Оброблення проводилося пістолетом «ЕФІ» для електроіскрового легування вручну.

Мікроструктура зразків представлена на рис. 3.53...3.55.



а)

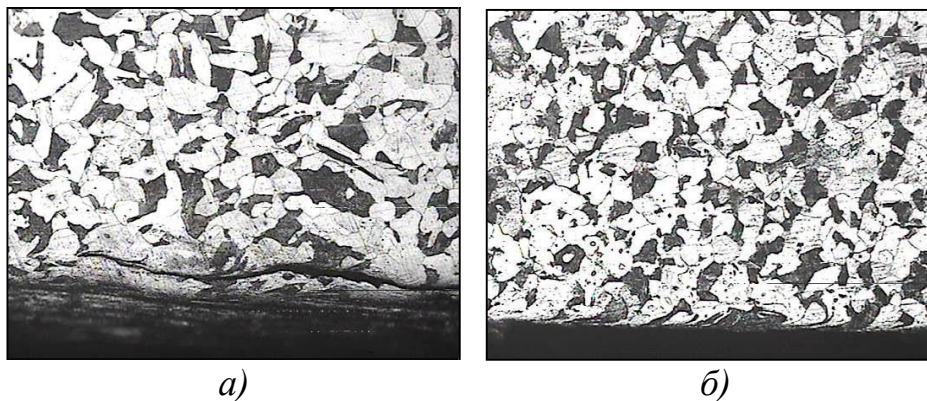
б)

а – зразок № 1 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – зерно 5-6 бал ГОСТ 5639–82  $\times 100$ ;

б – зразок № 2 ( $\text{KMnO}_4 + \text{СЧ10}$ ) – зерно 4 бал ГОСТ 5639–82  $\times 100$

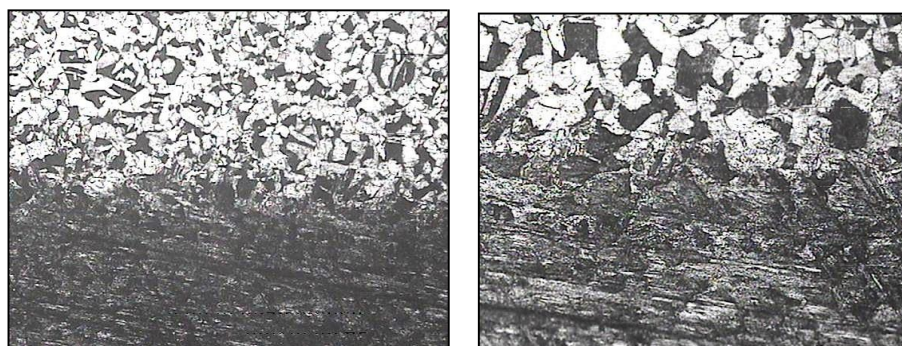
Рисунок 3.53 – Мікроструктура зразків – ферит і перліт, ділянки Видманитеттена на зразку № 2

Проводилися вимірювання твердості і фотографування металевої структури (рис. 3.56...3.58), а також вимірювання мікротвердості (табл. 3.8...3.9).



*а* – зразок № 3 ( $KMnO_4+Fe_2O_3$ ) – зерно 5-6 бал ГОСТ 5639–82  $\times 100$ ;  
*б* – зразок № 4 ( $Al_2O_3+KMnO_4$ ) – зерно 4 и 5 бал  
 ГОСТ 5639–82 шкали № 1  $\times 100$

*Рисунок 3.54 – Мікроструктура зразків – ферит і перліт. Товщина зміцненого шару на зразку № 5 дорівнює 0,1 мм*



*Рисунок 3.55 – Мікроструктура зразків – ферит і перліт  $\times 50$ . Товщина зміцненого шару з поверхні зразка № 4 дорівнює 0,9 мм*

*Таблиця 3.8 – Результати експериментів (3-я серія) (за методом Хрущова – Берковича)*

Зразок/Твердість	H100 на поверхні	H100 від краю точка 1	H100 від краю точка 2	H100 від краю точка 3
$Al_2O_3+KMnO_4$ з обмідненою з вигладжуванням	2 770	2 180	2 090	2 060
	2 760	2 150	2 060	2 060
	2 780	2 160	2 040	2 080
$Al_2O_3+KMnO_4$ без обміднення з вигладжуванням	3 370	2 060	2 060	2 150
	3 390	2 070	2 060	2 120
	3 370	2 060	2 080	2 120
Вигладжування без нанесення покриттів	2 650	2 150	2 080	2 120
	2 640	2 120	2 130	2 130
	2 650	2 130	2 120	2 080
Вихідна деталь сталь 30	2 150	2 120	2 080	2 060
	2 140	2 150	2 100	2 120
	2 130	2 130	2 080	2 100

Таблиця 3.9 – Результати експериментів (3-я серія) (прилад ОТМ-1)

Зразок/Твердість	НВ 1	НВ 2	НВ 3	НВ середнє
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +KMnO <sub>4</sub> з обмідненою з вигладжуванням	168	172	174	172
	170	172	168	
	174	170	168	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +KMnO <sub>4</sub> без обміднення з вигладжуванням	163	166	165	162
	164	168	168	
	166	164	166	
Вигладжування без нанесення покриттів	140	142	146	143
	146	140	144	
	142	144	146	
Вихідна деталь сталь 30	128	130	124	126
	126	124	120	
	126	128	132	

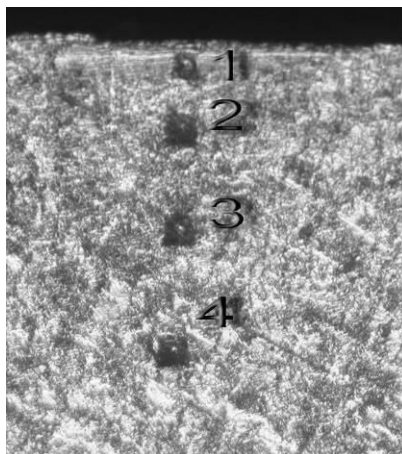


Рисунок 3.56 – Мікроструктура зразка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + KMnO<sub>4</sub> без попереднього обміднення і з наступним вигладжуванням, збільшення ×100

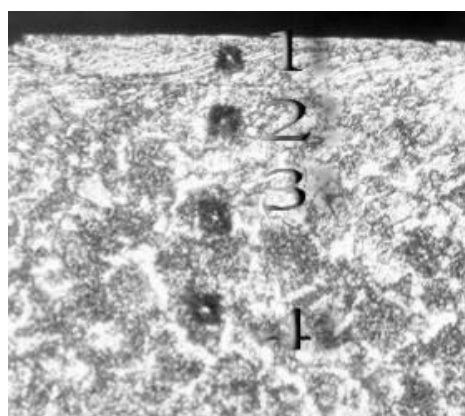


Рисунок 3.57 – Мікроструктура зразка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + KMnO<sub>4</sub> з попереднім обмідненням і наступним вигладжуванням, збільшення ×100

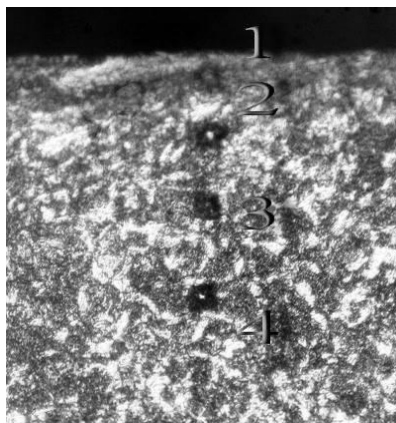
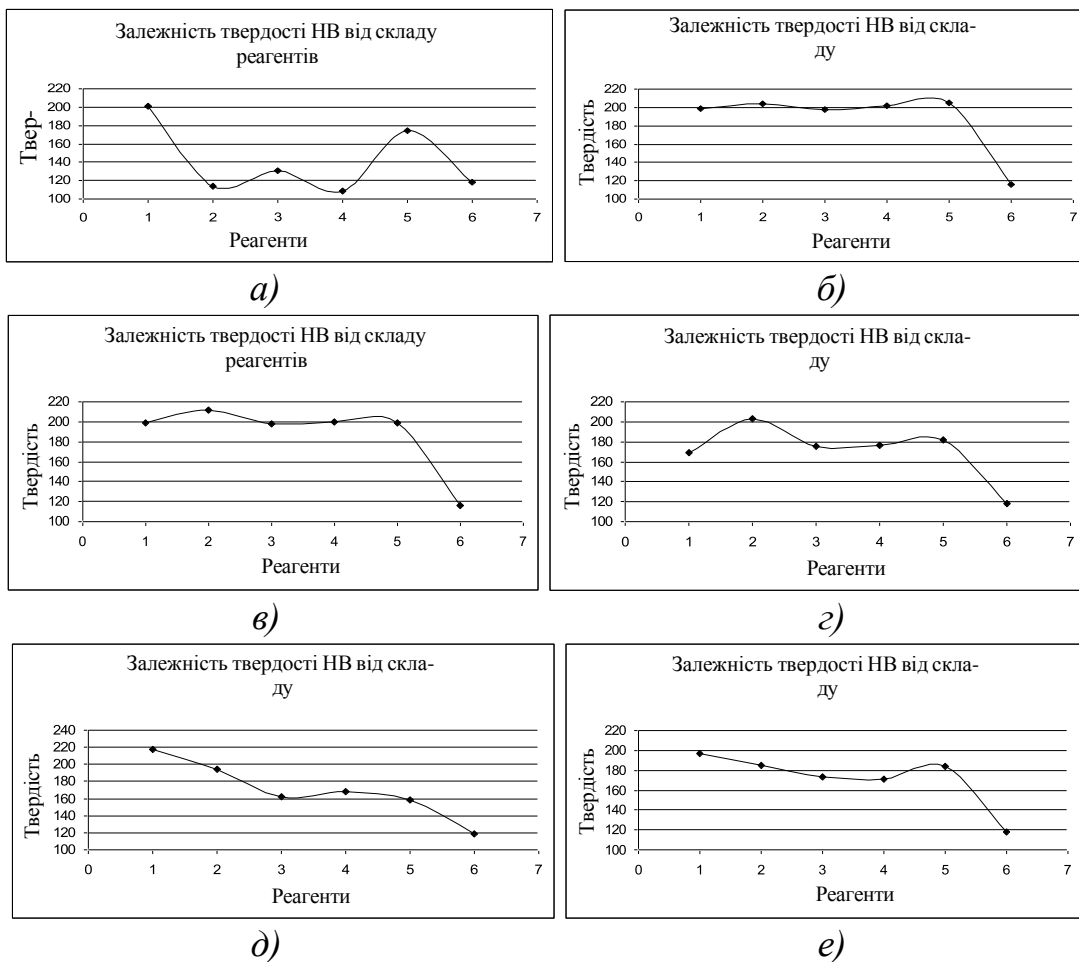


Рисунок 3.58 – Мікроструктура зразка з вигладжуванням, збільшення  $\times 100$

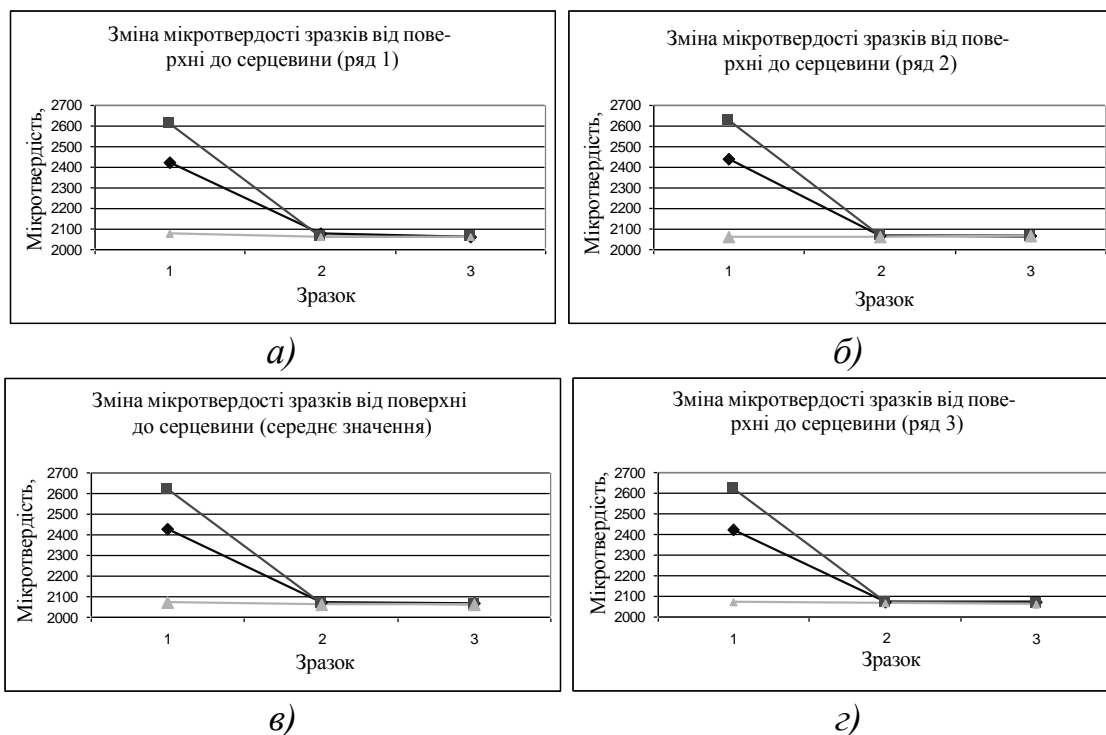
Для дослідів 1-ї серії з табличними даними побудовані графічні залежності (рис. 3.59), на графіку прийнята наступна нумерація складів сумішей: 1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$ ; 3 –  $\text{KMnO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 4 –  $\text{KMnO}_4 + \text{CЧ10}$ ; 5 –  $\text{KMnO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ .



а – експеримент № 1; б – експеримент № 2; в – експеримент № 3;  
г – експеримент № 4; д – експеримент № 5; е – середні значення п'яти експериментів

Рисунок 3.59 – Залежність твердості зразків від складу СВС-реагентів

Для дослідів 2-ї серії з табличних даних побудовані графічні залежності (рис. 3.60), на залежності прийнята наступна нумерація зразків: 1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  з обмідненням; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  без обміднення; 3 – вигладжування.



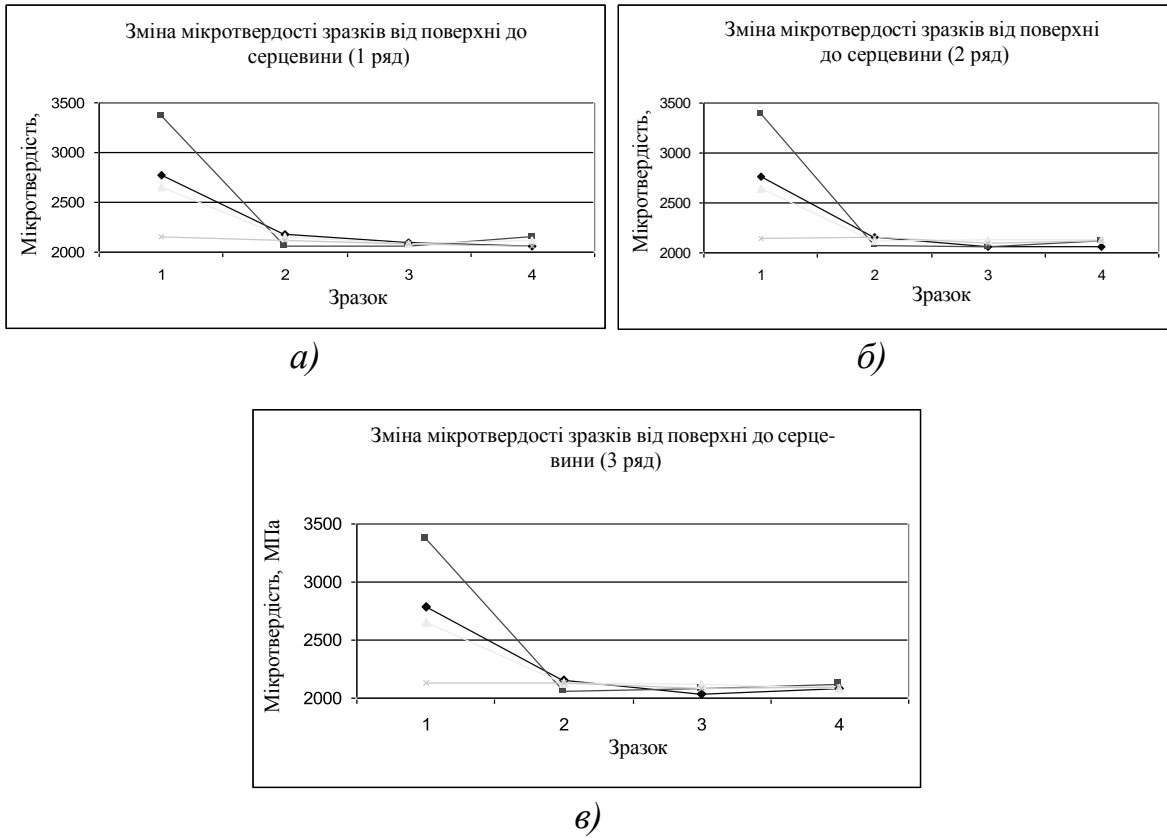
а – експеримент № 1; б – експеримент № 2; в – експеримент № 3;  
г – середні значення трьох експериментів

Рисунок 3.60 – Залежність твердості зразків від наявності шару міді

Для дослідів 3-ї серії побудовані графічні залежності (рис. 3.61), на графіку прийнята наступна нумерація зразків: 1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  з обмідненням і з вигладжуванням; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  без обміднення і з вигладжуванням; 3 – вигладжування; 4 – вихідний матеріал.

Побудовано графічні залежності (за середнім значенням) (рис. 3.62), на графіку прийнята наступна нумерація зразків: 1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  з обмідненням і з вигладжуванням; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{KMnO}_4$  без обміднення і з вигладжуванням; 3 – вигладжування; 4 – вихідний матеріал.

Аналізуючи отримані результати експериментів, можна помітити значне зростання твердості зразків. Це ще раз свідчить про необхідність подальших досліджень у цьому напрямку. Найбільш твердим серед зразків є оброблений складом № 1, який складається з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в пропорції 1:1. Наступним за твердістю є склад № 2, що складається з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{KMnO}_4$  також у співвідношенні 1:1. Дуже близькі до нього значення твердості має зразок № 5, зі складом  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у пропорційному співвідношенні 1:1:1. Найнижчі значення, приблизно рівні за величиною, мають зразки, оброблені сумішами № 3, 4, до складу яких входять  $\text{KMnO}_4$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$  і  $\text{C}\text{H}10$ ; їх склад відрізняється лише часткою вуглецю. В обох сумішах співвідношення реагентів 1:1.



*а – експеримент № 1; б – експеримент № 2; в – експеримент № 3  
Рисунок 3.61 – Залежність твердості зразків від наявності шару міді з наступною обробкою вигладжуванням*



*Рисунок 3.62 – Залежність твердості зразків від наявності шару міді з наступною обробкою вигладжуванням*

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що чим більше частка  $Al_2O_3$  у складі СВС-суміші, тим більше твердість обробленого зразка. Це підтверджує висновки попередніх дослідників про те, що Al є одним з кращих СВС-реагентів.

Загальна твердість зразків у середньому збільшилася в 1,8...2,2 рази.

З отриманих знімків металографічної структури також можна зробити висновок, що найбільш глибокий шар на поверхні деталей вийшов у процесі впровадження сполук порошків  $KMnO_4 + Al_2O_3$ ,  $KMnO_4 + FeC + Al_2O_3$  (на зразку № 2 зміцнений шар склав 0,9 мм, на зразку № 5, відповідно, 0,1 мм). Марганець – найважливіший компонент сталі. Застосування його у якості легуючого елемента сприяє підвищенню прогартовуваності сталі, характеризує глибину загартованої зони при термічній обробці. При введенні в сталь 10...12 % марганцю вона розмагнічується. Алюміній підвищує жаростійкість і корозійну стійкість сталі. Алюміній має високу теплопровідність, стійкість до корозії за рахунок швидкого утворення міцних оксидних плівок, що захищають поверхню від подальшої взаємодії. Уведення алюмінію сприяє утворенню захисної плівки з оксиду алюмінію та зменшенню розмірів зерна.

Важливо відзначити, що при проведенні СВС-реакції температура в зоні горіння сягає від 900 до 1 000 °С, що відповідає температурі гартування. Так як охолодження проводиться на повітрі, утворюється структура менш напружена і тверда, ніж мартенсит, троостит. Вона не вимагає наступного відпуску. Це призводить до того, що на виході ми маємо високу твердість і достатню пластичність поверхневого шару.

Після аналізу результатів, отриманих на першому етапі досліджень, було прийнято рішення про більш глибоке подальше дослідження саме суміші  $KMnO_4 + Al_2O_3$ , яка у процесі проведення СВС-реакції найбільш ефективно проявила себе.

У ході проведення експериментів на деякі зразки наносився додатковий шар міді перед тим, як проводити СВС-реакцію. Мідні покриття захищають сталь від корозії тільки в тому випадку, якщо вони безпористі. Якщо в мідному покритті існують пори, що досягають підкладки, то при доступі вологи утворюються корозійні пари, в яких розчинним електродом є сталева підкладка, в результаті чого з'являються виразки під покриттям, що призводять до його відшарування [121].

Мідні покриття застосовують в основному як підшар при нанесенні багатошарових покриттів. Мідь і мідні покриття можна хімічно і електрохімічно фарбувати в різні кольори.

Функціональні мідні покриття застосовуються для захисту сталі від цементації. Дуже добра електропровідність міді широко використовується в електротехніці й електроніці. Прикладом цього слугують хвилеводи і друковані плати. Художня промисловість використовує обміднення для отримання точних копій цінних різьблень, медальйонів і т. д.

Основні види електролітів для електролітичного обміднення – ціанідні і кислі (переважно сульфатні).

Пірофосфатну, фторборатну і аміносульфінову ванни застосовують для спеціальних цілей. У цьому випадку використовується сульфатний розчин [118]. З появи гальванотехніки і до нинішніх днів користуються застосованим визнанням через їх простий склад, легкість обслуговування і катодний вихід по струму, що досягає 100 %.

З отриманих даних видно, що дійсно мідь не пропустила до серцевини деталі суміш СВС-реагентів і в той же час пом'якшила поверхневий шар. У цьому є і свої переваги. Мідь підвищує зносостійкість деталей, корозійну стійкість, а також відноситься до досить дешевих видів покриттів. Якщо потрібні велика міцність і жорсткість, то шар міді наносити не варто, так як оксидна плівка теж захищає деталь від корозії. Якщо ж потрібні хороші антифрикційні якості та зниження адсорбції, то шар міді просто незамінний.

Після проведення даного етапу досліджень було прийнято рішення про проведення комбінованого процесу зміцнення деталі, яке б дозволило не тільки підвищити твердість і зносостійкість, але й поліпшити якість поверхні. Таким способом є вигладжування з пропусканням імпульсних струмів. Цей метод електрофізичного оброблення не тільки збільшує твердість поверхневого шару, але й покращує якість поверхні деталі [125]. Так, при одноразовому точінні і наступному електроімпульсному вигладжуванні можна домогтися збільшення твердості в 1,1...1,3 рази і значення шорсткості  $Ra = 1,25...0,7$  мкм. У підсумку, при комбінованій обробці отримується сумарне збільшення твердості більш ніж в 1,5...2 рази.

Результати дослідів показали, що найбільше збільшення твердості – у зразка без обміднення з нанесенням покриття і подальшого вигладжування – 1,3 рази. При цьому поверхня була дзеркальною,  $Ra = 0,63$  мкм. Особливу увагу варто звернути на фотографії шліфів зразків III порядку – на них чітко видна дрібнозерниста структура зразків. Це є величезною перевагою, так як таку структуру дуже складно отримати іншими методами.

Так як останні експерименти проводилися на досить твердій сталі, а до цього покриття наносилися на м'які матеріали, то точний результат не можна було передбачити. Після проведення експериментів впевнено можна сказати, що нанесення зносостійких покриттів методом СВС-реакції ефективніше проявляють себе на м'яких, менш вуглецевих сталях, ніж на твердих конструкційних [126–130].

### **3.6 Електроімпульсне вигладжування з використанням СВС-реакцій**

Найбільш цікавою комбінацією методів ППД є електромеханічне оброблення (ЕМО). Процеси, що протікають при ЕМО, варті більшої уваги, зокрема, теплові процеси в поверхневому шарі матеріалу. Це і процеси формування термом'яких напруг, фазові перетворення, і зміна кінетики хімічних реакцій, і перерозподіл вуглецю та інших елементів у матеріалі і



на його поверхні, і дифузійні процеси, які безпосередньо впливають на протікання поліморфних перетворень, і еволюція температурного поля в матеріалі за рахунок зміни концентрації фазового переходу і теплофізичних характеристик металу, і хімічні реакції утворення карбідів, нітридів, оксидів та інших сполук, що супроводжуються зміною електронної будови хімічних зв'язків окремих фаз в результаті дії високих температур, тисків і електролітичних процесів.

Електро механічне зміцнення змінним струмом забезпечує формування більш чіткої (різкої) границі між зміцненим поверхневим шаром і вихідним металом серцевини деталі, при цьому зміцнена структура має більш високі механічні властивості і характеризується меншою травимістю, ніж структура поверхневого шару, зміцненого постійним струмом. Ці обставини пояснюються більш високою інтенсивністю (швидкістю) теплових процесів у разі ЕМО змінним струмом внаслідок його пульсацій, а також утворенням окремих фрагментів зміцненої структури еліпсоїдної форми (кожен з яких відповідає окремому електричному імпульсу), що мають велику поверхню контакту з навколишнім холодним металом, що призводить до більш інтенсивної тепловіддачі і їх «різкому» гартуванню [48].

Залежно від схеми здійснення електричних і силових параметрів режиму, умов проведення, властивостей оброблюваних матеріалів і ряду інших факторів ЕМО можна поділити на кілька видів [47, 49]:

- електро механічне згладжування (ЕМЗ) – гаряче пластичне деформування мікронерівностей з метою досягнення мінімальної шорсткості. Деяке зміцнення поверхневого шару, що має при цьому місце, має переважно деформаційний характер;

- електро механічне зміцнення (ЕМЗм) – підвищення властивостей міцності поверхневого шару за рахунок зміни структурного і фазового складу в результаті температурно-силового впливу. Часто додатково виділяють високотемпературне ЕМЗ, при якому температура в зоні оброблення перевищує критичну температуру фазових перетворень і на поверхні металу формується структура білого шару (гарденіту), і низькотемпературне, при якому зміцнення здійснюється без протікання мартенситних перетворень, а на поверхні деталі формується гарячодетформована структура;

- електро механічне відновлення (ЕМВ) – зміна розмірів оброблюваної поверхні за рахунок гарячої пластичної висадки деякого об'єму металу із зони оброблення;

- електро механічний відпуск (ЕМВід) – частковий локальний (точковий) відпуск поверхневого шару деталей із загартованої сталі з метою підвищення пластичних властивостей матеріалу, як правило, у місцях концентрації напруг;

- імпульсне електро механічне зміцнення (ІЕМЗ) – різновид високотемпературного ЕМУ, в результаті якого під дією імпульсів електричного струму на поверхні деталі формується регулярна структура, що складається

з окремих зміцнених фрагментів білого шару, що чергуються з не зміцненими зонами або зонами вторинного відпуску.

Як показують численні дослідження, деталі, зміцнені інструментом з нерухомим кріпленням, в порівнянні з деталями, зміцненими обертовим інструментом, мають більшу зносостійкість.

Для здійснення процесу електроімпульсного вигладжування у якості індентора використана двостороння тангенціальна пластина для чорнового точіння LNMX221016R/L-НТ, що має спіралеподібну різальну кромку для роботи з великою глибиною різання на високій подачі (рис. 3.63).

Процес електроімпульсного вигладжування здійснювався закругленими гранями пластини LNMX 221016R/L-НТ, які не беруть участь безпосередньо в процесі тангенціального точіння і після зносу пластини на токарній операції залишаються незачепленими.

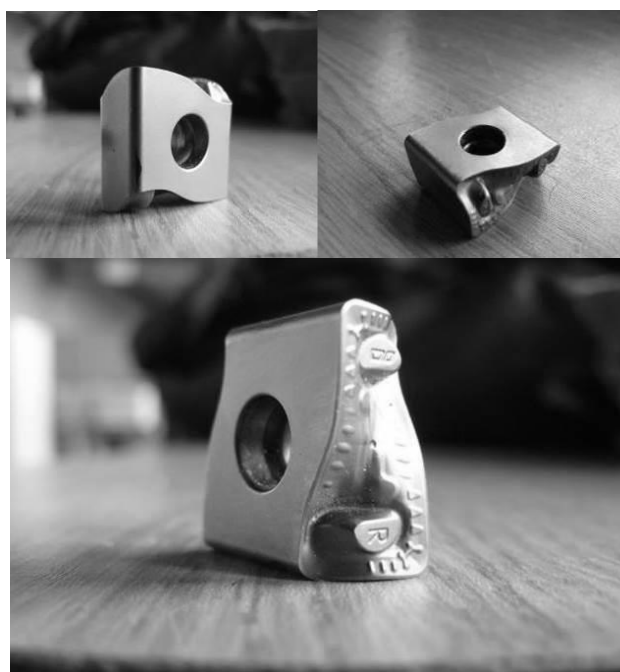


Рисунок 3.63 – Пластина LNMX 221016 R/L-НТ

Пластина в тримачі розташовується під кутом 45 градусів відносно площини різання (рис. 3.64). Крім цього, відбиток контакту із заготовкою буде мати форму еліпса, на відміну від вигладжування сферичним індентором або кулькою.

Оброблення, засноване на пластичній деформації тонкого поверхневого шару, має в порівнянні з обробкою гострінням, шліфуванням, поліруванням, доведенням ряд переваг, у тому числі:

- зберігається цілість волокон металу і утворюється дрібнозерниста структура-текстура в поверхневому шарі;
- відсутнє шаржування оброблюваної поверхні частинками шліфувальних кругів, полірувальних паст;
- відсутні термічні дефекти;

- стабільні процеси оброблення, що забезпечують стабільну якість поверхні;
- можна досягати мінімального параметра шорсткості поверхні ( $Ra = 0,1 \dots 0,05$  мкм і менше), як на термічно необроблених сталях, кольорових сплавах, так і на високоміцних матеріалах, зберігаючи вихідну форму заготовок;
- можна зменшити шорсткість поверхні в кілька разів за один робочий хід;
- створюється сприятлива форма мікронерівностей з більшою часткою опорної площі;
- можна утворювати регулярність мікрорельєфів із заданою площею поглиблень для затримання мастильного матеріалу;
- створюються сприятливі стискаючі залишкові напруги в поверхневому шарі;
- плавно і стабільно підвищується мікротвердість поверхні.



*Рисунок 3.64 – Вигладжувач*

Зазначені та інші переваги методів ППД забезпечують підвищення зносостійкості, опору втоми, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20...50 %, а в деяких випадках – в 2-3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу і призначення оптимальних режимів оброблення).

До недоліків методу можна віднести:

- переважна більшість методів не підвищує геометричної точності поверхні, зазвичай зберігається точність, досягнута на попередній операції;
- у зв'язку зі створенням корисних стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі при обробці тонкостінних і нерівножорстких деталей (товщиною 3...5 мм) може відбуватися деформація поверхні 5...10 мкм і більше;
- у зв'язку з пластичною плинністю металу при використанні деяких методів оброблення ППД на крайках оброблюваних поверхонь утворюються рівномірні напливи металу товщиною 0,03...0,3 мм.

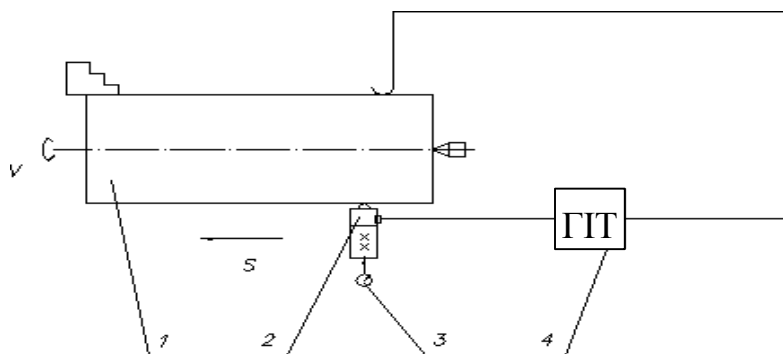
Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники мікротвердості і шорсткості поверхні після електроімпульсного вигладжування.

Приймаються наступні фактори, які змінюються:

- зусилля навантаження 250...750 Н;
- сила струму 2...10 А.

Експериментальна установка (рис. 3.65) складається з наступного обладнання:

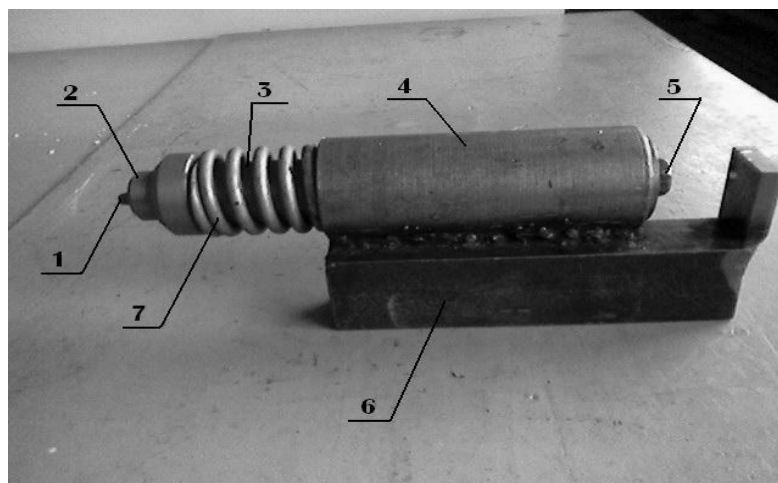
- токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625;
- генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_{и} = 0 \dots 100$  кГц; сила струму  $I = 0 \dots 30$  А; напруга  $U = 0 \dots 10$  В; тривалість імпульсів  $t_{и} = 0 \dots 2$  мс.



1 – заготовка; 2 – вигладжувач; 3 – індикатор годинникового типу;  
4 – генератор імпульсних струмів

Рисунок 3.65 – Схема експериментальної установки

В якості інструменту застосовується вигладжувач (рис. 3.66, 3.67) з твердого сплаву Т15К6.



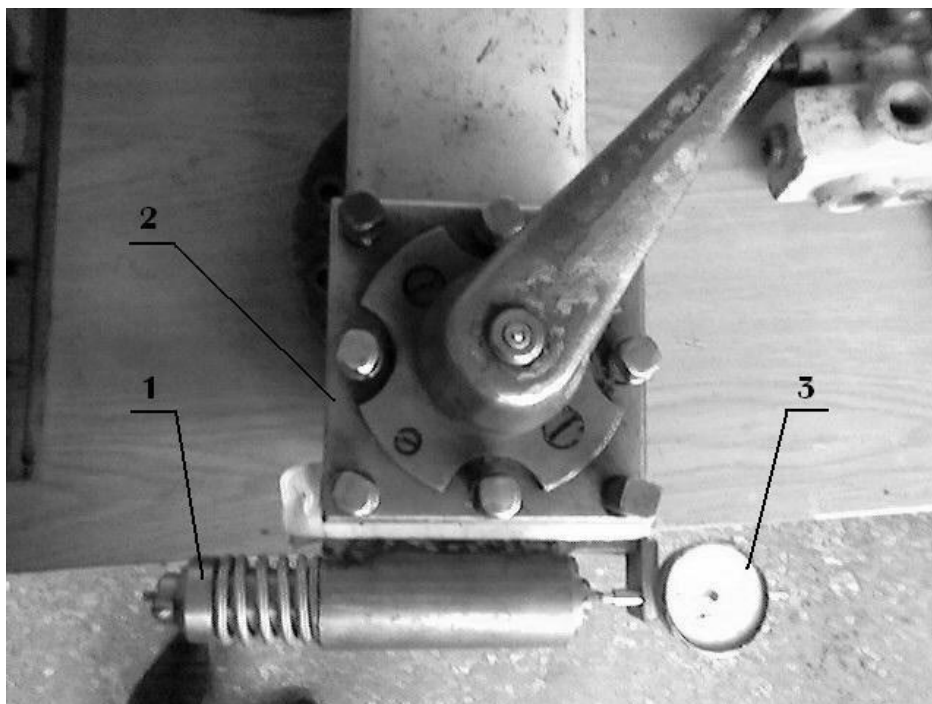
1 – індентор; 2 – установча втулка; 3 – дистанційна втулка; 4 – корпус;  
5 – регулювальний гвинт; 6 – державка; 7 – пружина

Рисунок 3.66 – Вигладжувач

Для проведення експерименту використовується заготовка зі сталі 45 ГОСТ 1050–88, Ø30 мм, твердість 228 НВ, шорсткість Ra = 6,3 мкм.

Оброблення ведеться на наступних режимах:

- частота обертання 80 об/хв;
- швидкість оброблення 7,54 м/хв;
- поздовжня подача інструменту 0,2 мм/об;
- шпаруватість 2...3;
- частота струму 25 Гц.



1 – вигладжувач; 2 – різцетримач; 3 – індикатор годинникового типу  
Рисунок 3.67 – Вигладжувач, закріплений у різцетримачі

Визначаються інтервали зміни режимів вигладжування, в яких проводиться оброблення деталей, попередньо вибирається лінійна модель рівняння регресії. Вихідні дані представлені у вигляді таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Вихідні дані моделювання

Контрольовані параметри	Верхній рівень	Нижній рівень	Основний рівень	Інтервал варіювання
Зусилля навантаження F, Н	750	250	500	250
Сила струму I, А	10	2	6	4

Перевірка отриманих математичних моделей на адекватність дала негативний результат. У зв'язку з цим для оброблення експериментальних

даних і встановлення ступеня впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні застосуємо метод нейросітьового моделювання. В якості входів приймемо технологічні режими (зусилля навантаження F і силу струму I), а в якості виходів – мікротвердість і шорсткість обробленої поверхні.

Поля бази даних (вихідні симптоми):

NOMER

F

I

Поля бази даних (кінцеві симптоми):

RA

HB

Передоброблення вхідних полів БД для подачі сіті:

$$\text{NOMER} = (\text{NOMER} - 2) / 1$$

$$F = (F - 500) / 250$$

$$I = (I - 6) / 4$$

Функціональні перетворювачі :

$$\text{Сигмоїда1 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

$$\text{Сигмоїда2 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

$$\text{Сигмоїда3 (A)} = A / (0,1 + | A |)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Синдром1\_1} = \text{Сигмоїда1}$$

$$(0,1669729 * \text{NOMER} + 0,3051239 * F)$$

$$\text{Синдром1\_2} = \text{Сигмоїда1}$$

$$(0,5936936 * \text{NOMER} - 0,4599027 * F)$$

$$\text{Синдром1\_3} = \text{Сигмоїда1}$$

$$(0,07531498 * \text{NOMER} + 0,1372089 * F + 0,2003948 * I + 0,2828768)$$

$$\text{Синдром1\_4} = \text{Сигмоїда1}$$

$$(- 0,130831 * \text{NOMER} + 0,6240569 * F + 0,2013195 * I)$$

$$\text{Синдром1\_5} = \text{Сигмоїда1}$$

$$(- 0,5666391 * \text{NOMER} - 0,8703556 * F + I)$$

Синдроми 2-го рівня:

$$\text{Синдром2\_1} = \text{Сигмоїда2}$$

$$(- 0,09677187 * \text{Синдром1\_1} + 0,01282916 * \text{Синдром1\_2} - 0,6113301 *$$

\* Синдром1\_5)

$$\text{Синдром2\_2} = \text{Сигмоїда2}$$

$$(0,5216165 * \text{Синдром1\_3} + 0,002078022 * \text{Синдром1\_4} + 0,4989871 *$$

\* Синдром1\_5 + 0,2023727)

$$\text{Синдром2\_3} = \text{Сигмоїда2}$$

$$(- \text{Синдром1\_1} - \text{Синдром1\_4} + 1)$$

$$\begin{aligned} \text{Синдром2\_4} &= \text{Сигмоїда2} \\ &(0,7904941 * \text{Синдром1\_1} - 0,7422429 * \text{Синдром1\_3} + 0,6592935 * \\ * \text{Синдром1\_} \\ &4 + 0,6137868 * \text{Синдром1\_5}) \end{aligned}$$

Синдроми 3-го рівня:

$$\begin{aligned} \text{Синдром3\_1} &= \text{Сигмоїда3} \\ &(0,6105439 * \text{Синдром2\_1} + 0,1531923 * \text{Синдром2\_2} + 0,2534882 * \\ * \text{Синдром2\_4}) \\ \text{Синдром3\_2} &= \text{Сигмоїда3} \\ &(- 0,1993812 * \text{Синдром2\_2} + 0,1647693 * \text{Синдром2\_3} + 0,1542542 * \\ * \text{Синдром2\_} \\ &4 + 0,1509229) \end{aligned}$$

Кінцеві синдроми:

$$\begin{aligned} \text{RA} &= \text{Синдром3\_1} - \text{Синдром3\_2} + 0,2554778 \\ \text{HB} &= - \text{Синдром3\_1} - \text{Синдром3\_2} + 0,3793604 \end{aligned}$$

Постоброблення кінцевих синдромів:

$$\begin{aligned} \text{RA} &= ((\text{RA} * + 3,1999998986721) + 3,99999991059303)/2 \\ \text{HB} &= ((\text{HB} * 25) + 491)/2 \end{aligned}$$

Порівняльний аналіз зв'язків технологічних режимів з показниками якості обробленої поверхні представимо у вигляді залежностей, побудованих на основі даних нейросітьового моделювання.

Аналіз залежностей, представлених на рис. 3.68, показав, що найменша шорсткість  $R_a = 0,97$  мкм досягається при значенні сили струму  $I = 2$  А, а найбільша мікротвердість 249 HB досягається при значенні сили струму  $I = 10$  А.

Найменша шорсткість  $R_a = 0,9$  мкм досягається при значенні сили струму  $I = 2$  А, а найбільша мікротвердість 256 HB досягається при значенні сили струму  $I = 6$  А (рис.3.69).

Аналіз залежностей, наведених на рисунку 3.70, показав, що найменша шорсткість  $R_a = 2,9$  мкм досягається при значенні сили струму  $I = 4$  А, а найбільша мікротвердість 258 HB досягається при значенні сили струму  $I = 5$  А.

Таким чином, на основі досліджень впливу технологічних режимів на якість виробів при електроімпульсному вигладжуванні побудована нейроподібна сіть (модель) і виконане математичне оброблення даних. Встановлено, що при зміцненні робочої поверхні деталі найбільше впливає на мікротвердість і шорсткість поверхні зусилля навантаження зі значимістю 1 і менше – сила струму зі значимістю 0,83. Отримано підтвердження того, що керуючи двома технологічними параметрами оброблення, можна досягти оптимальних режимів електроімпульсного вигладжування (максимального показника мікротвердості при мінімальній шорсткості поверхні

деталі). В умовах експерименту цьому відповідала сила струму 4...5 А. Така залежність найбільш яскраво простежується при максимальному зусиллі навантаження. При малих зусиллях навантажування спостерігається зворотна картина: відбувається зниження шорсткості і мікротвердості. В якості рекомендацій можна прийняти, що в процесі електроімпульсного вигладжування слід регламентувати зусилля навантаження так, щоб його значення відповідало рекомендованому діапазону.

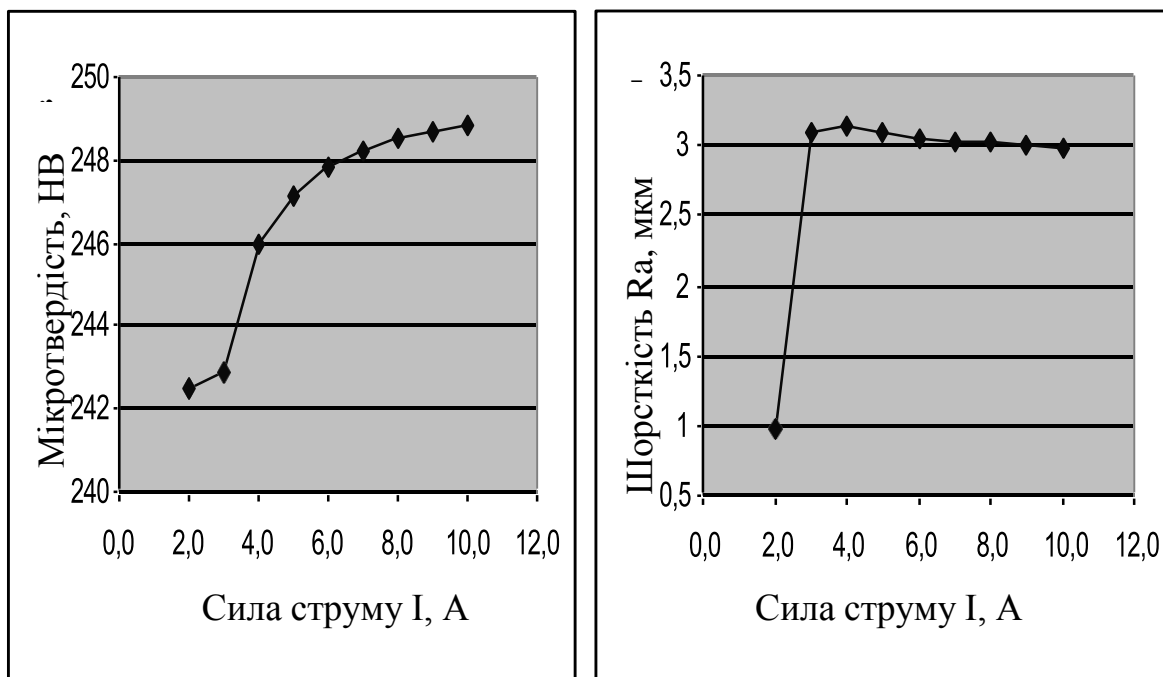


Рисунок 3.68 – Залежність шорсткості і мікротвердості від сили струму при мінімальній напрузі

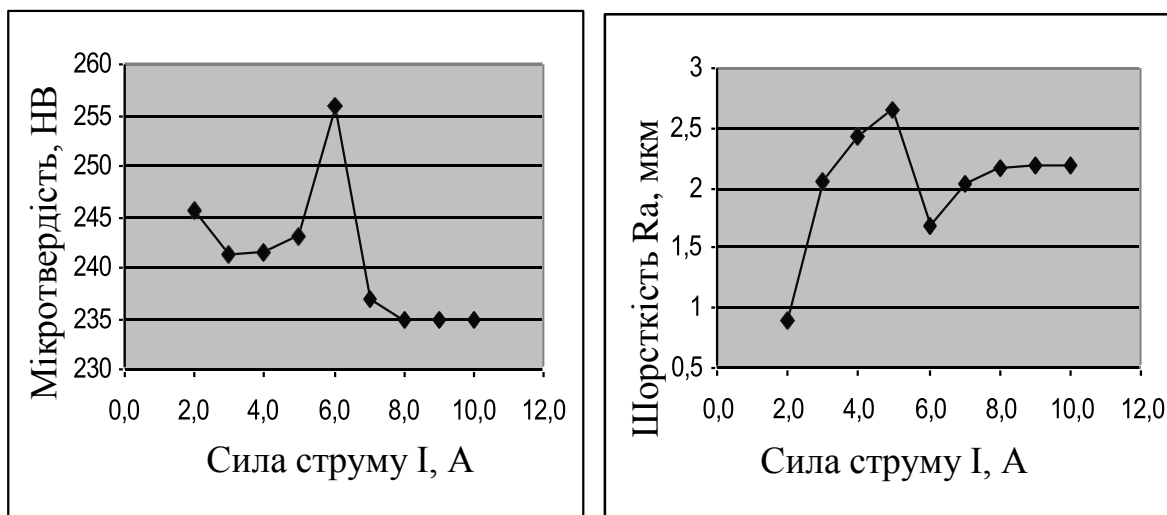


Рисунок 3.69 – Залежність шорсткості і мікротвердості від сили струму при середньому навантаженні



Метою дослідження методу вигладжування деталей машин, попередньо зміцнених нанесенням зносостійких покриттів з використанням СВС-реакцій, є вивчення поверхневої структури заготовки в результаті нанесення зносостійких покриттів методом СВС-реакцій з наступною обробкою поверхнево-пластичним деформуванням методом вигладжування, а також вивчення впливу отриманого поверхневого шару на експлуатаційні характеристики деталей машин. На підставі отриманих результатів побудована нейронна каскадна сіть.

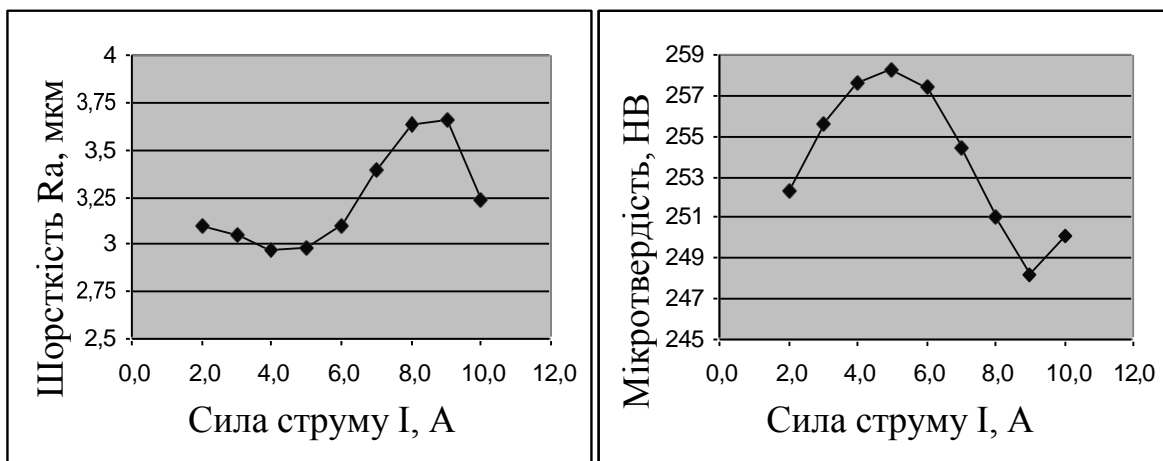


Рисунок 3.70 – Залежність шорсткості і мікротвердості від сили струму при максимальній нарузі

Експериментальна установка складається з наступного обладнання:  
 – токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625;  
 – генератор постійного струму.

В якості інструменту застосовуються вуглецевий електрод і вигладжувач з індентором з твердого сплаву Т15К6.

Для проведення експерименту використовується заготовка зі сталі 30 ГОСТ 2591–71: Ø20 мм, твердість 120 НВ, шорсткість Ra = 3,2 мкм.

Послідовність проведення експерименту: зміцнення зразка № 1 Ø20 мм зі сталі 30 здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті мод. 1К625 з попереднім нанесенням шару міді методом електролізу, зверху якого наноситься реагент (рис. 3.71). На електрод, який переміщається зі швидкістю 0,72 мм/об, подається електричний імпульс від генератора імпульсів (постійний струм з характеристиками: напруга  $U = 16$  В, частота  $f = 50$  Гц). Деталь обертається з частотою  $n = 100$  об/хв. Між електродом і деталлю забезпечується зазор для проходження імпульсу, товщина шару екзотермічної суміші реагентів – 1 мм. Після цього здійснюється пластичне деформування поверхні методом вигладжування твердосплавним індентором із зусиллям 200 Н зі швидкістю 7 м/хв і подачею  $S = 0,2$  мм/об з охолодженням маслянистою сумішшю.

Зразок № 2 обробляється тим же способом, що і зразок № 1, але без нанесення міді.

Зразок № 3 піддавався ППД методом вигладжування твердосплавним індентором із зусиллям 200 Н зі швидкістю 7 м/хв і подачею  $S = 0,2$  мм/об з охолодженням маслянистою сумішшю без нанесення зносостійких покриттів і використання СВС-реакції.

Результати експериментів заносяться до таблиці 3.11.

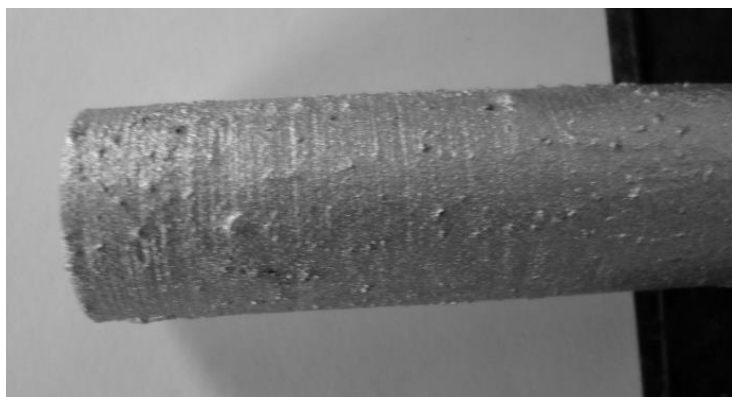


Рисунок 3.71 – Заготовка з покриттям  $Al+KMnO_4$

Таблиця 3.11 – Результати експериментальних досліджень

Номер зразка	Характеристики оброблення	Твердість зразків, НВ		
		1	2	3
1	$Al+KMnO_4$ з обмідненням	168	170	174
2	$Al+KMnO_4$	194	188	192
3	Вигладжування без покриття	140	146	142
4	Заготовка без зміцнення	120	122	118

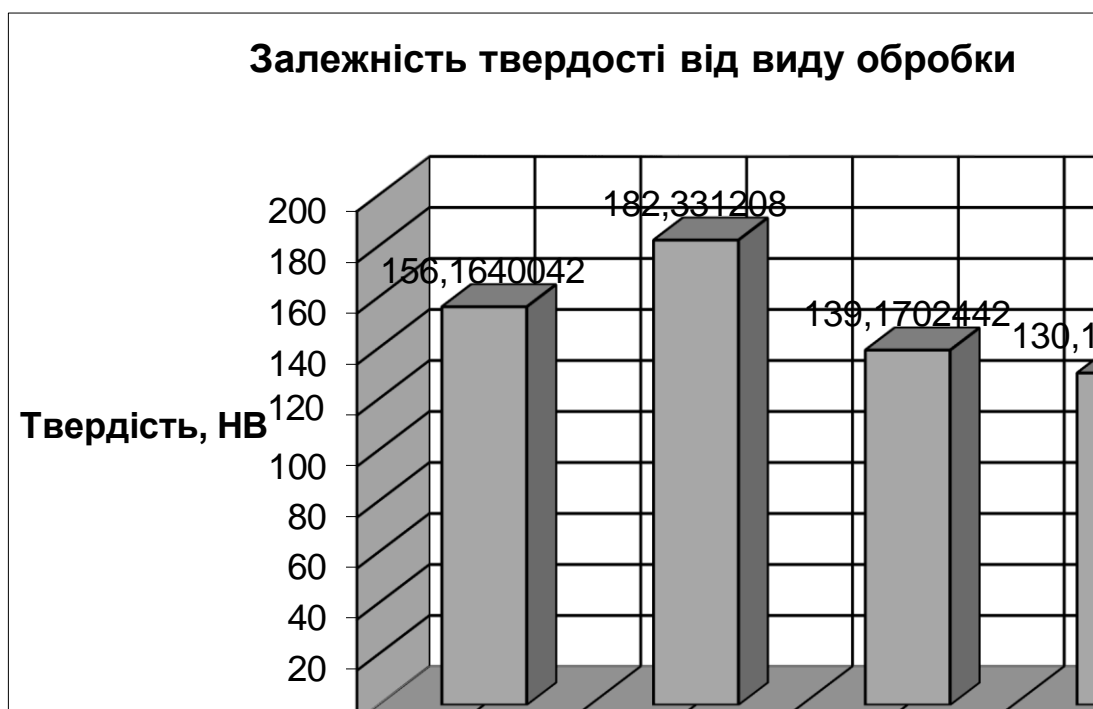
На основі отриманих результатів будуюмо нейронну дворівневу каскадну сіть.

Виходячи з усереднених значень побудованої каскадної сіті зображаємо графічну залежність твердості від виду обробки (рис. 3.72).

Дані експерименту показали, що в процесі зміцнення деталі найбільше значення твердості отримали при вигладжуванні з попереднім покриттям поверхні  $Al + KMnO_4$  проведенням СВС-реакції. Зразок, покритий  $Al + KMnO_4$  з обмідненням, не показав істотно більшого значення твердості, ніж аналогічний зразок без покриття.

З результатів експерименту можна припустити, що основним чинником, що впливає на мікротвердість оброблюваної заготовки, є марганець, який, як відомо, підсилює схильність сталі до наклепу. Виходячи з атомної будови, проникнення марганцю і алюмінію в кристалічну решітку сталі практично рівновірогідні. Тому зразок № 2 значно підвищив мікротвердість. Що стосується зразка № 1, то в даному випадку мікротвердість істотно не збільшилася в порівнянні із зразком № 3, зміцненим ППД

без покриттів. Імовірно, це пов'язано з тим, що мідь екранувала проникнення марганцю і алюмінію в кристалічну решітку сталі. Сама ж мідь погано проникає в ґрати сталі, тому її атомний радіус значно більше атомного радіусу заліза.



*Ряд 1 – Al+KMnO<sub>4</sub> з обмідненням; ряд 2 – Al+KMnO<sub>4</sub>;  
ряд 3 – вигладжування без покриттів; ряд 4 – заготовка без зміцнення*  
Рисунок 3.72 – Графічна залежність твердості від виду зміцнюючого оброблення

Експериментальні дослідження процесу електроімпульсного оброблення в лабораторних умовах із застосуванням нейросітьових моделей дозволяють стверджувати, що:

- мають місце області екстремуму режимів електроімпульсного вигладжування при обробці маловуглецевих і конструкційних сталей;
- збільшення твердості становить 30 і 60%, зниження шорсткості – на 3 (з 5 до 8-го) і 2 (з 5 до 7-го) класи для заготовок зі сталі 45 ГОСТ 1050–74 і сталі 05кп ГОСТ 7417–75 відповідно;
- підтверджено, що управління декількома технологічними параметрами оброблення дозволяє досягти оптимальних за досягненням екстремуму режимів електроімпульсного вигладжування (максимального показника твердості при мінімальній шорсткості поверхні деталі);
- досліджено комбінований метод поверхневого зміцнення шляхом вигладжування сталевих деталей машин, попередньо зміцнених нанесенням зносостійких покриттів з використанням СВС-реакцій.

### 3.7 Оброблення поверхонь виробів у середовищі ПАР

Сучасна тенденція створення промислової продукції, схвалена в промислово розвинених країнах, висуває все більш жорсткі вимоги з безпеки, комфортності, екологічності застосування. У зв'язку з цим зміст критерію якості трансформується від простого набору технічних характеристик (ресурс, матеріаломісткість, енергоємність, міцність) до комплексу ергономічних, екологічних та інших характеристик при заданому рівні технічних показників.

Висока якість виробу при його виготовленні забезпечується такими виробничими чинниками, як якість обладнання та інструменту, фізико-хімічні та механічні властивості матеріалів і заготовок, досконалість технологічного прогресу, якість оброблення і контролю, а також використання альтернативних, прогресивних, ресурсозберігаючих технологій, що дозволяють підвищити конкурентоспроможність продукції шляхом отримання високої якості при мінімальних витратах (рисунки 3.73).

Розглянемо такий чинник впливу на якість виробу, як сумарна погрішність оброблення. Похибка оброблення – це відхилення отриманого розміру деталі від заданого:

$$\omega_{\Sigma} = K_{\omega} \cdot \sqrt{\omega_k^2 + \omega_t^2 + \omega_j^2 + \omega_u^2 + \omega_f^2 + \omega_n^2 + \omega_{он}^2},$$

де  $\omega_{\Sigma}$  – сумарна похибка оброблення;

$K_{\omega}$  – коефіцієнт надійності;

$\omega_k$  – похибка, викликана кінематикою верстата;

$\omega_t$  – похибка, викликана температурними деформаціями;

$\omega_j$  – похибка, викликана надійністю технологічної системи;

$\omega_u$  – похибка, викликана зношенням різального інструменту;

$\omega_f$  – похибка, викликана похибкою форми;

$\omega_n$  – похибка, викликана похибками налаштування ТС;

$\omega_{он}$  – похибка, викликана впливом залишкових напружень.

Як видно з формули, однією зі складових, що впливають на сумарну похибку оброблення, є похибка, викликана впливом залишкових напружень.

Технологічними залишковими напруженнями називають механічні напруження, що існують в поверхневому шарі деталі машини при відсутності зовнішніх силових, теплових та інших впливів і є результатом нерівномірного пластичного деформування поверхневого шару матеріалу в технологічному процесі виготовлення деталі. В залежності від знака розрізняють стискаючі (негативні) і розтягуювальні (позитивні) залишкові напруження.

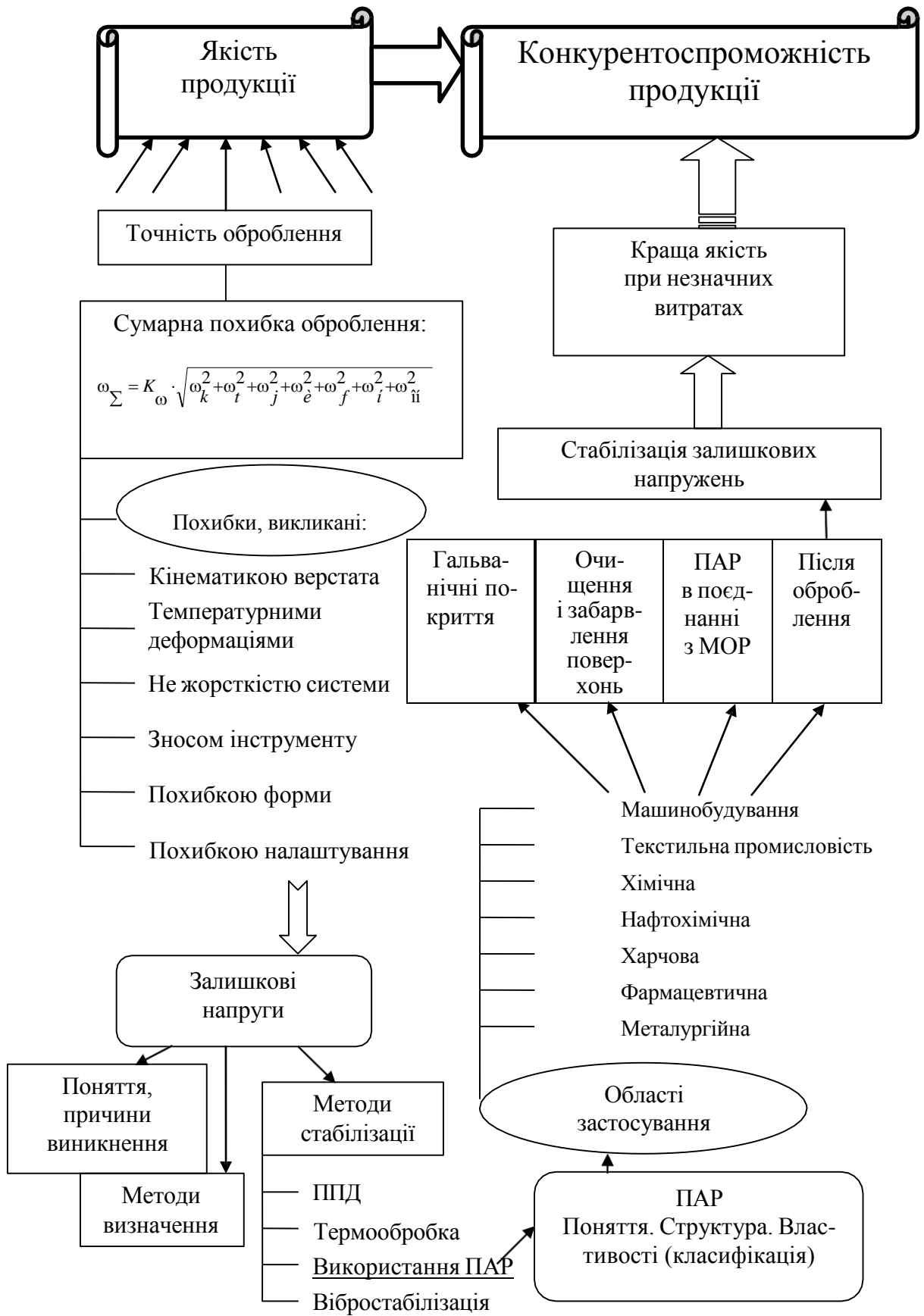


Рисунок 3.73 – Формування якості продукції

Технологічні залишкові напруги часто визначально впливають на експлуатаційні властивості деталей машин, насамперед на втомну міцність, зносостійкість, контактну жорсткість, корозійну стійкість, а також на точність їх форми.

З аналізу науково-технічної літератури випливає, що в одних випадках – для стабілізації точності прецизійних маложорстких і тонкостінних деталей, для зменшення ймовірності виникнення мікротріщин в поверхневому шарі деталі – доцільно зменшувати абсолютну величину залишкових напруг і їх градієнт по глибині поверхневого шару, в інших – для підвищення втомної міцності, зносостійкості і корозійної стійкості – формувати в поверхневому шарі стискаючі технологічні залишкові напруги, поширюючи їх при цьому на максимально можливу глибину. У всіх випадках формування розтягувальних технологічних залишкових напружень у поверхневому шарі деталей машин небажане.

Разом з тим висока ймовірність утворення саме розтягувальних залишкових напружень у поверхневому шарі заготовок характерна для цілого ряду заключних, насамперед шліфувальних, операцій технологічного процесу виготовлення деталей машин. Основна причина цього – домінуючий вплив теплового фактора, що проявляється в миттєвому локальному нагріві й охолодженні тонких поверхневих шарів металу під зоною різання.

У загальному випадку можливі наступні результати впливу залишкових напружень.

1. Якщо величина залишкових напруг перевищить межу міцності матеріалу, а жорсткість виробу висока, то в поверхневому шарі виникнуть тріщини внаслідок його розірвання.

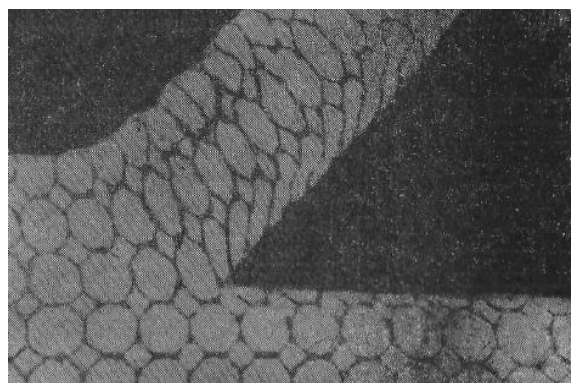
2. Якщо виріб являє собою маложорстку конструкцію, то відбудеться його деформація, величина якої може набагато перевищити допуск на точність форми або взаємного розташування поверхонь.

3. Якщо залишкові напруги нижчі межі міцності матеріалу, а виріб являє собою жорстку конструкцію, то видимих змін не відбудеться. Однак якщо експлуатаційні навантаження співпадуть зі знаком залишкових напружень, то виріб зруйнується при навантаженнях, нижчих, ніж заплановані, що надзвичайно небезпечно.

Зі сказаного вище випливає, що вимірювання та неруйнівний контроль технологічних залишкових напруг є найважливішою метрологічною проблемою.

Численні дослідження в цій області показали, що технологічні залишкові напруги технологічно керовані. Це означає, що і величина, і знак, і розподіл залишкових напружень по глибині поверхневого шару залежать від видів і режимів оброблення заготовок. Варіюючи параметрами оброблення і послідовністю методів оброблення заготовок, можна в кінцевому підсумку отримати сприятливі величину і розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі. Надзвичайно інформативним критерієм оцінки залишкових напруг є інтеграл від епюри їхнього розподілу по глибині.

Виділяють два основних фактори, що викликають виникнення залишкових напруг – пластична деформація при силовому впливі і нагрівання поверхневих шарів. На рисунку 3.74 показана пластична деформація поверхневого шару при різанні. Біля вершини різця при силовому то-чінні виникає пластична деформація розтягування, і після зняття зусилля в поверхневому шарі утворюються залишкові напруги стиснення. Внаслідок роботи деформації і тертя відбувається виділення тепла в процесі різання, яке призводить до великих температурних градієнтів і температурних напружень, що перевершують межу текучості матеріалу.



*Рисунок 3.74 – Пластична деформація поверхневого шару*

Пластична деформація стиснення, що виникла після встановлення нормальної температури в деталі, викликає появу розтягувальних залишкових напружень. Таким чином, два основні фактори при різанні – силовий і температурний – діють в протилежні сторони, що і пояснює істотну залежність величини і знака залишкових напружень від технологічного режиму оброблення.

Залишкові напруги зазвичай класифікують за ознаками протяжності силового поля і з фізичної сутності. Загальноприйнятою є класифікація за протяжністю силового поля.

Напруги першого роду – макронапруги. Вони охоплюють області, сумірні з розмірами деталі, і мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі.

Напруги другого роду – мікронапруги, поширюються на окремі зерна металу або на групу зерен.

Напруги третього роду – субмікроскопічні, що відносяться до викривлень атомної решітки кристала.

Залишкові напруги першого роду в деталі виникають в результаті різних технологічних факторів при її виготовленні. Їх величина визначається щільністю дислокацій, а знак залежить від характеру розташування однорідних дислокацій по відношенню до поверхні деталі. Стискаючі залишкові напруги виникають у разі переважаючого розташування біля поверхні безлічі позитивних дислокацій на паралельних площинах ковзання, а в разі розташування біля поверхні негативних дислокацій виникають залишкові напруги розтягнення.

Технологічні фактори (способи та режими оброблення поверхні, стан інструменту, системи та ступінь охолодження) визначально впливають на величину і знак залишкових напружень. Оброблення різанням (точіння) поверхні заготовки деталі зазвичай викликає появу напруг, що розтягують, величиною до 70 МПа. Глибина поширення їх знаходиться в межах від 50 до 200 мкм і залежить від умов формоутворення поверхні. При фрезеруванні виникають як розтягувальні, так і стискаючі напруги. При шліфуванні найчастіше виникають напруження розтягування.

Мікронапруги – місцеві залишкові напруги другого роду. Вони виникають у полікристалічних металах у процесі деформації великих обсягів у результаті взаємодії зерен. До залишкових напружень другого роду відносять також і напруги всередині окремого зерна, зумовлені мозаїчністю його структури – результат взаємодії між окремими блоками. Ці напруги є наслідком неоднорідності фізичних властивостей різних компонентів полікристала, а також обмежених умов деформації окремого зерна й анізотропії властивостей всередині його. Основними причинами їх виникнення є фазові перетворення, зміни температури, анізотропія механічних властивостей окремих зерен, межі зерен і розпадання зерна на фрагменти і блоки при пластичній деформації.

Скупчення великої кількості дислокацій в граничних шарах викликає численні спотворення атомної решітки, а це створює напруги третього роду. Разом з цим граничний шар – зона силової взаємодії між окремими зернами – створює поле мікронапружень, що охоплюють всю поверхню зерна.

Поділ обсягу зерна на блоки створює в зерні мікронапруги. Причиною виникнення їх є утворення кордону між блоками. У граничному шарі між блоками накопичуються дислокації і атоми домішок, які спотворюють кристалічну решітку і породжують напруження.

Відмінність мікро- і макронапруг полягає не тільки у величині масштабу їх прояву. Макронапруги можуть виникати в будь-якому суцільному однорідному ізотропному середовищі. Мікронапруги в такому матеріалі існувати не можуть, вони можуть виникати внаслідок істотної неоднорідності кристалічного матеріалу і його анізотропних властивостей. Тому при вивченні цієї проблеми будемо акцентувати увагу на макронапруги.

У літературі згадується широкий спектр різних методів визначення залишкових напружень:

- метод вимірювання прогинів, метод вимірювання деформацій для визначення залишкових напружень у стрижнях;
- метод смужок, метод плоских зрізів для визначення залишкових напружень у пластинках;
- метод кілець і смужок, метод Давиденкова для визначення остаточно-чких напружень в тонкостінних трубах;
- метод розточування, метод кілець, метод розрізання кілець, метод кубиків для визначення залишкових напружень у дисках;
- метод Закса, метод дисків для визначення залишкових напруг у порожнистих і суцільних циліндрах;



- метод звільнення, метод отворів для визначення залишкових напружень у поверхневих шарах деталі довільної форми;
- рентгенівський метод визначення залишкових напружень;
- розрахунковий метод: розрахунок залишкових напружень у стрижнях і кільцях, круглих пластинках і циліндрах за первинними деформаціями.

До відомих методів регулювання залишкових напружень відносять: низькотемпературний відпал, поверхнєве пластичне деформування, акустико-механічні способи оброблення, термоциклічну обробку.

Низькотемпературний відпал дозволяє знизити загальний рівень залишкових напружень, усунути концентратори напружень, стабілізувати структуру металу [133].

Поверхнєве пластичне деформування забезпечує створення умов нерівномірної деформації, після якої на поверхні виникають значні стискаючі залишкові напруги, розташовані під поверхневим шаром, менші за абсолютною величиною, які поширюються на велику товщину в порівнянні зі стискаючими залишковими напруженнями.

Акустико-механічні способи оброблення, до яких відносяться ультразвукове та вібраційне оброблення, сприяють перерозподілу дислокацій та зменшенню їх щільності в зонах скупчення. Є досвід використання ультразвукового оброблення різального інструменту для створення оптимальних залишкових напружень у поверхневому шарі для підвищення його стійкості в два, три рази [137].

Термоциклічне оброблення полягає в проведенні декількох циклів нагрівання та охолодження поверхневого шару. Є рекомендації щодо створення стискальних залишкових напружень при застосуванні термоциклічного оброблення інструментальних сталей [138].

Також слід виділити такий маловідомий метод зниження залишкових напружень нежорстких деталей, що виникли після механічного оброблення, як застосування поверхнево-активних речовин.

Поверхнево-активними називаються такі речовини, які адсорбуються на поверхні розділу фаз і зменшують надлишкову поверхнєву вільну енергію [139]. Як правило, поверхнево-активні речовини мають дифільну будову молекул, тобто містять фрагменти молекул, що мають гідрофільні і гідрофобні властивості. Гідрофільна група може бути носієм іоногенних властивостей або представляти собою не іоногенний ланцюжок, що включає в себе атоми кисню, азоту, сірки і фосфору. Гідрофобна частина найчастіше складається з вуглеводневого радикала, можливо включає бензольний або нафталіновий цикл. Ця частина молекули може бути утворена фтор-вуглецевим радикалом. У гідрофобній частині молекул поверхнево-активних речовин атоми водню частково або повністю можуть бути заміщені фтором або хлором, що підвищує гідрофобність молекул і надає їм особливих властивостей, внаслідок чого такі речовини здатні знижувати поверхнєвий натяг не тільки води, але і багатьох вуглеводневих рідин [139].

Молекули поверхнево-активних речовин у водному розчині можуть розпадатися на іони, і тоді такі речовини називають іоногенними. Якщо

поверхнево-активна речовина містить у молекулі полярні групи, які дисоціюють у водному розчині з утворенням негативно заряджених довголанцюжкових органічних іонів, що визначають його поверхневу активність, то такі речовини називають аніонактивними. Якщо ж при дисоціації поверхнево-активних речовин утворюються довголанцюгові катіони, то їх називають катіонактивними. У випадку, коли поверхнево-активна речовина розчиняється у воді без утворення іонів, а розчинність її визначається наявністю в молекулі декількох полярних груп, що мають сильну спорідненість до води, то такі речовини називають неіоногенними. Існує особлива група поверхнево-активних речовин, з кількома полярними групами, які у водному розчині в залежності від умов можуть бути іонізовані з утворенням довголанцюгових аніонів або катіонів, що надає їм властивості аніонних або катіонних речовин. Ці речовини називають амфотерними або амфолітними [139].

Для характеристики рівноваги властивостей, що передаються молекулам поверхнево-активних речовин одночасною присутністю гідрофобних і гідрофільних груп, використовують поняття гідрофільно-лілофільного балансу. Гідрофільно-лілофільний аналіз виражають деяким безрозмірним числом, що дозволяє оцінювати відносну роль окремих частин дифільної молекули поверхнево-активної речовини (гідрофільних груп і неполярного вуглеводневого або фторовуглецевого ланцюга) у прояві спорідненості молекули в цілому до зовнішнього середовища – води або органічних рідин.

Концентрацію поверхнево-активних речовин, при якій в їх розчині виникає велика кількість міцел, що знаходяться в термодинамічній рівновазі з молекулами (іонами), і різко змінюються ряд властивостей розчину, називають критичною концентрацією міцелоутворення. Міцелами поверхнево-активної речовини називають агрегати з довголанцюгових дифільних молекул або іонів, що утворюються спонтанно в розчинах вище критичної концентрації міцелоутворення, яка залежить від природи полярної групи (груп) і особливо від довжини гідрофобного ланцюга молекули. У водних розчинах асоціація частини молекул (іонів) відбувається в результаті зчеплення ланцюгів, в наведених (неполярних) середовищах – за рахунок зчеплення полярних груп [140].

Властивості поверхнево-активних речовин залежать не тільки від їхньої природи, але також і від способу отримання, від типу гідрофобного радикала і способу його синтезу, від природи та кількості полярних груп.

Поверхнево-активні речовини широко застосовуються у всіх галузях промисловості, народного господарства та біології як миючі засоби, для стабілізації дисперсних систем – емульсій, пін, суспензій, для зниження міцності оброблюваних матеріалів, покриття поверхонь.

Основні об'єкти застосування пов'язані з використанням тих фізичних властивостей поверхнево-активних речовин, які обумовлюють їх адсорбційну здатність [141].

Поверхнево-активні речовини знайшли широке застосування в області механічного оброблення металів:

- операції металооброблення. Підвищення швидкостей різання, шліфування, фрезерування, стругання, хонінгування, економія різального інструменту, підвищення класу точності операцій за рахунок ефекту адсорбційного зниження міцності, ефективного тепловідведення від зони взаємодії інструмента з матеріалом при застосуванні поверхнево-активних речовин у складі мастильно-охолоджуючих рідин;

- очищення металу після механічного оброблення. Підвищення якості та поліпшення зовнішнього вигляду виробів, оздоровлення умов праці завдяки застосуванню водних розчинів технічних мийних засобів на основі поверхнево-активних речовин;

- підготовка поверхні металів під лакофарбове покриття. Поліпшення якості, антикорозійної стійкості лакофарбових покриттів металевих виробів завдяки ефективному очищенню і знежиренню поверхні водними розчинами миючих композицій, що містять поверхнево-активні речовини;

- очищення поверхні після розконсервації. Підвищення виробництва складальних операцій і оздоровлення умов праці завдяки використанню водних і водоемульсійних розчинів технічних мийних засобів замість гасу, бензину та інших нафтопродуктів при відмиванні деталей і виробів від консерваційних мастил;

- оброблення поверхонь готових виробів для поліпшення якості і зовнішнього вигляду готових виробів в результаті застосування водних розчинів поверхнево-активних речовин і миючих композицій на їх основі;

- забарвлення поверхні. Збільшення продуктивності і підвищення якості ремонтних робіт у результаті створення оптимальних умов фарбування вологих і мокрих поверхонь шляхом модифікування лакофарбових матеріалів за допомогою поверхнево-активних речовин;

- нанесення гальванічних покриттів. Поліпшення якості покриття завдяки ефективному очищенню і електрохімічному знежиренню [141–142].

Питаннями досліджень в області виникнення, вимірювання та регулювання залишкових напружень, а також синтезу та застосування поверхнево-активних речовин займалися і займаються видатні вчені, науководослідні вузи, заводські лабораторії.

У роботі вчених Ліхтман В. І., Ребіндера П. А., Карпенка Г. В. було встановлено ряд нових явищ, що викликаються адсорбційною взаємодією деформованого металу з навколишнім середовищем, яке містить поверхнево-активні речовини [141]. До цих явищ відносяться: зниження межі текучості металевих монокристалів під впливом адсорбції, своєрідні структурні зміни деформованого металу, що викликаються адсорбцією, підвищення швидкості повзучості металів, зниження втомної міцності й електрокапілярний ефект полегшення деформацій металів. Була розглянута проблема впливу середовища на втомну міцність металів: роботи Карпенка Г. В. і його співробітників, що проводилися в тісному контакті з Інститутом фізичної хімії РАН в інститутах Академії наук України – Інституті будівельної механіки в Києві і

надалі, в Інституті машинознавства і автоматики у Львові. Після виходу монографій і публікацій згаданих учених з'явилися роботи, присвячені дослідженню закономірностей встановленого радянськими вченими адсорбційного ефекту полегшення деформацій металів і з'ясуванню природи цього явища. Андраде і його співробітники (Кембридж), підтверджуючи своїми дослідженнями наявність значних адсорбційних ефектів підвищення швидкості повзучості, намагалися звести ці ефекти до впливу поверхнево-активних речовин на окисну плівку, яка в звичайних умовах покриває поверхню металу. Роботи ж вітчизняних вчених показали неправильність такої точки зору і встановили, що основні ефекти обумовлені адсорбційною взаємодією зовнішнього середовища безпосередньо з деформованим металом.

Подзей А. В. розглядав умови стабільності залишкових технологічних напружень в різних умовах експлуатації та їх вплив на властивості деталей машин. Вченим було дано класифікацію залишкових напруг і показано причини їх утворення в процесі оброблення; визначено методи регулювання напруженого стану поверхневого шару. Розглянуто також різні методи визначення залишкових напруг для деталей простої і складної форм при відсутності і наявності концентраторів напружень.

Абрамзоном А. А. були розглянуті основні властивості поверхнево-активних речовин (поверхневий натяг, адсорбція, випаровування і розчинення) та їх застосування.

Робота Абрамзона А. А., Бобрової Л. Є., Зайченко Л. П. присвячена поверхневим явищам (поверхневий і міжфазний натяг рідин, реологія поверхневих шарів) і методів їх вимірювання. Був складений тлумачний словник торгових назв зарубіжних поверхнево-активних речовин і численні приклади композицій поверхнево-активних речовин.

Дія технологічних залишкових напружень проявляється на різних стадіях життєвого циклу виробу: по-перше, після процесу механічного оброблення або після виготовлення деталі, по-друге, в процесі складання деталей у готовий виріб, по-третє, в процесі експлуатації виробу або виконання ним свого службового призначення. Завдання цих досліджень – довести, що для вирішення проблеми на першому етапі можна розглядати застосування поверхнево-активних речовин. І можна допустити, що можливе застосування поверхнево-активних речовин і на другому етапі.

Про вплив залишкових напружень на міцність матеріалів у науковій літературі існують дуже суперечливі думки. Одні автори вважають, що залишкові напруги не можуть значно впливати на умови руйнування деталі. Інші ж, навпаки, визнають істотний вплив залишкових напружень на надійність матеріалу: їх наявність збільшує можливість його руйнування. З усіх суджень про значущість залишкових напружень найбільш доказовими слід вважати ті, що ґрунтуються на фактах, які свідчать про те, що руйнування від залишкових напружень бувають досить часто. Відомі випадки раптових руйнувань деталей машин без всяких додаткових зовнішніх впливів. Нестійкість напруженого стану матеріалу деталей, немов заряджених енергією внутрішніх напружень, призводить до того, що іноді

найменша зміна цього стану викликає повне руйнування. Нерідкі випадки, коли причиною розтріскування поверхонь деталей є локальна зміна температури, подряпина, легке струшування.

Розробка методів регулювання технологічних залишкових напружень у металах і сплавах є актуальним завданням підвищення надійності і довговічності деталей і інструменту. Відомо, що залишкові напруги, пов'язані з пружними деформаціями, існуючими в металі після повного припинення зовнішніх впливів, надають такий же вплив на матеріал виробу, як і напруги, що викликаються експлуатаційним навантаженням.

Технологічні залишкові напруги можуть впливати на точність оброблення, статичну і динамічну міцність і корозійну стійкість деталей. Первісна точність машин в процесі експлуатації також значною мірою залежить від технологічних залишкових напруг [144].

Технологія виготовлення, особливо операції остаточного оброблення, визначають експлуатаційні властивості деталей машин, тобто їх поведінка і довговічність значною мірою визначаються «технологічною спадковістю». Зменшенню або усуненню залишкових напруг на етапах остаточного механічного оброблення деталей машин і в даний час приділяється мало уваги. Із застосуванням поверхнево-активних речовин в якості стабілізаторів залишкових напружень можливе підвищення якості деталей машин при незначних витратах і паралельно – підвищення конкурентоспроможності продукції.

Проблема є також актуальною тому, що використані сьогодні методи стабілізації залишкових напруг є ресурсномісткими, насамперед, енергоємними і трудомісткими, а також неекологічними процесами. У зв'язку з тим, що в умовах ринкової економіки однією з умов збереження конкурентоспроможності продукції є використання ресурсозберігаючих технологічних процесів, одним з перспективних напрямів є використання поверхнево-активних речовин в якості стабілізаторів залишкових напруг.

Експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні про стабілізацію залишкових напруг після механічного оброблення шляхом нанесення на поверхню деталі і впливу протягом певного часу поверхнево-активних речовин.

Відомо, що існує механізм релаксації (зменшення) остаточних напружень за рахунок об'ємних змін при структурних переміщеннях і за рахунок введення додаткових, так званих компенсуючих, але таких, що діють в протилежному напрямку, напруг.

Механізм впливу поверхнево-активних речовин на змінення залишкових напруг до кінця не вивчений. Тому ми можемо лише висунути гіпотезу про цей механізм: джерелом енергії є поле внутрішніх напружень в шарі металу. Дифільні молекули поверхнево-активної речовини адсорбовані на стінках пір неполярних зерен гідрофобною частиною, а гідрофільна частина поверхнево-активної речовини орієнтована в об'єм пори. Гідрофілізація поверхні мікропори сприяє переважному перенесенню більш полярних молекул води і зростанню потоку в цілому. Підвищена концентрація води в порах порушує адсорбційну рівновагу, викликає десорбцію

поверхнево-активної речовини, при цьому збільшується поверхневий натяг, а отже і сили когезії (зчеплення молекул (атомів, іонів) фізичного тіла під дією сил тяжіння). Останні прагнуть зменшити поверхню, структура перетворюється на суцільну, процес повторюється знову і триває до релаксації внутрішніх напружень. Кінцевий структурний стан металу характеризується стійкими порами зі слабкими залишковими внутрішніми напруженнями).

На основі вищенаведених гіпотез і припущень розроблено методику експериментальних досліджень, яка передбачає вивчення впливу поверхнево-активних речовин на зниження залишкових напружень в деталях машин типу планок. Для аналізу зміни залишкових напружень в експериментальних зразках пропонуються методи навантажування як аналог залишкових напруг і вимірювання частоти власних коливань експериментальних зразків і резонансних амплітуд.

На кінцеві результати впливають змінні фактори: різні за будовою та хімічним складом поверхнево-активні речовини, час їх впливу на експериментальні зразки, стріла прогину експериментальних зразків, різна якість поверхні експериментальних зразків.

Принцип досліджень схематично можна зобразити у вигляді трьох етапів (рис. 3.75...3.77):

- 1) пластина матеріалу характеризується наявністю власної частоти коливань  $f_0$ ;
- 2) після навантажування пластини певним зусиллям  $F$  вона знаходиться в напруженому стані з власною частотою коливань  $f_1$ ;
- 3) на поверхню пластини в напруженому стані наноситься поверхнево-активна речовина, і власна частота коливань  $f_1$  змінюється на частоту  $f_2$ .

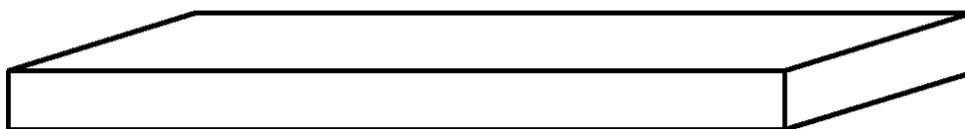


Рисунок 3.75 – Пластина матеріалу з власною частотою коливань  $f_0$

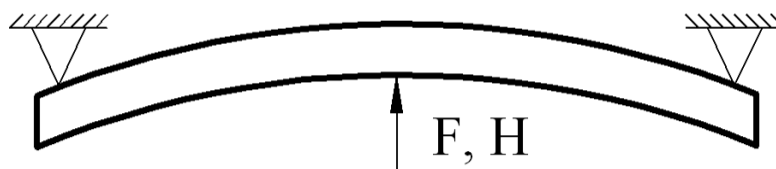


Рисунок 3.76 – Пластина матеріалу в напруженому стані з власною частотою коливань  $f_1$

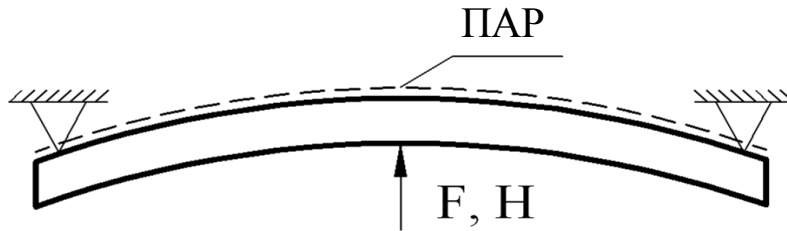


Рисунок 3.77 – Пластина матеріалу в напруженому стані з власною частотою коливань  $f_2$

З метою підвищення чистоти експерименту в експериментальну установку включені смуговий фільтр, плата аналогово-цифрового перетворювача, ЕОМ (рис. 3.78). Коливання електричного поля амплітудою 10 В, що подаються з генератора, перетворюються в механічні коливання п'єзовипромінювача, проходять через зразки і сприймаються п'єзодатчиком, встановленим на протилежній стороні. В якості зразків використовуються пластини завдовжки 110 мм, шириною 20 мм, товщиною 0,7...1,2 мм з матеріалів: сталь 12Х18Н10Т, сталь 3, сталь 45. З кожного виду матеріалу виконано по два зразки для отримання поверхонь з різними шорсткостями (один з них був оброблений абразивною шкіркою із зерен крупної фракції, інший – абразивною шкіркою із зерен дрібної фракції). Відфільтрований смуговим фільтром сигнал від датчика реєструється за допомогою аналогово-цифрового перетворювача L783 фірми LCard і відображався на комп'ютері в програмі PowerGraph.

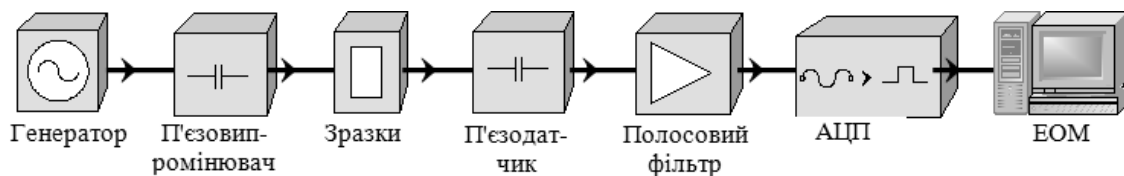


Рисунок 3.78 – Структурна схема експериментальної установки

Для впливу на зразки використовуються поверхнево-активні речовини: 1 – концентрат ферробетол для мастильно-охолоджуючих рідин, 2 – натрієва сіль монофосфат і діалкілфосфат на основі первинних жирних спиртів після дистиляції, 3 – неонол.

П'єзодатчик має досить велику ємність, тому в сигналі присутні перешкоди. Також в сигналі присутня низькочастотна складова 50 Гц, обумовлена наведеннями сіті. На рис. 3.79 показаний сигнал, зафіксований при прямій подачі його від п'єзодатчика до плати аналогово-цифрового перетворювача.

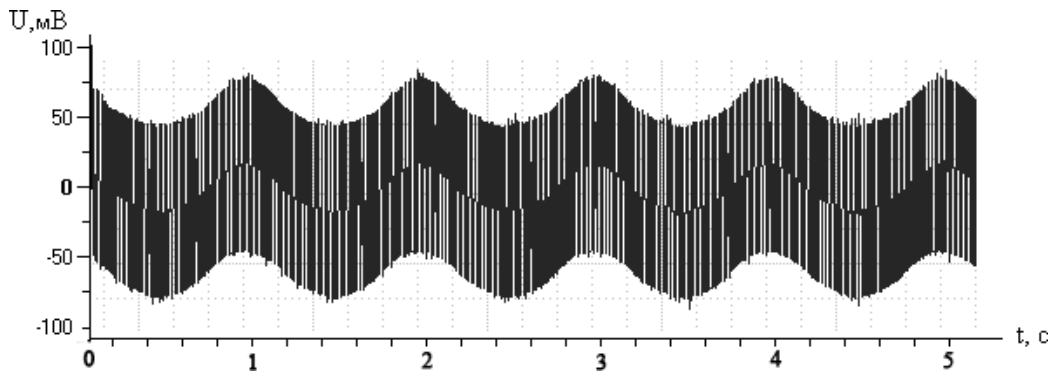


Рисунок 3.79 – Сигнал при прямій подачі сигналу без фільтра

Амплітудно-частотна характеристика фільтра наведена на рис. 3.80. Необхідна смуга пропускання фільтра 1...20 кГц (рис. 3.80, II зона). З цією метою в програмному середовищі Proteus розроблений і виготовлений смуговий фільтр. Фільтр високих частот другого порядку необхідний для гасіння низькочастотної складової (рис. 3.80, I зона).

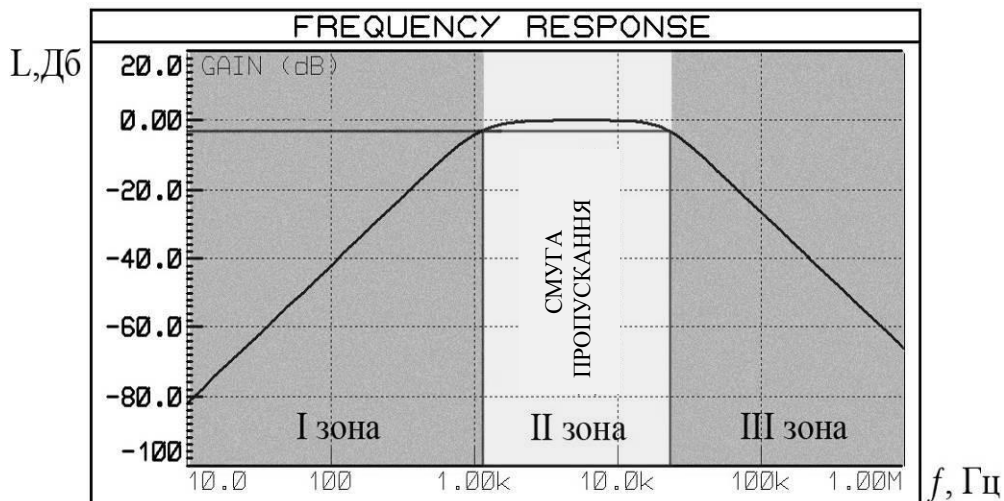


Рисунок 3.80 – Амплітудно-частотна характеристика смугового фільтра

Незважаючи на те, що перетворений сигнал надходить в ЕОМ і повторно фільтрується фільтрами великого порядку, аналоговий смуговий фільтр необхідний, так як сигнал, що надходить від датчиків, може виходити за межі допустимих напружень на платі. Фільтр на основі операційного підсилювача має коефіцієнт посилення 1 і обрізає сигнал, якщо він перевищує допустиме значення. На рисунку 3.81 наведено сигнал після аналогового і цифрового фільтрів.

Одним із змінних факторів є стріла прогину експериментальних зразків. У зв'язку з цим зроблено розрахунок зусиль навантажування пластин і розрахунок допустимих навантажень.



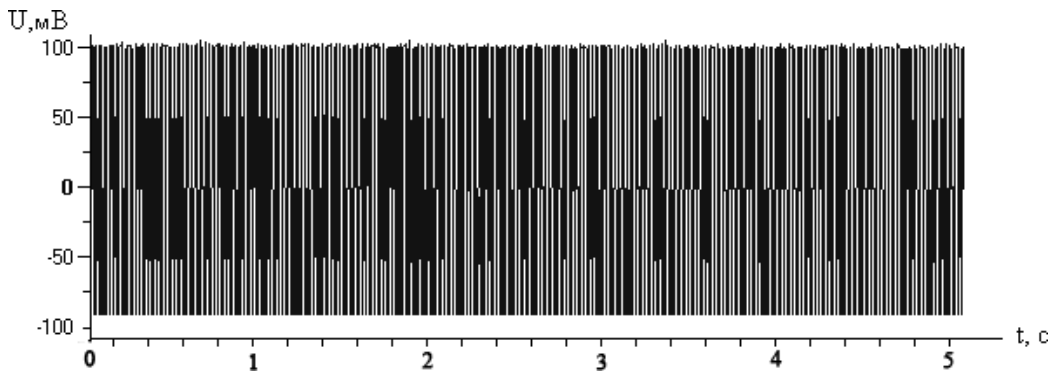


Рисунок 3.81 – Сигнал при подачі сигналу з фільтром

Якщо прямокутну пластину покласти на тверді опори і навантажити знизу від центру прикладеним зусиллям  $F$ , то пластина зігнеться (рис. 82). При такому вигині верхні шари пластини будуть розтягуватися, нижні – стискатися, а деякий середній шар, який називають нейтральним шаром, збереже довжину і тільки зазнає викривлення. Переміщення  $\Delta x$ , яке отримує середина пластини, називається стрілою прогину. Стріла прогину тим більше, чим більше навантаження, і крім того, вона повинна залежати від форми і розмірів пластини і її модуля пружності. Для деформацій розтягання і стиснення модуль пружності називається модулем Юнга.

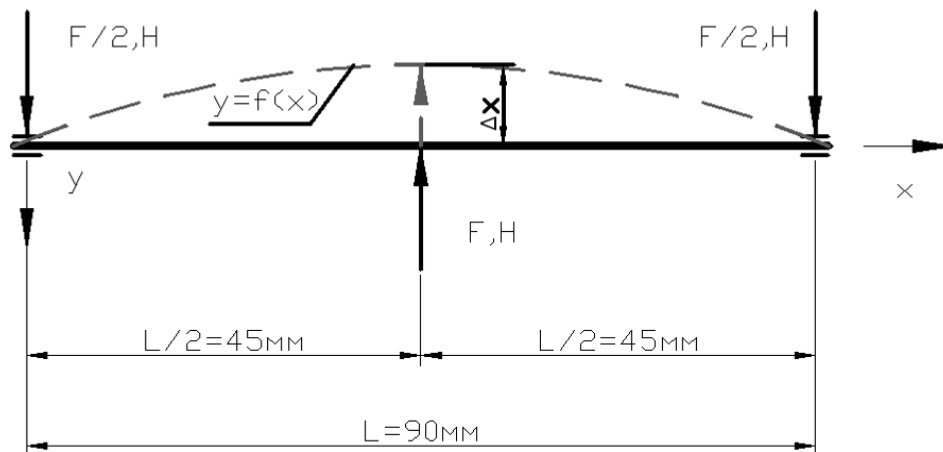


Рисунок 3.82 – Розрахункова схема для знаходження умови міцності при згинанні

Умова міцності при згині має наступний вигляд:

$$\sigma_z = \frac{M_u}{W_0} \leq [\sigma]_z,$$

де  $M_u$  – згинальний момент у поперечному перерізі пластини;  
 $W_0$  – момент опору поперечного перерізу пластини;  
 $[\sigma]_z$  – допустиме напруження при згинанні.

Момент опору прямокутного перерізу розраховується за формулою

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6},$$

де  $b$  – ширина поперечного перерізу;

$h$  – висота поперечного перерізу.

Згинальний момент у перетині пластини для цієї схеми (див. рис. 3.82) розраховується наступним чином:

$$M_u = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{F \cdot L}{4}.$$

Знайдемо зв'язок між стрілою прогину і характеристиками пружної пластини [255]. Введемо умовні позначення: довжина пластини –  $L$ , висота –  $h$ , ширина –  $b$ . Під впливом зовнішньої сили пластинка викривляється, і її форма може бути описана функцією  $y(x)$ . Виникаючі в пластині сили пружності пропорційні кривизні пластини, тобто другій похідній  $y''(x)$ . Умова рівноваги має вигляд

$$E \cdot I \cdot y''(x) = M(x),$$

де  $E$  – модуль Юнга (табл. 3.12);

$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$  – коефіцієнт, що визначається геометрією пластини;

$M(x) = \frac{F}{2} \cdot x$  – згинальний момент.

Таким чином, отримуємо диференціальне рівняння для форми пластини:  $y''(x) = \frac{F}{2 \cdot E \cdot I} \cdot x$ , інтегруючи яке, знаходимо:  $y'(x) = \frac{F}{4 \cdot E \cdot I} \cdot x^2 + C$ .

Постійну інтегрування  $C$  визначають з умови рівності нулю нахилу пластини в її центрі:  $y'(L/2) = 0$ , звідки  $C = -\frac{F \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I}$ .

Після другого інтегрування маємо:

$$y(x) = \frac{F \cdot x^3}{12 \cdot E \cdot I} - \frac{F \cdot L^2 \cdot x}{16 \cdot E \cdot I}.$$

Стріла прогину  $\Delta x$  за модулем дорівнює зміщенню середини пластини:  $\Delta x = -y(L/2) = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^3}$ , звідки остаточно можна визначити зусилля навантаження пластини:

$$F = \frac{4 \cdot \Delta x \cdot E \cdot b \cdot h^3}{L^3}.$$

Підставимо в умову міцності при згині відомі залежності:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot L}{4} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{4 \cdot b \cdot h^2} = 1,5 \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \leq [\sigma]$$

Таким чином, з умови міцності пластини допустиме навантаження складає:

$$F \leq \frac{b \cdot h^2 \cdot [\sigma]}{1,5 \cdot L}.$$

Таблиця 3.12 – Властивості матеріалів

Матеріали зразків	Модуль Юнга E, МПа	Допустима напруга при згинанні $[\sigma]_{из}$ , МПа
Ст3пс	$2,13 \times 10^5$	150
Сталь 45	$2 \times 10^5$	240
Сталь 12Х18Н10Т	$1,98 \times 10^5$	184

Нижче представлений розрахунок на міцність для експериментальних зразків.

1. Розрахунок для пластини з матеріалу Ст3пс (рис. 3.83).

Пластина має розміри:  $L = 90$  мм;  $b = 20$  мм;  $h = 0,7$  мм.

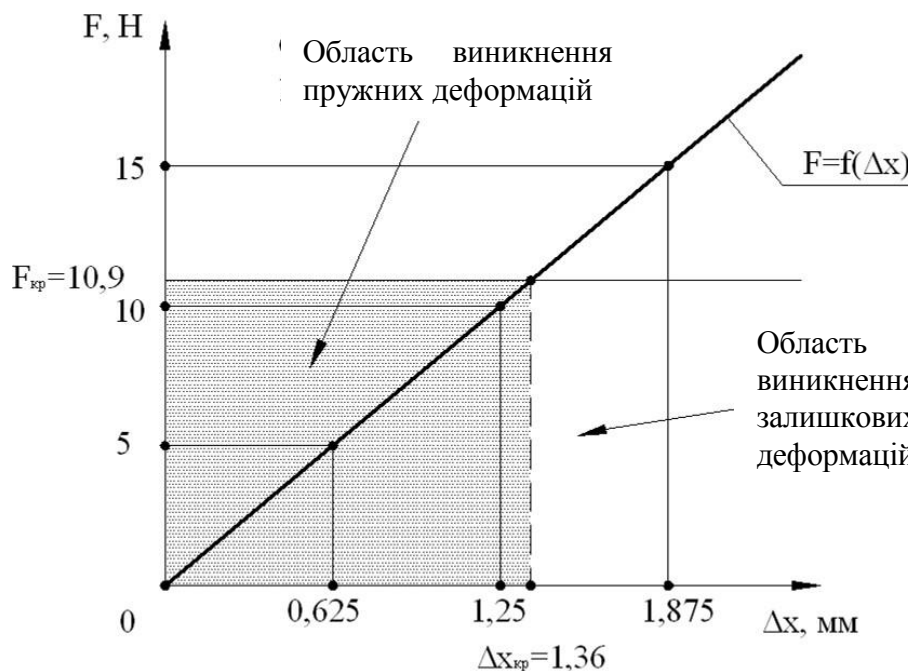


Рисунок 3.83 – Залежність зусилля навантаження пластини (Ст3пс) від стріли прогину

Допустиме навантаження складає:

$$F \leq \frac{b \cdot h^2 \cdot [\sigma]_3}{1,5 \cdot L} \leq \frac{20 \cdot 0,7^2 \cdot 150}{1,5 \cdot 90} = 10,9H.$$

$\Delta x_1 = 0,625$  мм (0,5 кроку болта при половині обороту).

$$F_1 = \frac{4 \cdot \Delta x \cdot E \cdot b \cdot h^3}{L^3} = \frac{4 \cdot 0,625 \cdot 2,13 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 0,7^3}{90^3} = 5H.$$

$\Delta x_2 = 1,25$  мм (1 крок болта при одному обороті).

$$F_2 = \frac{4 \cdot \Delta x \cdot E \cdot b \cdot h^3}{L^3} = \frac{4 \cdot 1,25 \cdot 2,13 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 0,7^3}{90^3} = 10H.$$

$\Delta x_3 = 1,875$  мм (1,5 кроку болта при півтора оборотах).

$$F_3 = \frac{4 \cdot \Delta x \cdot E \cdot b \cdot h^3}{L^3} = \frac{4 \cdot 1,875 \cdot 2,13 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 0,7^3}{90^3} = 15H.$$

Висновок: пластину з матеріалу Ст3пс слід навантажувати зусиллями в області виникнення пружних деформацій. Тобто зусиллями 5 і 10 Н, що відповідає половині і одному обороту відповідно. Зусилля 15 Н викличе залишкові деформації у зразку.

2. Розрахунок для пластини з матеріалу сталь 45 (рис. 3.84).

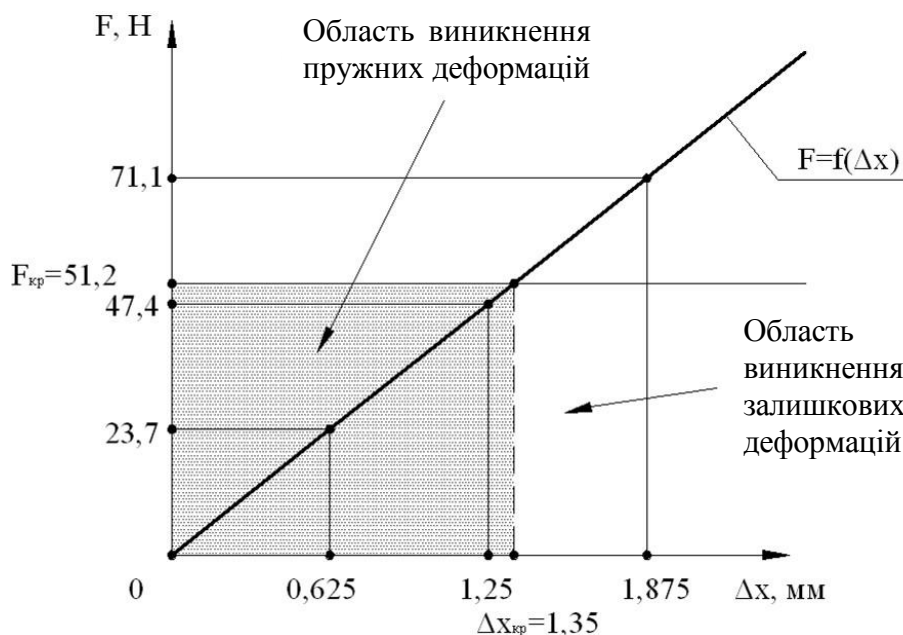


Рисунок 3.84 – Залежність зусилля навантаження пластины (сталь 45) від стріли прогину

Висновок: пластину з матеріалу сталь 45 слід навантажувати зусиллями в області виникнення пружних деформацій, тобто зусиллями 23,7 і 47,4 Н, що відповідає половині й одному обороту відповідно. Зусилля 71,1 Н викличе залишкові деформації у зразку.

3. Розрахунок для пластини з матеріалу сталь 12X18H10T (рис. 3.85).

Висновок: пластину з матеріалу Сталь 12X18H10T слід навантажувати зусиллями в області виникнення пружних деформацій, тобто зусиллями 4,7 і 9,3 Н, що відповідає половині і одному обороту відповідно. Зусилля 14 Н викличе залишкові деформації у зразку.

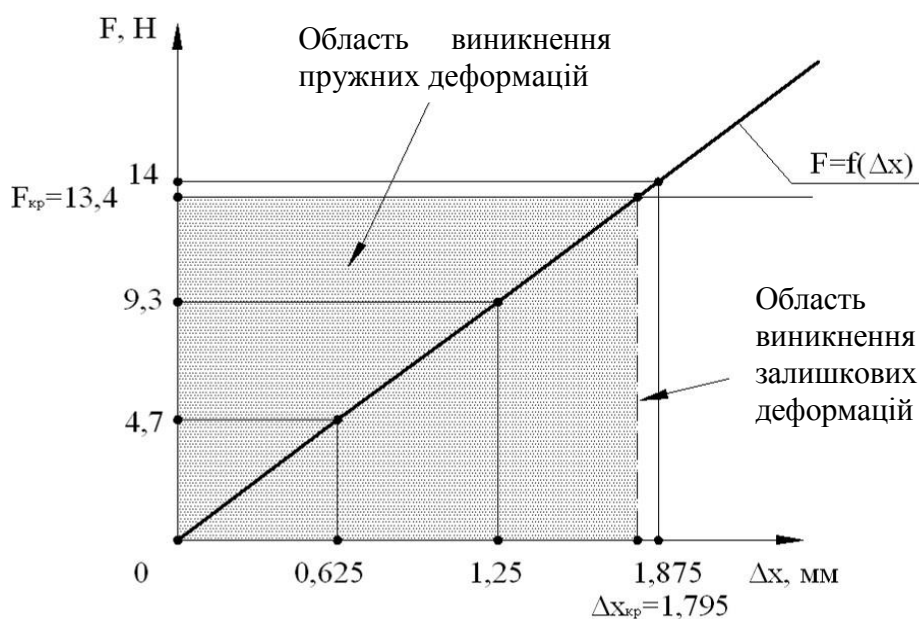


Рисунок 3.85 – Залежність зусилля навантаження пластини (сталь 12X18H10T) від стріли прогину

Експеримент проводиться в такій послідовності:

1. Готуються експериментальні зразки (знежирюються поверхні зразків; промиваються і висушуються).

2. За допомогою м'якого клею марки «Момент» приклеюються до поверхонь кожного зразка два п'єзоелемента один навпроти одного.

3. Встановлюються зразки в настановну конструкцію.

4. Навантажується зразки зі стрілою прогину 0,625 мм.

5. Заміряються резонансні частоти і резонансні амплітуди зразків.

6. Обробляється одна з поверхонь зразків по черзі за допомогою першої поверхнево-активної речовини.

7. Заміряються зміни резонансних частот через 20, 40, 60 хвилин після нанесення поверхнево-активної речовини.

8. Підготовлюють експериментальні зразки до досліду за п. 1.

9. Навантажуються зразки зі стрілою прогину 1,25 мм. Повторюються пп. 5, 6, 7, 8.

Таким же чином проводяться досліди двох інших поверхнево-активних речовин. Експеримент проводиться три рази.

Основне завдання нейросітьового моделювання результатів досліджень – виявлення залежності впливу поверхнево-активних речовин на формування залишкових напружень в деталях машин.

PAV – вид поверхнево-активної речовини (1 – ферробетол для МОР; 2 – натрієва сіль монофосфат і діалкілфосфат на основі первинних жирних спиртів після дистиляції; 3 – неонол);

X – стріла прогину зразків, мм;

T – час впливу на зразок поверхнево-активної речовини, хв;

A – резонансна амплітуда звукових коливань, В;

F – резонансна частота звукових коливань, кГц.

За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro 0.25 була побудована математична модель на основі нейросітьового моделювання, де входними симптомами були час (T), стріла прогину (X), вид ПАР (PAV), резонансна амплітуда коливань (A), а кінцевим синдромом – резонансна частота коливань (F). Була побудована одношарова сіть з початковою кількістю нейронів 10, які скорочувалися після спрощення сіті, для частоти точність становила 0,001 (1 Гц).

У результаті нейросітьової апроксимації експериментальних даних отримано шість математичних моделей для резонансної частоти шести експериментальних зразків.

На підставі отриманих моделей для резонансних частот отримані сітьові значення частот, які збігаються з вихідними значеннями. Отже, математичні моделі адекватні.

За отриманим сітьовим значенням резонансних частот звукових коливань побудовані графічні залежності резонансних частот від часу впливу поверхнево-активної речовини (рис. 3.86...3.88).

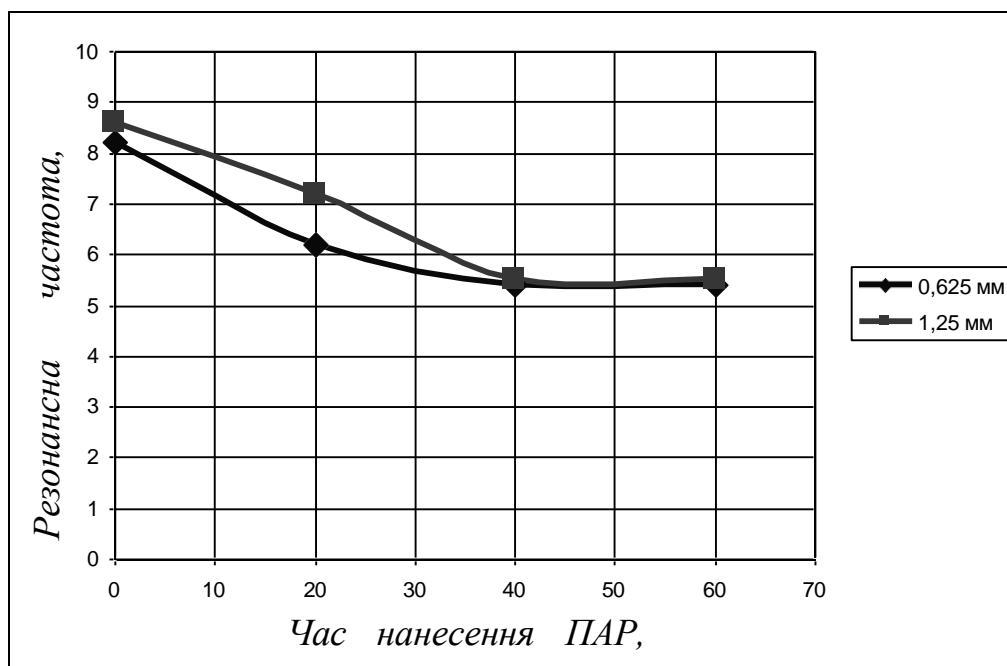


Рисунок 3.86 – Графічна залежність резонансної частоти від часу нанесення ферробетолу, сталь 12X18H10T, Ra = 6,3 мкм

З аналізу отриманих графічних залежностей можна зробити висновок, що на пластину з матеріалу сталь 12X18H10T надали позитивний вплив всі поверхнево-активні речовини: при нанесенні ферробетолу для зниження значень резонансних частот необхідно 40 хвилин дії; при впливі натрієвої солі при шорсткості поверхні  $Ra = 6,3$  мкм достатньо 20 хвилин дії, при шорсткості поверхні  $Ra = 3,2$  мкм необхідно 40 хвилин дії; при впливі неонулу спостерігається така ж тенденція, як і при дії натрієвої солі.

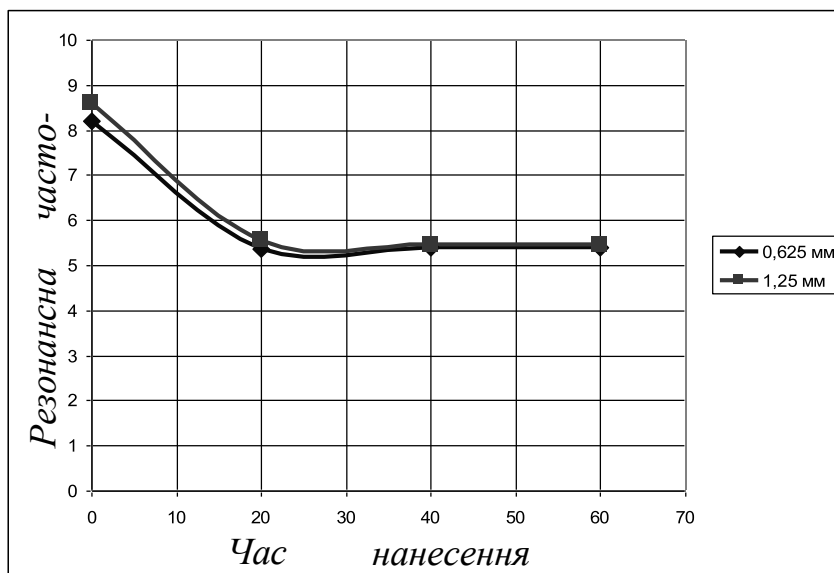


Рисунок 3.87 – Графічна залежність резонансної частоти від часу нанесення натрієвої солі, сталь 12X18H10T,  $Ra = 6,3$  мкм

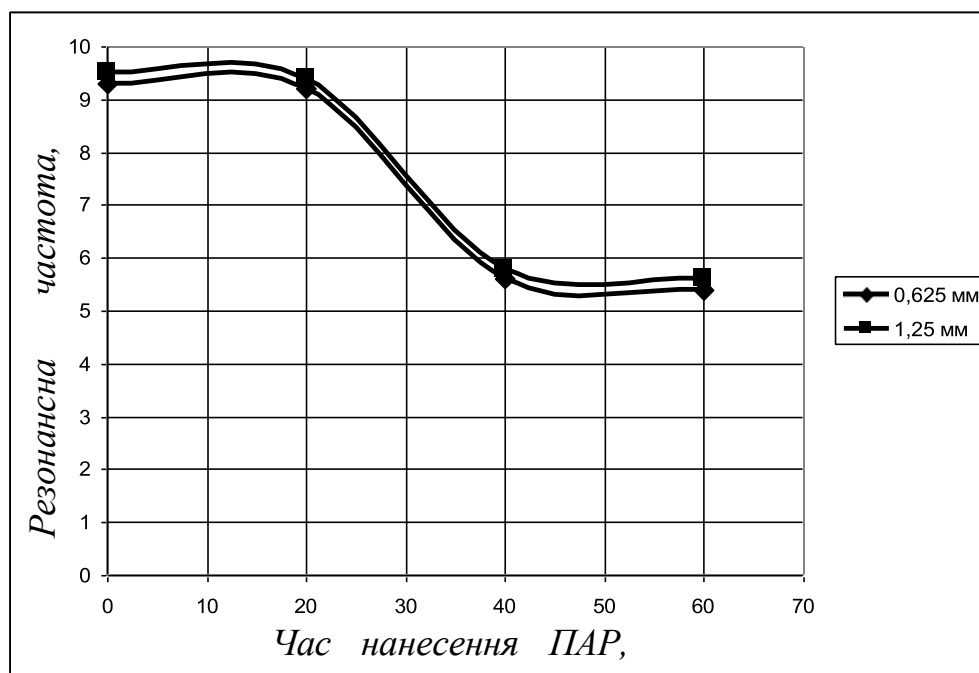


Рисунок 3.88 – Графічна залежність резонансної частоти від часу нанесення ферробетолу, сталь 12X18H10T,  $Ra = 3,2$  мкм

На зразки, виготовлені зі сталі марки Ст3 і 45, справив вплив неонол: для позитивного результату необхідно 20-40 хвилин дії залежно від шорсткості поверхні.

За результатами оброблення даних можна зробити висновок, поперше, що з трьох використовуваних поверхнево-активних речовин найбільший вплив справив неонол, який в даний час широко застосовується на машинобудівних підприємствах в якості добавки в мастильно-охолоджувальні технологічні середовища. Ферробетол справив вплив на леговану сталь, так як його практичне застосування частіше зустрічається при різанні нержавіючих сталей і кольорових сплавів. Така поверхнево-активна речовина, як натрієва сіль, отримана недавно, і її властивості ще до кінця не вивчені. По-друге, більш шорстка поверхня збільшує її адгезійні властивості. При впливі фактора шорсткості при більш шорсткій поверхні необхідний менший час впливу поверхнево-активної речовини для досягнення результату.

Цей напрямок є дуже перспективним. Особливий ефект очікується при комбінованих методах стабілізації залишкових напружень, таких як поверхнево-активні речовини і природне старіння, вібростабілізуюче оброблення, ультразвукове оброблення.

В даний час все більш популярними стають різні варіанти багатопшарових сіток прямого поширення, які автоматично нарощуються у процесі виконання завдання. Прикладом таких моделей можуть слугувати так звані каскадні сіті (рис. 3.89), в яких кожен шар нейронів передає свої виходи всім наступним шарам. Алгоритм побудови каскадної сіті є рекурентним (поворотним, тобто при обчисленні членів послідовності за цим правилом ми як би весь час повертаємося назад, обчислюючи наступний член на основі попереднього) і повністю описується операцією додавання одного нейрона.

Навчання каскадної нейронної сіті здійснюємо як мінімізацію функції помилки. Функція помилок служить для визначення якості роботи нейронної сіті під час навчання.

Технологія навчання «з вчителем» штучної нейронної сіті зазвичай передбачає наявність двох однотипних множин:

- безліч навчальних прикладів, які використовуються для «налаштування» сіті;
- безліч контрольних прикладів, які використовуються для оцінки якості роботи сіті.

Елементами цих двох множин є пари  $(X, Y)$ , де  $X$  – вхід для навченої нейронної сіті;  $Y$  – ідеальний (бажаний) вихід сіті для входу  $X$ .



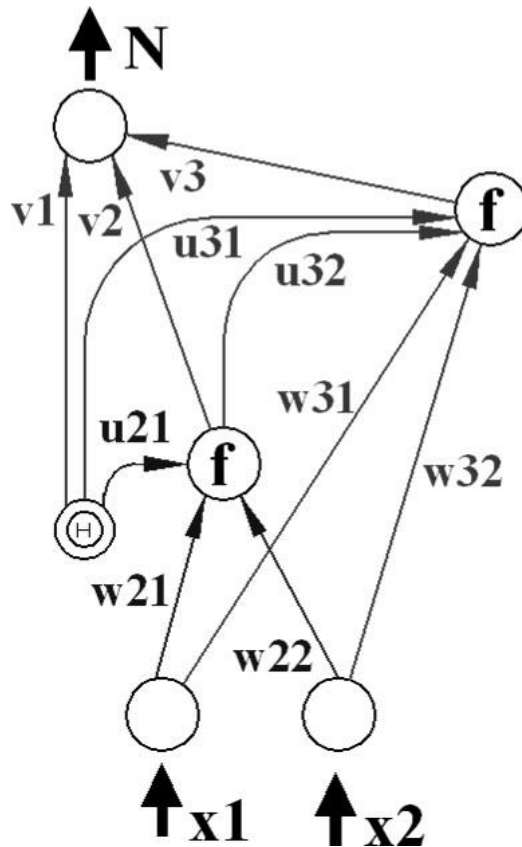


Рисунок 3.89 – Сіть каскадної архітектури

Так само визначається функція помилки  $E$ . Зазвичай це середня квадратична помилка:

$$E = \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^P (d_i - y_i)^2,$$

де  $P$  – кількість оброблених нейронною сіткою прикладів;

$y_i$  – реальний вихід нейронної сіті;

$d_i$  – бажаний (ідеальний) вихід нейронної сіті.

Процедура навчання штучної нейронної сіті зводиться до процедури корекції ваг її зв'язків. Метою процедури корекції ваг є мінімізація функції помилки  $E$ .

Загальна схема навчання «з вчителем» виглядає так:

1. Вагові коефіцієнти нейронної сіті встановлюються деяким чином, зазвичай – малими випадковими значеннями.

2. На вхід нейронної сіті в певному порядку подаються навчальні приклади. Для кожного прикладу обчислюється помилка  $EL$  (помилка навчання), і за певним алгоритмом проводиться корекція ваг. Метою процедури корекції ваг є мінімізація помилки  $EL$ .

Перевірка правильності роботи сіті – на вхід в певному порядку подаються контрольні приклади. Для кожного прикладу обчислюється помилка EG (помилка узагальнення). Якщо результат незадовільний, то проводиться модифікація безлічі навчальних прикладів або архітектури сіті і повторення циклу навчання.

Якщо після декількох ітерацій алгоритму навчання помилка навчання EL падає майже до нуля, тоді як помилка узагальнення EG спочатку спадає, а потім починає зростати, то це ознака ефекту перенавчання. У цьому випадку навчання необхідно припинити.

У разі одношарової сіті бажані вихідні значення нейронів єдиного шару відомі, і підстроювання ваг синаптичних зв'язків йде в напрямку, що мінімізує помилку на виході сіті.

За цим принципом побудовано алгоритм Розенблатта. Цей метод був запропонований Ф. Розенблаттом в 1959 році для штучної нейронної сіті, названої персептрон. Правило навчання для персептрона виглядає так:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + a \cdot x_i \cdot d_j,$$

де  $x_i$  – і-й вхід штучної нейронної сіті;

$d_j$  – бажаний (ідеальний) j-й вихід нейронної сіті;

$a$  – коефіцієнт (швидкість навчання)  $0 < a \leq 1$ .

Вагові коефіцієнти змінюються лише в тому випадку, якщо реальне вихідне значення не співпадає з ідеальним вихідним значенням.

Якщо функція активації звужує діапазон зміни величини NET так, що при кожному значенні NET значення OUT належать деякому діапазону – кінцевому інтервалу, то функція F називається звужувальною функцією. В якості цієї функції часто використовується логістична, або «сигмоїдальна» функція. Ця функція математично виражається наступним чином:

$$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}.$$

Для експериментальних значень зразка зі сталі 12Х18Н10Т з Ra = 6,3 мкм при впливі трьох поверхнево-активних речовин побудовані модифіковані каскадні сіті і навчені як мінімізація функції помилки (рис. 3.90, 3.91).

Вхідні сигнали:

$x_1$  – час впливу поверхнево-активної речовини на зразок;

$x_2$  – стріла прогину зразка;

$x_3$  – резонансна амплітуда коливань.

Вихідний сигнал:

$y$  – резонансна частота коливань.

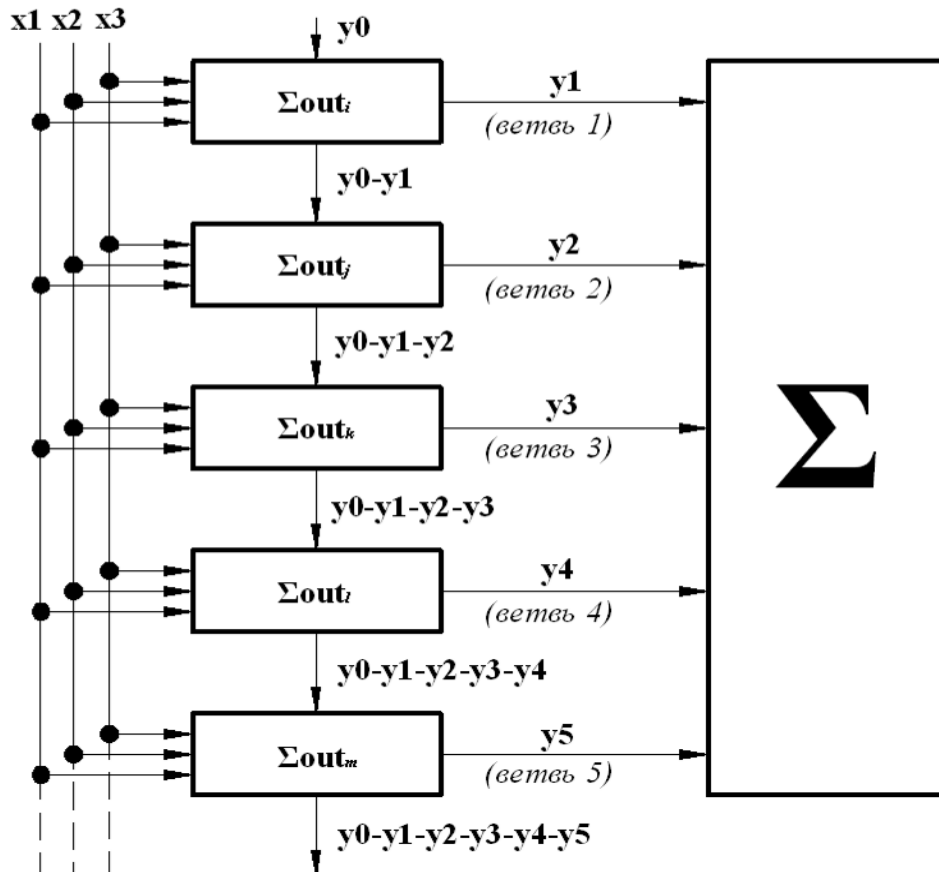


Рисунок 3.90 – Схема побудови модифікованої сіті каскадної архітектури на основі експериментальних значень

Логістична функція має вигляд:

$$OUT_i = \frac{a_{1i}}{1 + a_{2i} \cdot e^{x_i \cdot a_{3i} + a_{4i}}} + a_{5i}, i = 1 \dots 3,$$

$$OUT_j = \frac{b_{1j}}{1 + b_{2j} \cdot e^{(y1 = OUT_i) \cdot b_{3j} + b_{4j}}} + b_{5j}, j = i,$$

$$OUT_k = \frac{c_{1k}}{1 + c_{2k} \cdot e^{(y2 = OUT_j) \cdot c_{3k} + c_{4k}}} + c_{5k}, k = j,$$

$$OUT_l = \frac{d_{1l}}{1 + d_{2l} \cdot e^{(y3 = OUT_k) \cdot d_{3l} + d_{4l}}} + d_{5l}, l = k,$$

$$OUT_m = \frac{e_{1m}}{1 + e_{2m} \cdot e^{(y4 = OUT_l) \cdot e_{3m} + e_{4m}}} + e_{5m}, m = l,$$

де a, b, c, d, e – вагові коефіцієнти відповідної гілки.

Мінімізація функції помилки проводиться за допомогою Excel, команди «Пошук рішення».

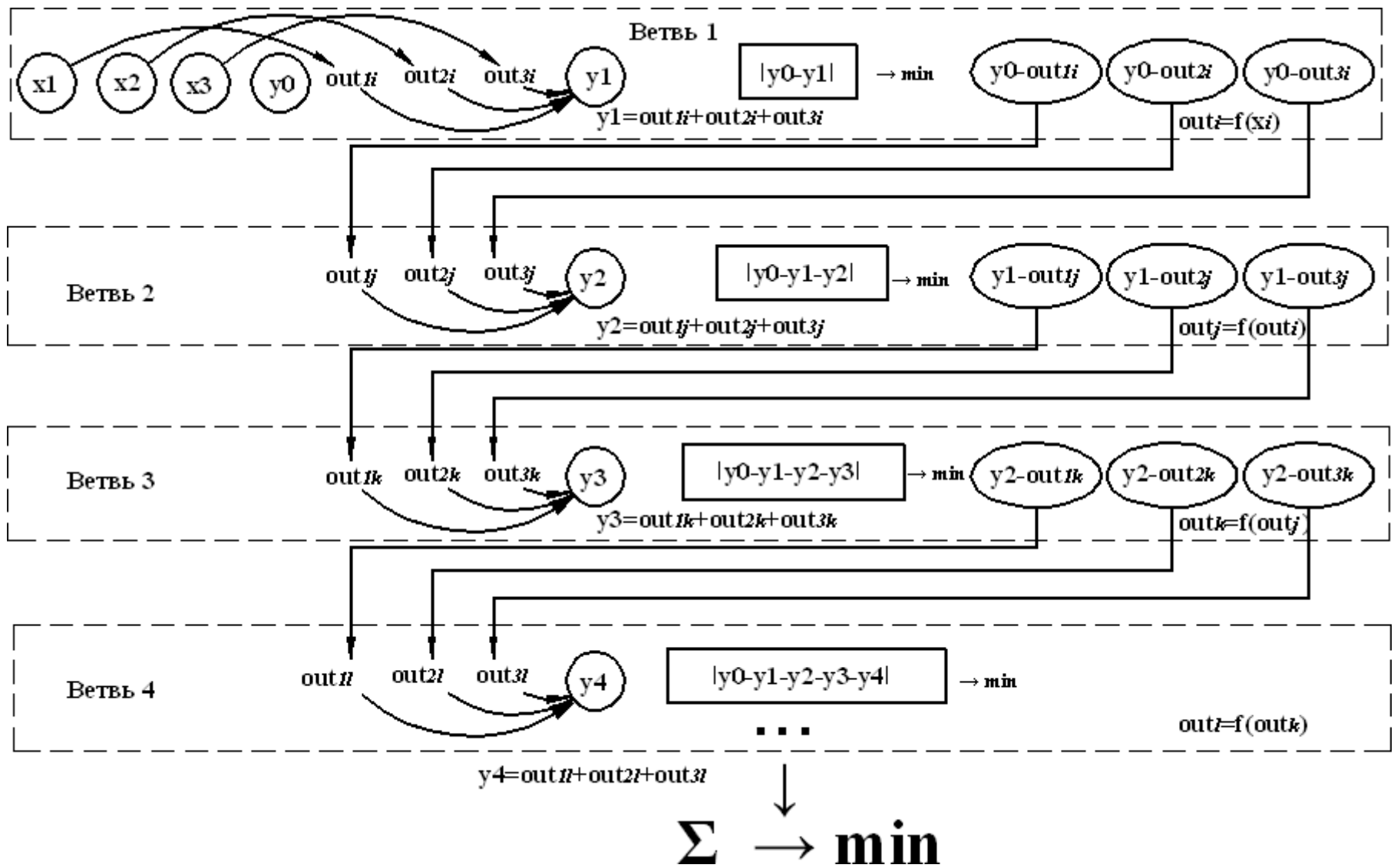


Рисунок 3.91 – Схема обчислення елементів модифікованої каскадної сіті

Побудова «навчання» як оптимізації дає нам універсальний метод створення нейронних сіток для розв'язання задач. Якщо сформулювати вимоги до нейронної сітки як завдання мінімізації деякої функції – оцінки, яка залежить від частини сигналів (вхідних, вихідних) і від параметрів сітки, то навчання можна розглядати як оптимізацію і будувати відповідні алгоритми, програмне забезпечення і, нарешті, пристрої.

Проведені експериментальні дослідження, а також побудована на їх основі нейросіткова модель процесу впливу поверхнево-активних речовин на залишкові напруги показали, що можливий діапазон регулювання залишкових напружень в деталях машин може досягати величини до 30 % [147–149].

### **3.8 Вібраційне оброблення в середовищі ПАР**

Поняття «вібраційна технологія» з'явилося порівняно недавно, десь у 60-ті роки, як наслідок розвитку процесів, що використовують вібраційний вплив. Виникло це поняття в середовищі фахівців, що працюють в області технологічного використання низькочастотного спектру коливань. Воно відображає процеси, засновані на використанні коливань, що впливають на об'єкт оброблення як безпосередньо, так і (частіше) на обробні середовища та інструменти різних характеристик.

Стосовно історії появи ідеї використання коливань, не було б помилкою вважати, що вона з'явилася (або проявилася) з першими кроками людини в добуванні їжі, створенні житла, захисту від нападу. Коливання, струшування, розгойдування, удар – перші методи технологічного характеру.

Загальна фізична природа, що характеризує процеси вібраційної технології, досить складна і пов'язана з такими явищами, як удар, кавітація, абразивне зношування, багатоконтактні взаємодії оброблюваних предметів, хвильові процеси (взаємодія ударних хвиль з матеріалом або середовищем), адгезійні явища та ін. Вібраційна технологія ґрунтується на таких фундаментальних розділах фізики, як акустика, удар і ударні явища, коливання і хвилі, молекулярна акустика.

Сучасне виробництво, транспорт, будівництво, побут, медицину, екологію та інші галузі важко уявити без створеного до теперішнього часу різноманіття вібраційних технологій, машин, верстатів, апаратів, приладів та інструментів. Незважаючи на вражаючі успіхи в розвитку теорії коливань і практики використання вібраційних процесів і пристроїв, інтерес до цієї проблеми не вщухає, а навпаки, ще більше посилюється. Це підтверджує актуальність проблеми, перспективи її розвитку, доцільність постановки та вирішення нових, більш масштабних завдань [146].

Іноді вібрації використовуються в лікувальній практиці. Існують, наприклад, машини, призначені для видалення пухлин шляхом масажу. Високочастотні вібрації також знайшли собі ряд застосувань, часто досить

дивних. Наприклад, за допомогою вібрацій зубний лікар може, якщо це буде потрібно, висвердлити в зубі отвір квадратної чи трикутної форми.

Але вібрації можуть носити як позитивний, так і негативний характер. Переходячи до шкідливих дій вібрацій, виявляємо ряд проблем, що відносяться до людського тіла. Інженери проводять великі роботи, спрямовані на забезпечення нормального стану людського організму. Багато з цих досліджень, починаючи від створення штучних легенів і закінчуючи боротьбою з хитавицею морських суден, пов'язані з коливальними процесами.

Інженери часто стурбовані тими порушеннями нормальної роботи апаратури, які виникають через вібрації. Як приклад можна навести автомобіль. При деякій кількості обертів двигуна виникають коливання дзеркала заднього виду, і через це зображення виявляється нечітким. Цікавим, хоча і дещо віддаленим аналогом цієї не дуже важливої проблеми є проблема коливань перископів підводних човнів. Електронну апаратуру літаків і ракет часто доводиться встановлювати на спеціальні віброізолюючі опори для того, щоб коливання частин літака або ракети не вплинули на її роботу. Вібрації різального інструменту не дозволяють токарю домогтися точного і чистого оброблення деталі на верстаті. Звичайно, можна навести і інші приклади.

Руйнування деталей при вельми інтенсивних вібраціях – це хоча й небажане, але зрозуміле явище. На жаль, руйнування може наступити і по-іншому. Безсумнівно, що найбільш неприємним наслідком вібрації може стати втома металу, армованої пластмаси або якого-небудь іншого конструкційного матеріалу. Такий тип руйнування зазвичай настільки ж катастрофічний, наскільки і несподіваний. Найчастіше втомне руйнування відіграє дуже підступну роль, тому що зазвичай йому не передують будь-які сигнали про небезпеку, що насувається: деталь, яка успішно працювала в режимі вібрацій протягом деякого проміжку часу, потім раптово ламається. Незважаючи на багаторічні дослідження, причина цього явища досі повністю не з'ясована [150].

Область використання вібраційних технологій у різних галузях народного господарства досить багатогранна і має тенденцію до подальшого розширення. У технології машинобудування і приладобудування – це оздоблювально-зачисне і оздоблювально-зміцнювальне оброблення, вібраційне стабілізуюче оброблення, суміщені процеси оздоблювального оброблення і покриттів, мийка та сушка, транспортування, вдосконалення процесу складання, інтенсифікація гальванічних і хімічних процесів, втомні випробування матеріалів, зміна параметрів процесу і стану матеріалу та ін. У ряді випадків процеси вібраційного оброблення та транспортування поєднуються, і за продуктивністю така схема вібраційного оброблення виходить на рівень роторних схем оброблення.

У металургійному і ливарному виробництві – це вібрування рідкого металу, регенерація формувальних матеріалів, очищення заготовок і транспортування. У заготівельно-штампувальному виробництві: вібропресування і віброштампування.

Великий діапазон застосування вібраційних технологій у сфері не машинобудівних галузей: сільськогосподарське виробництво, харчова та м'ясо-молочна промисловість, медицина, екологія, гірничодобувна та переробна промисловість, геологія.

Доречно зазначити, що коливальні процеси характерні для всієї живої та неживої природи, від клітини до угруповання організмів, популяцій, екосистем і від атома до галактик. Вони відіграють помітну роль у нервово-психічній діяльності людини. Відзначається вплив коливань параметрів космічних систем на протікання соціальних процесів.

Багато розробок технологічного застосування коливань пояснюється їх доцільністю і економічністю. Можна сказати, що ефективність використання вібрацій в багатьох випадках пов'язана зі своєрідним проявом законів механіки в умовах вібраційного впливу на різні механічні системи.

Фізична природа хвильових процесів, пов'язаних з ударними явищами, досить складна, у зв'язку з чим значний інтерес становлять експериментальні дослідження. При аналізі цих результатів відзначено зміну мікротвердості й структури по перетину зразка. На відміну від статичного, при динамічному навантаженні осередок деформації утворюються одночасно в багатьох зонах по перетину зразка: утворюються вузли, сітки, решітки з дислокацій, що мають як плоску, так і просторову орієнтацію. Відзначається зростання кількості й щільності дислокацій. У поверхні, що сприймає ударні імпульси, і у протилежній (вільній) відзначається підвищення мікротвердості.

При загальній оцінці вібраційна оброблення являє собою складний комплекс механо-фізико-хімічних явищ, що істотно впливають на стан насамперед поверхні і поверхневого шару оброблюваної деталі або середовища, а за певних умов – всього обсягу. Фізична сутність процесу характеризується комплексним впливом на оброблювані деталі і їх поверхню ряду факторів, викликаних вібрацією, і наявністю робочого середовища відповідної характеристики:

- численність мікроударів частинок робочого середовища в різних напрямках забезпечують рівномірний і всебічний вплив на предмети, деталі, матеріали. Залежно від характеристики частинок середовища та його складу створюються умови для процесів мікрорізання, багаторазового пружно-пластичного деформування, затирально-згладжувальної дії;

- змінні прискорення, що викликають ударно-хвильові процеси, згинальні напруги;

- хімічно активні і поверхнево-активні речовини, які викликають фізико-хімічні процеси;

- інтенсивно спрямоване переміщення робочого середовища, деталей, що оброблюються, матеріалів, що транспортуються.

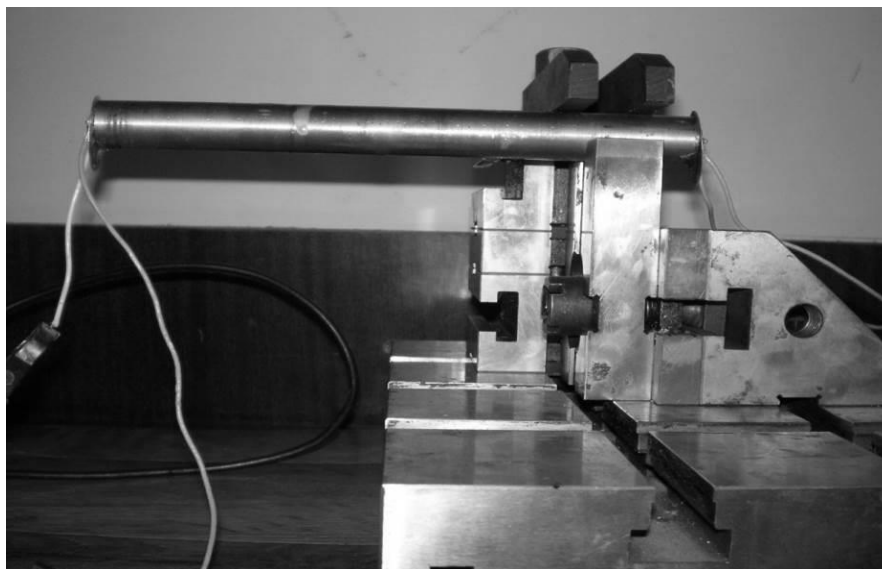
Мета експериментальних досліджень – дослідити вплив вібраційного оброблення з нанесенням на поверхню зразка і впливу протягом певного часу поверхнево-активних речовин на збільшення твердості поверхні.

Експериментальна установка (рис. 3.92...3.94) складається з генератора частот 1, експериментального зразка 2, прихвату 3, п'єзодатчиків 4, ЕОМ 5, електронного твердоміра малогабаритного ЕТМ-О1 – 6.

Принцип дії цієї експериментальної установки (рис. 3.95): коливання електричного поля амплітудою 10 В, що подаються з генератора 1, перетворюються в механічні коливання п'єзовипромінювача 4, проходять через зразок 2 і сприймаються п'єзодатчиком 4, встановленим на протилежному боці, а сигнал від останнього відображається на комп'ютері 5 в програмі PowerGraph.

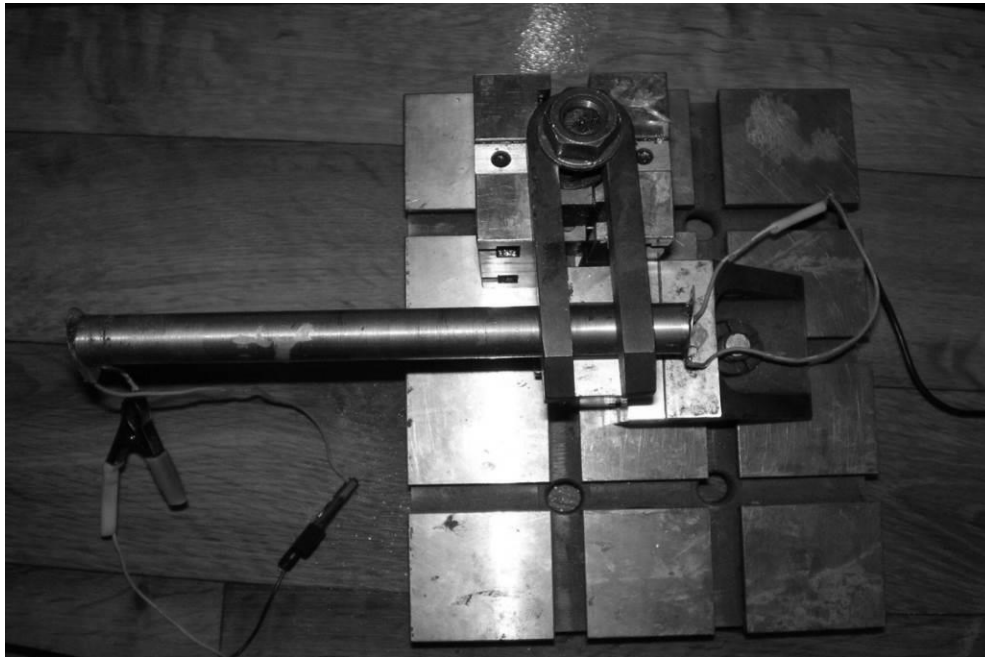


*Рисунок 3.92 – Загальний вигляд експериментальної установки*

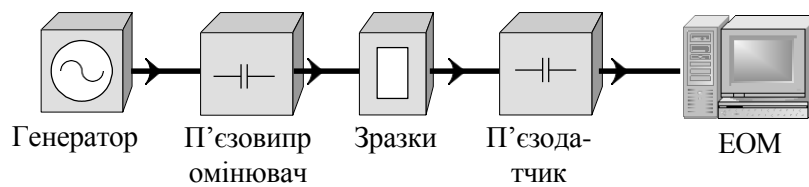


*Рисунок 3.93 – Вигляд експериментальної установки збоку*





*Рисунок 3.94 – Вигляд експериментальної установки зверху*



*Рисунок 3.95 – Структурна схема експериментальної установки*

Програмне забезпечення PowerGraph – сучасний інструмент реєстрації, візуалізації, оброблення та аналізу даних.

Призначення програмного забезпечення PowerGraph (рис. 3.96):

- збір даних з різних вимірювальних пристроїв і приладів;
- реєстрація, візуалізація та оброблення сигналів в режимі реального часу;
- редагування, математичне оброблення та аналіз даних;
- зберігання, імпорт і експорт даних.

Для проведення експерименту були використані зразки діаметром 20 мм і довжиною 200 мм з матеріалів: низьковуглецева, середньовуглецева і високовуглецева сталі. З кожного виду матеріалу було виконано по п'ять зразків.

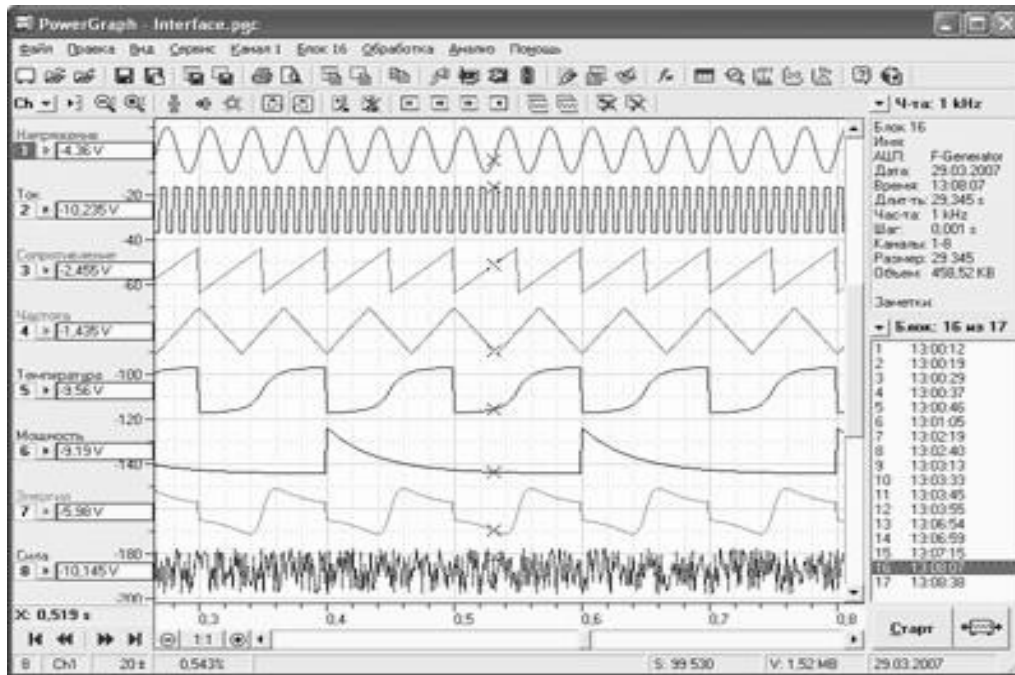


Рисунок 3.96 – Програмне забезпечення PowerGraph

Для впливу на зразки ми використовували:

ПАР № 1 – АКУРО RO20;

ПАР № 2 – АКУРО LF4;

ПАР № 3 – AMIDET TEC N;

ПАР № 4 – АКУРО RO90 ;

ПАР № 5 – ВІПОЛ 232 М (МОР для прокатки алюмінію);

ПАР № 6 – універсал-1ТС (МОР для прокатки сталей);

ПАР № 7 – ПЕГ-115 (поліетиленгліколь);

ПАР № 8 – препарат ОС-20 (оксїтетілірований кашелотовий жир);

ПАР № 9 –  $\alpha$ -олефінсульфонат натрію (65);

ПАР № 10 – лаурил сульфонат натрію;

ПАР № 11 – неонол АФ 9-12;

ПАР № 12 – неонол АФ 9-9;

ПАР № 13 – ЛАБСК (лінійні алкілбензолсульфокислота);

ПАР № 14 – сульфанола (натрієві солі лінійних алкілбензолсульфокислот);

ПАР № 15 – олеат натрію.

Всі ПАР перед нанесенням на поверхню зразка попередньо були розведені з дистильованою водою до 10 концентрацій.

Експеримент проводиться в такій послідовності:

1. Зразки знежирюються ацетоном, промиваються в дистильованій воді та висушуються в сушильній камері.

2. Зразок з низьковуглецевої сталі поміщається в настановну конструкцію і затискається прихватом.

3. За допомогою м'якого клею приклеюються до торців зразка п'єзоелементи.

4. За допомогою звукового генератора і ЕОМ проводиться вимірювання зміни резонансних частот.

5. Олівцем зразок розмічається на 4 частини. На три частини, відповідно, наносяться ПАР № 1, ПАР № 2, ПАР № 3 та одна частина залишається без покриття ПАР.

6. Проводиться оброблення зразка на резонансних частотах 2, 5, 8 хвилин.

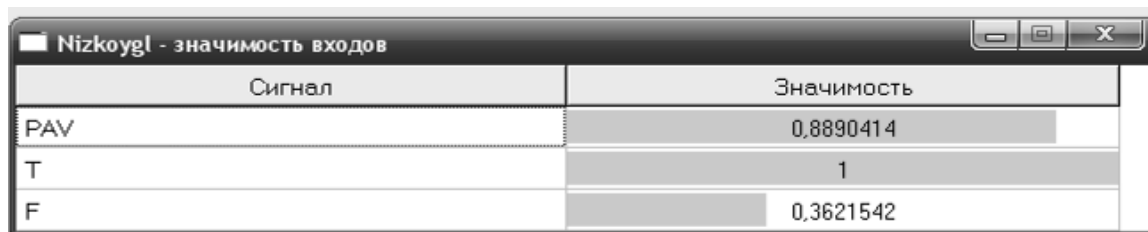
7. Після очищення зразка від ПАР проводиться вимірювання твердості.

8. У послідовності пп. 2...7 проводяться досліди для середньовуглецевої і високовуглецевої сталей.

9. Для інших складів ПАР проводяться експерименти за пп. 2...8.

Змінними факторами експериментів є: різні за будовою та хімічним складом ПАР; час впливу ПАР на експериментальні зразки після його нанесення; різний матеріал і різна якість поверхні експериментальних зразків (параметр шорсткості).

У результаті нейросітьового моделювання з'ясувалося, що на зразки з низьковуглецевої сталі найбільший вплив справив параметр  $T$  (час впливу на зразок поверхнево-активної речовини), меншою мірою – параметр  $PAV$  (вид поверхнево-активної речовини) і параметр  $F$  (резонансна частота звукових коливань) – найменший вплив (рис. 3.97).



Сигнал	Значимість
PAV	0,8890414
T	1
F	0,3621542

Рисунок 3.97 – Значимість впливу входних параметрів на зразки з низьковуглецевої сталі

На зразки із середньовуглецевої сталі найбільший вплив справив параметр  $PAV$  (вид поверхнево-активної речовини), меншою мірою – параметр  $T$  (час впливу на зразок поверхнево-активної речовини), і параметр  $F$  (резонансна частота звукових коливань) – найменший вплив (рис. 3.98).



Сигнал	Значимість
PAV	1
T	0,4594398
F	0,332651

Рисунок 3.98 – Значимість впливу входних параметрів на зразки із середньовуглецевої сталі

На зразки з високовуглецевої сталі найбільший вплив справив також параметр PAV (вид поверхнево-активної речовини), трохи менше – параметр T (час впливу на зразок поверхнево-активної речовини), а параметр F (резонансна частота звукових коливань) – майже не впливає на результат, так як його значимість склала 0,0469 (рис. 3.99).

Сигнал	Значимість
PAV	1
T	0,9106964
F	0,04689392

Рисунок 3.99 – Значимість впливу вхідних параметрів на зразки з високовуглецевої сталі

Звідси випливає, що найбільше впливає на зразки вид поверхнево-активної речовини.

На підставі створених моделей отримані сітьові значення твердості, які збігаються з вихідними значеннями. Отже, математичні моделі адекватні.

За отриманими сітьовим значенням поверхневої твердості зразків, які занесені в таблиці на рис. 3.100...3.103, побудовані графічні залежності твердості матеріалу від часу оброблення на резонансних частотах із застосуванням поверхнево-активних речовин.

Внаслідок того, що в попередньому розділі було доведено мінімальний вплив резонансної частоти звукових коливань на отримувану поверхневу твердість зразка, ми цей параметр не враховували при побудові графічних залежностей.

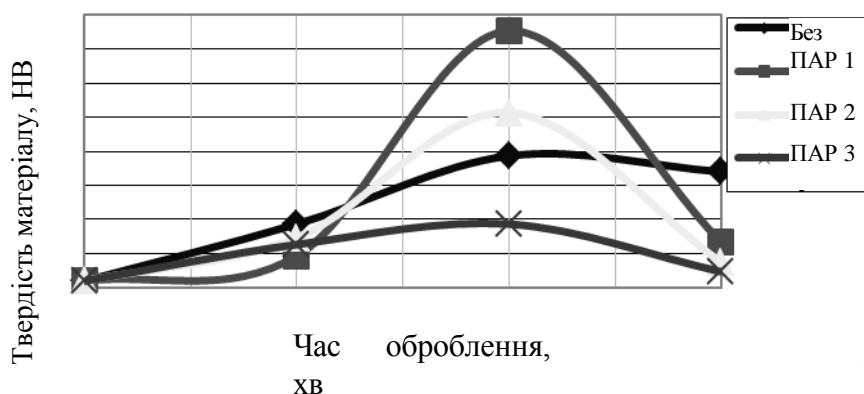


Рисунок 3.100 – Графік залежності отриманої твердості матеріалу від часу оброблення для середньовуглецевої сталі

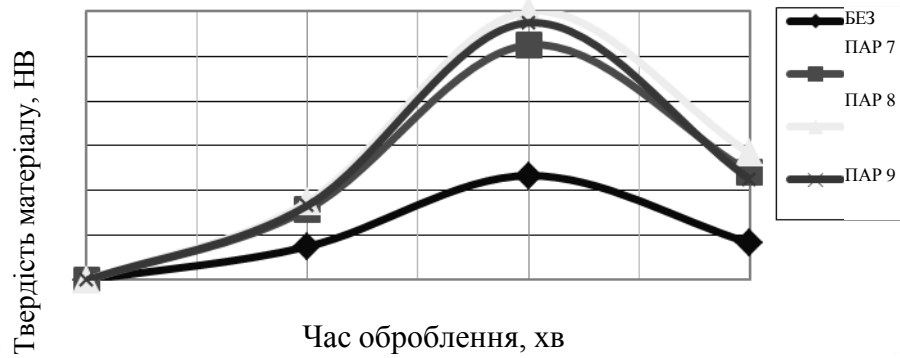


Рисунок 3.101 – Графік залежності отриманої твердості матеріалу від часу оброблення для високовуглецевої сталі

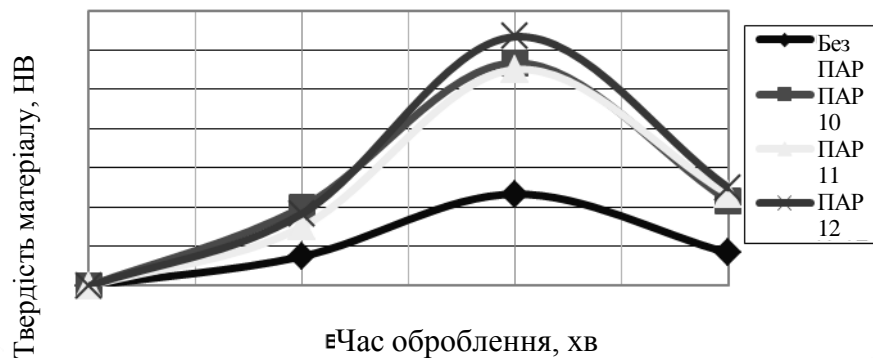


Рисунок 3.102 – Графік залежності отриманої твердості матеріалу від часу оброблення для високовуглецевої сталі

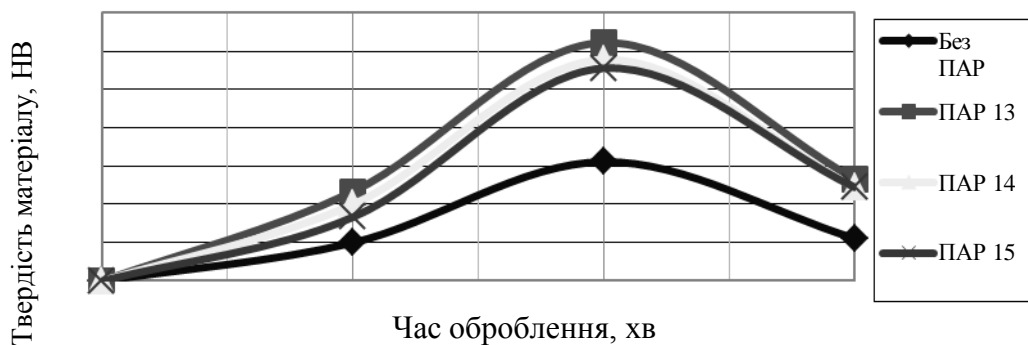


Рисунок 3.103 – Графік залежності отриманої твердості матеріалу від часу оброблення для високовуглецевої сталі

Аналізуючи залежності, можна зробити висновки, що застосування методу вібраційного оброблення на резонансних частотах дійсно призводить до підвищення твердості сталі, а суміщення його з методом застосування поверхнево-активних речовин дає ще більший результат.

З побудованих залежностей ми бачимо, що найбільший вплив на зразки справили всі види поверхнево-активних речовин на 5-й хвилині оброблення, а далі при збільшенні часу оброблення зразків їх твердість поступово починає знижуватися.

З графічних залежностей для низьковуглецевої сталі видно, що найбільший вплив справила ПАР № 2, трохи менше – ПАР № 1, слідом – ПАР № 15, ПАР № 12, ПАР № 3. Найменший вплив справила ПАР № 10.

З побудованих залежностей для середньовуглецевої сталі видно, що найбільший вплив справила ПАР № 1, трохи менше – ПАР № 8, слідом – ПАР № 11, ПАР № 6, ПАР № 12, ПАР № 15. Найгірші результати показала ПАР № 3 – менше, ніж з обробкою без застосування ПАР.

З графічних залежностей для високовуглецевої сталі видно, що найбільший вплив справила ПАР № 2, трохи менше – ПАР № 12, слідом – ПАР № 8, ПАР № 3, ПАР № 6. Найменший вплив справила ПАР № 11.

У зразках із середньовуглецевої сталі вплив методу вібраційного оброблення на резонансних частотах із застосуванням поверхнево-активних речовин простежується більш явно, ніж на інших. Підвищення твердості на середньовуглецевій сталі було не тільки максимальним порівняно з вихідною твердістю, але й саме на цих зразках майже всі поверхнево-активні речовини показали свій найбільший вплив.

ПАР № 12 – неол АФ 9-9, ПАР № 14 – сульфанол і ПАР № 15 – олеат натрію діяли в усіх дослідах для різних сталей однаково і позитивно, тобто їх можна застосовувати для будь-яких видів сталей. А ось ПАР № 2 – АКУРО LF4 – справила більший вплив, ніж інші ПАР, але тільки на зразках з низьковуглецевої і високовуглецевої сталей. Для сталей середньовуглецевих необхідно застосовувати ПАР № 1 – АКУРО RO20.

ПАР № 3 – АМІДЕТ ТЕС N – на зразках з середньовуглецевої сталі дає показники менші, ніж при обробці тільки резонансними коливаннями без нанесення поверхнево-активних речовин, а значить не варто її застосовувати для цього виду сталі.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження, а також побудована на їхній основі нейросітєва модель процесу впливу вібраційного оброблення і поверхнево-активних речовин на зміцнення виробів, показують, що можливий діапазон збільшення твердості поверхневого шару деталей машин від вихідної склав 37 НВ [151–155].

### **3.9 Модифікування матеріалом електрода в середовищі коронного розряду**

Модифікування поверхневого шару деталі застосовується для підвищення працездатності поверхонь деталей машин, прес-форм, приладів і інструменту в сучасному машинобудуванні. Обробку застосовують для підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах адгезійного і дифузійного зношення при високих температурах навколишнього середовища, і виконують переважно у вакуумних установках.

Широке промислове застосування нанесення зносостійких покриттів дозволяє вирішувати цілий комплекс необхідних завдань:

- значного підвищення міцності і надійності деталей;
- збільшення терміну служби робочих поверхонь деталей;
- скорочення витрати дорогих матеріалів і дефіцитних елементів.

Існуючі методи отримання покриттів на робочих поверхнях деталей машин, з урахуванням специфіки протікання процесів формування покриттів, можна поділити на чотири основні групи [156].

До першої групи відносяться методи, при яких формування покриттів здійснюється переважно за рахунок дифузійних реакцій між елементами, що насичуються, і структурами матеріалу (електроіскрове легування, іонне азотування, термодифузійне насичення та ін.)

Але в другу групу входять методи формування покриттів, де поверхневий шар остаточно формується за рахунок реакцій між парогазовими сумішами, що складаються із з'єднання металоносія і іншого компонента, який служить як газом-транспортером, так і відновником. При цьому одночасно у процес формування покриття великий внесок вносять структура поверхні матеріалу деталі та інтердифузійні реакції між конденсатом і матеріалом деталі (наприклад, методи хімічного осадження покриттів).

До третьої групи можна віднести методи формування покриттів за рахунок хімічних і плазмохімічних реакцій потоку частинок одночасно в обсягах простору, що безпосередньо примикає до насичуваної поверхні (іонно-плазмові нанесення покриттів, іонну плакування у вакуумі та ін.)

І до четвертої групи можна віднести методи формування покриттів за рахунок взаємодії матеріалу деталі з високоенергетичним потоком механічних частинок або плазми (плазмові й детонаційні методи нанесення покриттів).

Будь-який економічно обґрунтований метод зміцнення вимагає перевірки типової технології в конкретних умовах для кожного виду виробу, який зміцнюють. Застосовність методу визначають за основними чинниками, які характеризують зовнішні й внутрішні умови експлуатації зміцнених виробів і техніко-економічні можливості використання методу в сформованих умовах і в перспективному періоді.

Впровадження технології оброблення насиченням вимагає проведення великого комплексу підготовчих робіт. У їх числі: визначення номенклатури деталей і поверхонь, зміцнення яких доцільно і необхідно; вибір найбільш ефективного, економічно оптимального методу зміцнення, його експериментальна перевірка в лабораторних умовах: підготовка матеріальної бази – придбання та виготовлення стандартизованого і не стандартизованого устаткування, різних приладів та інструментів; підготовка виробничих приміщень та комунікацій; нагромадження основних і допоміжних матеріалів.

При всій умовності такої класифікації вона дозволяє вибрати принципіві напрями, процеси і методи оброблення зміцненням в залежності від вихідних вимог до працездатності виробу. У необхідних випадках нею можна користуватися як інструментом для створення нових, оригінальних технологічних процесів шляхом комбінування і переміщення методів і умов виконання відомих способів.

Сутність процесу електроіскрового легування (ЕІЛ) заснована на використанні плазмових імпульсних іскрових розрядів у повітряному середовищі при періодичному контакті електрода з виробом, внаслідок чого здійснюється перенесення і осадження матеріалу електрода, який витрачається, на поверхню виробу.

Метод електроіскрового нанесення покриття з легуючого матеріалу є дуже ефективним. Він порівняно простий за технологією та обладнанням. Нанесення шарами легуючих елементів типів Мо, Ті, W, Cr і їх карбідів здійснюється на установках типу ЕФІ46, ЕФІ23 та інших. Товщина шару, який наноситься, може змінюватися в широких межах (10...300 мкм). Тепловий опір між шаром і матрицею мізерний, тобто створюється перехідний шар завтовшки 5...15 мкм. Недоліки методу: легуючі елементи повинні бути електропровідними, через обмеження для деяких взаємодіючих металів по масопереносу не завжди вдається забезпечити необхідну товщину шару.

Основними перевагами електроіскрового легування є:

- можливість локального формування покриттів в точно визначених місцях радіусом від долів міліметра і більше, при цьому не захищаючи іншу поверхню;

- висока адгезія з основним матеріалом;

- відсутність нагрівання і деформацій виробу в процесі оброблення;

- можливість використання в якості електродів різних струмопровідних матеріалів, як з чистих металів, так і з їх сплавів, порошкових матеріалів та ін.

- порівняна простота технології, яка не вимагає спеціальної попереднього оброблення поверхні;

- простота обслуговування і надійність обладнання, яке є малогабаритним і транспортабельним;

- низька енергоємність ручних і механізованих процесів (0,5...2,0 кВт);

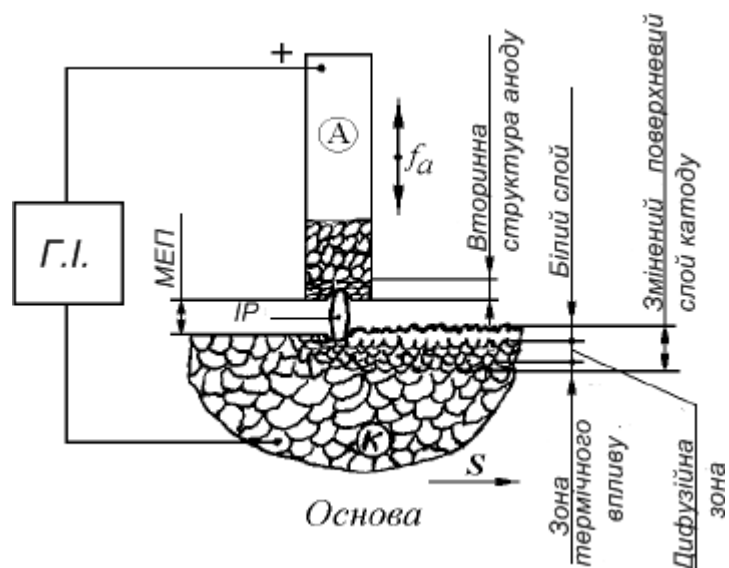
- високий коефіцієнт переносу матеріалу (60...80 %).

Спосіб електроіскрового оброблення металів заснований на явищі електричної ерозії матеріалів при іскровому розряді в газовому середовищі (переважно на повітрі), полярного перенесення продуктів ерозії на катод (деталь), на поверхні якого формується шар зміненої структури і складу. У результаті електричного пробію міжелектродного проміжку виникає іскровий розряд, в якому потік електронів призводить до локального розігрівання електрода (анода). На поверхні катода під дією значних теплових навантажень відбуваються мікрометалургійні і супутні їм процеси (термомеханічні, гідродинамічні, дифузійні), які здійснюють перемішування матеріалу катода і анода при взаємодії з компонентами газового середовища, яке сприяє утворенню високої адгезії між основою і формованим шаром. Тому електроіскрове легування слід вважати методом створення нових композиційних матеріалів. У першу чергу це стосується тугоплавких покриттів, які найбільш суттєво і принципово змінюють властивості верхнього шару матеріалу.



На рисунку 3.104 наведені загальна схема процесу ЕІЛ з вібруючим анодом у вигляді компактного електрода і зображення верхнього шару, який утворюється. Процес ЕІЛ починається зі зближення анода (електрода) з катодом (деталлю). При відстані між ними, що дорівнює пробивній, починається розвиток іскрового розряду тривалістю  $10^{-6} \dots 10^{-3}$  с, який у багатьох випадках завершується при контакті електродів.

При невеликих напругах між електродами ( $U < 100$  В) можливий контактний початок розряду від накопичувального конденсатора генератора імпульсів. Після пробою міжелектродного проміжку (МЕП) за рахунок енергії, яка надходить від генератора імпульсів, на поверхнях електродів розвиваються локальні осередки плавлення, випаровування, які викликають електричну ерозію матеріалів електродів (анода і катода). Переважне перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на ньому зміненого поверхневого шару. По закінченні імпульсного іскрового розряду і відходу анода від катода завершується розрив електричного кола. Реалізація безперервного процесу ЕІЛ за рахунок періодичної комутації анода з катодом здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад вібратора із закріпленим на ньому анодом.



*Г.І. – генератор імпульсів; МЕП – міжелектродний шар; ІР – іскровий розряд; А – анод (компактний електрод); К – катод (деталь);  
fa – частота вібрації анода; S – напрямок подачі деталі  
Рисунок 3.104 – Загальна схема процесу ЕІЛ*

Конструктивно розроблені і інші пристрої періодичної комутації, в тому числі і для процесів формування покриттів методом ЕІЛ порошковими матеріалами.

**Модель процесу ЕІЛ Лазаренка Б.Р.** Найбільш повно фізична модель процесу була викладена Лазаренко Б. Р і Лазаренко Н. І. і полягає в наступному: при наближенні електродів напруженість електричного поля між ними збільшується і, досягнувши певної величини, викликає пробій

проміжку між електродами. Через що виникає канал наскрізної провідності, пучок електронів сфокусовано вдаряється об тверду металеву поверхню анода. Енергія руху зупинених електронів виділяється в поверхневих шарах анода. Енергія від спеціального джерела живлення імпульсно підводиться до розрядного проміжку, тому щільність струму в каналі значно перевершує критичні значення. Внаслідок цього метал анода локально розігрівається, розплавляється і частково випаровується. Крапля розплавленого металу відділяється від анода і, випереджаючи його, рухається до катода. У процесі відділення від анода крапля, яка летить, встигає нагрітися до високої температури, закипає і вибухає. Ланцюг струму переривається, фокусує дію електромагнітного поля, зникає, і частини, які утворилися, летять широким фронтом. Оскільки перегріта крапля і частки знаходяться в газовому середовищі, можливе утворення хімічних сполук, в результаті чого частки, які відділилися від анода, можуть відрізнитися від матеріалу анода. Досягнувши катода, розплавлені частинки анода зварюються з ним і частково впроваджуються в його поверхню. Електрод-анод, який рухається за частинами, механічно вдаряє по катоду, перемішуючи частинки анода. При цьому протікають процеси дифузії і хімічних реакцій. Механічний удар по розпеченій масі металу проковує отримане покриття, збільшуючи його однорідність і щільність. Через те, що процес носить локальний характер, має місце і надшвидкісне загартування. Після цього електрод-анод відходить від катода, а на поверхні останнього залишається міцно сполучений з ним шар матеріалу анода.

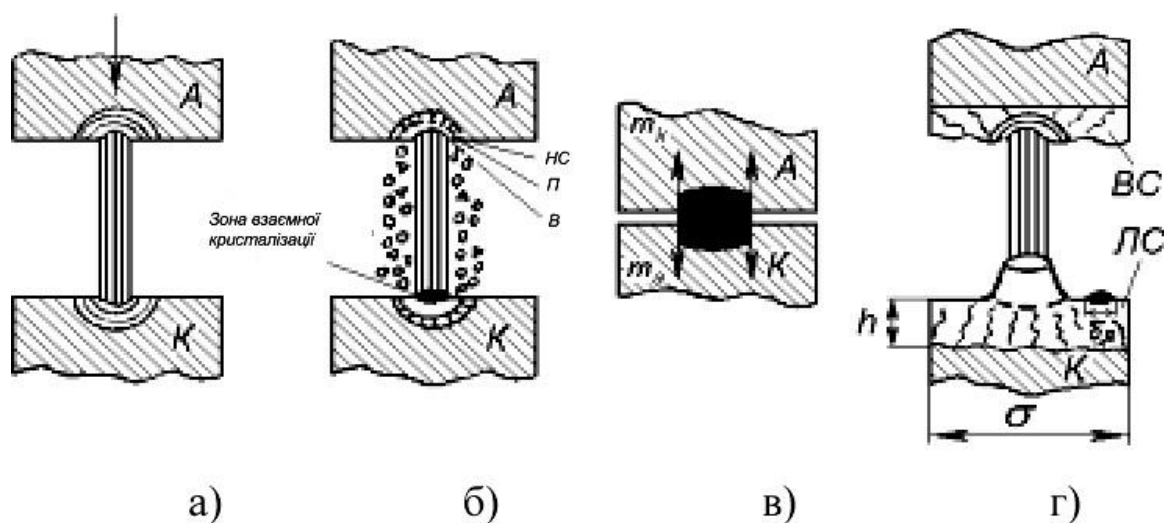
Ця модель процесу розроблена для високих напруг між електродами. При ЕІЛ, де використовують напруги не вище 100...200 В, пробій міжелектродного проміжку відбувається практично при контакті електродів – зазор 5...10 мкм – через частинки, які знаходяться в повітрі або на поверхні електродів. При контактному початку пробою на першому етапі відбувається електричний вибух контактного містка, який забезпечує попередню очистку поверхні і подальше формування міжелектродного простору для розвитку плазмового розряду. На рідкі об'єми анода і катода, які зближались, діють гідродинамічний тиск факелів, газокінетичний тиск з боку каналу провідності, сила електричного поля, електродинамічна сила, реактивний тиск.

**Модель процесу ЕІЛ Верхотурова А.Д.** Узагальнена модель процесу ЕІЛ (рис. 3.105) відрізняється від моделі Лазаренка кінетикою процесу та врахуванням поверхневих явищ на аноді й катоді, які включають:

- руйнування електродів в рідкій, паровій і твердих фазах;
- схоплювання їх у момент контакту;
- зміна властивостей робочих поверхонь за рахунок перенесення матеріалу та імпульсних навантажень;
- наявність на катоді в зоні дії іскри мікротрощини, яка забезпечує перекристалізацію матеріалів та їх фізико-хімічну взаємодію;
- обмеження товщини шару за рахунок внутрішніх напружень і термовтомності;
- дискретний характер формування легованого шару.

Аналіз літературних даних та експериментальних досліджень електроіскрових покриттів різними класами матеріалів у поєднанні зі спектральною діагностикою плазми і її осцилографування призводять автора до наступної узагальненої моделі немеханізованого вібраційного легування.

Іскровий розряд здійснює на матеріал електродів імпульсний, тепловий і механічний вплив. Потік електронів призводить до локального розігріву електрода (анода), а поперечний магнітний вплив створює високий тиск в плазмовому шнурі розряду, в якому реалізується середня електронна температура  $T_i \sim (5...7) \cdot 1000 \text{ K}$  із середньою електронною щільністю  $n_e \sim (4...13) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (рис. 3.105, а). У результаті цього впливу на поверхні електродів з'являються об'ємні джерела тепла, які призводять до виникнення ерозійних лунок на аноді й катоді.



*а – пробій міжелектродного проміжку; б – утворення ерозійних лунок на аноді і катоді з трьома зонами: (В) – випаровування, (П) – плавлення, (НС) – напружений стан; в – момент контакту електродів, які супроводжуються захопленням і зворотним перенесенням; г – формування на аноді вторинної структури (ЗС) і легованого шару на катоді*

*Рисунок 3.105 – Узагальнена модель процесу ЕІЛ*

У самій лунці можна виділити три зони: випаровування, плавлення і напруженого стану (рис. 3.105, б). Розмір зон плавлення і випаровування тим більше, чим менше температура плавлення ( $T_{пл}$ ), кипіння ( $T_{кип}$ ) і коефіцієнт теплопровідності матеріалу електрода ( $L$ ). Зона напруженого стану виникає за рахунок хвилі термічних і термомеханічних напружень в результаті імпульсного нагріву, реактивного впливу плазмового струменя і її розширення у момент спаду струму в імпульсі. Розрахунок внутрішніх термічних напружень, які виникають в поверхневому шарі молібдену і заліза при дії імпульсного джерела тепла, показує, що зміна напружень носить хвильовий характер, причому внутрішні напруження змінюються від роз-

тягувальних до стискаючих, затухаючи зі збільшенням відстані від джерела. Великі значення розтягувальних напружень на робочій поверхні електрода є основною причиною утворення тріщин і створення твердофазної ерозії, внесок якої в загальний ерозійний ефект залежить від режимів оброблення і гомеополярних міжатомних зв'язків у матеріалі електрода.

**Модель процесу Іванова. Г.П.** Іванов Г. П. висловив думку, що всі запропоновані гіпотези не суперечать одна одній, і тільки їх об'єднання дозволить отримати повне уявлення про процес електроіскрового легування.

У результаті такого об'єднання він сформулював свою гіпотезу, що при іскровому розряді в повітряному середовищі під дією випрямленого пульсуючого струму виникає перенесення матеріалу електрода на виріб. Цей перенесений матеріал електрода легуючих металів деталі, з'єднуючись хімічно з дісоційованими атомами азоту повітря, вуглецем і матеріалом деталі, утворює дифузійний зносостійкий укріплений шар. При цьому в шарі виникають складні хімічні сполуки, високостійкі нітриди і карбонітриди, а також структури гартування.

Далі Іванов Г.П. стверджує, що лише сумісний хімічний і термічний вплив на метал може забезпечити створення високозносостійкого зміцнення металу.

Оснащення для автоматизованого електроіскрового легування являє собою голівку. Крім голівки для ЕІЛ використовуються патрони з «термозатиском».

Патрони з «термозатиском» використовуються для з'єднань по «гарячий» посадці, посадці з натягом Н7/р6, Н7/п6, які виникають при з'єднанні нагрітих деталей.

Дія патронів з «термозатиском» заснована на тому, що при нагріванні посадочний отвір збільшується в діаметрі.

У спеціальних пристроях здійснюється нагрів патрона за допомогою індукційної котушки. Та ж індукційна котушка використовується для інструмента з хвостовиком діаметром від 3 до 32 мм. Час розігріву 3,5 с, охолодження – 30 с, якщо використовується спеціальне охолодження. Пристрої можуть бути обладнані для групової підготовки інструменту.

Хвостовик інструменту, який закріплюється, вставляється в розширення отвору патрону. При охолодженні до кімнатної температури діаметр отвору патрону повертається до нормального розміру, при цьому виникають великі затискні зусилля. Якщо закріплення здійснюється в діапазоні пружинних деформацій матеріалу патрону, то воно може бути повторено багаторазово (до 5 000 разів).

При розкріпленні інструменту в зоні, яка обмежена ділянкою сполучення патрона і хвостовика інструменту, який закріплюється, нагрів до температури 300...350 °С можливий менш ніж за 10 секунд. Після доставки різального інструменту патрон охолоджується досить швидко, цьому сприяє відносно велика маса патрона. Інструмент при цьому практично не нагрівається.

Утримуючі сили, які виникають в результаті охолодження патрону з термозатиском, значно більші, ніж в інших відомих системах закріплення, тому за рівнем вібрацій утворена система закріплення рівноцінна цільному інструменту тієї ж конфігурації.

Точність установки за параметром концентричності при такому методі аналогічна цільному інструменту. Переміщення закріпленого інструменту вздовж осі обертання, яке є значним недоліком цангових патронів, практично виключається при закріпленні за «гарячою» посадкою.

При призначенні технології нанесення зміцнювальних електроіскрових покриттів і подальшого оброблення необхідно враховувати умови роботи об'єктів зміцнення (інструментів, деталей), тобто фактори, що ініціюють зношування їх робочих поверхонь.

Нанесення електроіскрових покриттів здійснюється в ручному або механізованому режимах на установках ЕІЛ.

Сутність способу електродугового зміцнення полягає у впливі на поверхню деталі електричної дуги, під впливом якої відбувається миттєве нагрівання мікрооб'єму металу до температури вище першої критичної точки  $A_1$ . Нагрівання і інтенсивне охолодження внаслідок теплопровідності вглиб металу створюють на поверхні шар з вторинним загартуванням і відпущеним підшаром. Ефект загартування ще й супроводжується дифузним легуванням складовими анода (титан, кобальт, вольфрам і т. д.).

Ефект зміцнення, спостережуваний переважно у вуглецевмісних і деяких легованих спеціальних сталях і сплавах, полягає в утворенні в поверхневому шарі специфічної високодисперсної, слабо дезорієнтованої в просторі структури. Ця структура має підвищену дисперсність блоків і щільність дислокацій, її мікротвердість в 1,5...5 разів перевищує мікротвердість структури основи. Глибина зміцненого шару залежно від режимів опромінення може досягати 0,05...3 мм, і ця поверхня не має окалини і не пошкоджується.

Таке оброблення проводиться без супутнього охолодження водою, що дозволяє виконувати його не тільки в термічних цехах, але в найрізноманітніших місцях: на монтажних і ремонтних ділянках, на відкритому повітрі, за місцем експлуатації деталей. І ще однією з переваг цього способу є те, що він може також застосовуватися замість традиційних, але більш дорогих гартувань з нагріванням у печах, газовим полум'ям, ТВЧ.

Слід зазначити, що одним з недоліків методу є порівняно низька продуктивність процесу, недостатня цілісність покриттів. Порівняно невелика продуктивність процесу оброблення обумовлює специфіку його практичного використання – зміцнення невеликих за площею ділянок, тобто локальне нанесення покриттів. Метод широко застосовується з метою економії та раціонального використання благородних металів у різних областях.

Переваги методу ТВЧ – висока продуктивність, відсутність зневуглючування й окислення поверхні деталі, можливість регулювання і контролю режиму термічного оброблення, а також повної автоматизації всього

процесу. Гартівні агрегати можна встановлювати безпосередньо в потоковій лінії механічного цеху. Тому загартування ТВЧ застосовують для деталей масового виробництва (пальці, валики, шестерні та ін.) Щоб уникнути можливого крихкого руйнування зубів шестерень, їх виготовляють зі спеціальних вуглецевих сталей зниженою прогартованості 55 ПП (0,55 % С), які містять марганцю < 0,2 % і кремнію 0,1...0,3 %. Зуби шестерень прогривають наскрізь, але гартується тільки поверхневий шар товщиною 1...2 мм.

Нагрівання ТВЧ дозволяє проводити загартування окремих ділянок деталей – шийки колінчастих валів, кулачків розподільних валів, головки рейок та ін. Недоліком є висока вартість індукційних установок і індукторів (для кожної деталі свій індуктор), тому цей метод економічно доцільно використовувати тільки при масовому виробництві однотипних деталей простої форми. Полум'яне поверхнєве загартування застосовують головним чином для загартування виробів з великою поверхнею, при індивідуальному виробництві та ремонті, іноді для гартування сталевих і чавунних прокатних валків. Нагрівання виробів здійснюється полум'ям газових або киснево-ацетиленових пальників. При нагріванні виробів з великою поверхнею пальники з охолоджуючим пристроєм переміщуються уздовж виробу або виріб рухається, а нагрівальний пристрій – нерухомий. Товщина загартованого шару при цьому способі нагріву виходить рівною 2...4 мм. До недоліків методу слід віднести складність регулювання температури нагріву, а звідси – можливість сильного перегріву. Нагрівання виробів перед загартуванням у розплавлених металах або солях також є одним із способів поверхневого гартування. Цей спосіб застосовують при загартуванні дрібних деталей простої геометричної форми, що виготовляються в невеликих кількостях.

**Спосіб поверхневого насичення у коронному розряді з саморегуляцією процесу.** Перспективними є методи, що дозволяють забезпечити необхідну структуру, напружено-деформований стан, хімічний склад поверхневого шару металу, а також оптимальний розподіл фізико-механічних властивостей на зміцненій поверхні в залежності від конкретних умов експлуатації деталей. Великі можливості в поліпшенні експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин, що працюють в умовах тертя і контактних навантажень, мають методи, засновані на застосуванні способів, які дозволяють здійснювати управління процесом насичення поверхні.

Недоліками відомих способів є те, що при застосуванні електроерозійного зміцнення плазмою відбувається вигорання вуглецю, як на деталі, так і на електроді, також при такій обробці можливе виникнення мікрократерів на поверхні деталі, які погіршують якість поверхні і вимагають подальшого додаткового оброблення.

Для ліквідації цих недоліків і вирішення завдання підвищення надійності, зносостійкості і терміну служби використовується спосіб застосування насичення у коронному розряді оброблюваної поверхні із саморегуляцією процесу.

Запропонований спосіб насичення матеріалом електрода оброблюваної поверхні із саморегуляцією процесу полягає в насиченні іонами металу (титану, вольфраму, алюмінію, міді, цирконію та ін.) поверхневого шару деталі за рахунок формування переносника іонів при проходженні шнура через оптимум, який змінюється у діапазоні від «0» до «тах», що дозволяє процесу відбуватися із саморегуляцією.

Спосіб здійснюється шляхом проходження прискореної різниці потенціалів плазми через зону найбільш ефективного переносу іонів електрода, який, у свою чергу, здійснює зворотно-поступальні рухи, які забезпечуються дією магнітного поля від моменту торкання оброблюваної поверхні до моменту максимальної висоти відриву, залежного від величини приведенного магнітного поля, що виникає під дією електричного струму, що замикає ланцюг в момент торкання і розмикає його в момент відриву від оброблюваної поверхні.

Запропонований спосіб насичення поверхонь деталей машин гарантує імпульсний характер виникнення коронного розряду і загального магнітного поля в зоні оброблення. Особливість і відмінність його від відомих, описаних раніше, в тому, що, по-перше, насичення поверхні відбувається через шнур коронного розряду, при цьому іскра в зоні оброблення не виникає, що усуває ймовірність утворення кратерів на поверхні деталі і електрода.

Крім того, процес саморегуляції відбувається за рахунок дії електромагнітного поля в зоні оброблення, причому зазор між наконечником і поверхнею деталі змінний і залежить від сили магнітного поля, яке накладається на електрод.

Сформована проблема впливає на якість і собівартість машинобудівної продукції і тому потребує управління. Необхідність знаходження рішення є також актуальною, тому що використовувані сьогодні методи поверхневого насичення є ресурсномісткими, насамперед енергоємними і трудомісткими, тому що при використанні методу електроіскрового легування виникає необхідність виконання подальшого механооброблення у зв'язку з виникаючими при цьому методами мікрократерами на поверхні оброблюваної деталі, викликаними вигорянням вуглецю.

У зв'язку з тим, що в умовах ринкової економіки одною з умов збереження конкурентоспроможності є використання ресурсозберігаючих технологічних процесів і збільшення надійності, довговічності деталей машин, одним з перспективних напрямів є застосування поверхневого насичення деталей машин із саморегуляцією процесу.

Підвищення експлуатаційних властивостей деталей технологічними методами є найважливішим резервом зростання якості і конкурентоспроможності виробів сучасного виробництва. Основні експлуатаційні властивості деталей машин – зносостійкість, міцність, герметичність значною мірою залежать від стану їх поверхневого шару, що формується в процесі механічного оброблення. У зв'язку з цим досить актуальним завданням

є дослідження технологічних можливостей методів механооброблення у забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей машин.

У даний час є досить велика кількість інформації щодо технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару деталей машин. Однак відомості про кількісну оцінку досягнутого при цьому рівня експлуатаційних властивостей практично відсутні, що ускладнює обґрунтований вибір методів остаточного оброблення деталей з їх урахуванням.

При обробленні дуговим розрядом виникає підвищена дифузія кисню через наявність високих температур. Для виключення перегріву в зоні оброблення можливі кілька рішень.

Перше – це використання імпульсного розряду. В якості провідника, як і раніше, буде використовуватися шнур коронного розряду, але він буде створений проходженням імпульсного струму, який переносить формуючий потік іонів електрода. У результаті внесених поправок виключається перегрів зони оброблення, за рахунок імпульсного впливу на поверхню деталі, і вигорання вуглецю з робочої поверхні деталі, що підлягає насиченню, і з матеріалу, який імплантується. Друге – можливість цього протікання процесу насичення із саморегуляцією за рахунок змінної довжини шнура коронного розряду.

При обробленні коронним розрядом, без утворення дуги, явища перегріву та вигорання вуглецю не спостерігаються.

Наші експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні про підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей за допомогою поверхневого насичення у коронному розряді із саморегуляцією процесу. Дослідженню так само підлягає якість поверхні, отриманої в результаті оброблення.

Реалізація способу поверхневого насичення у коронному розряді із саморегуляцією процесу проводиться наступним чином.

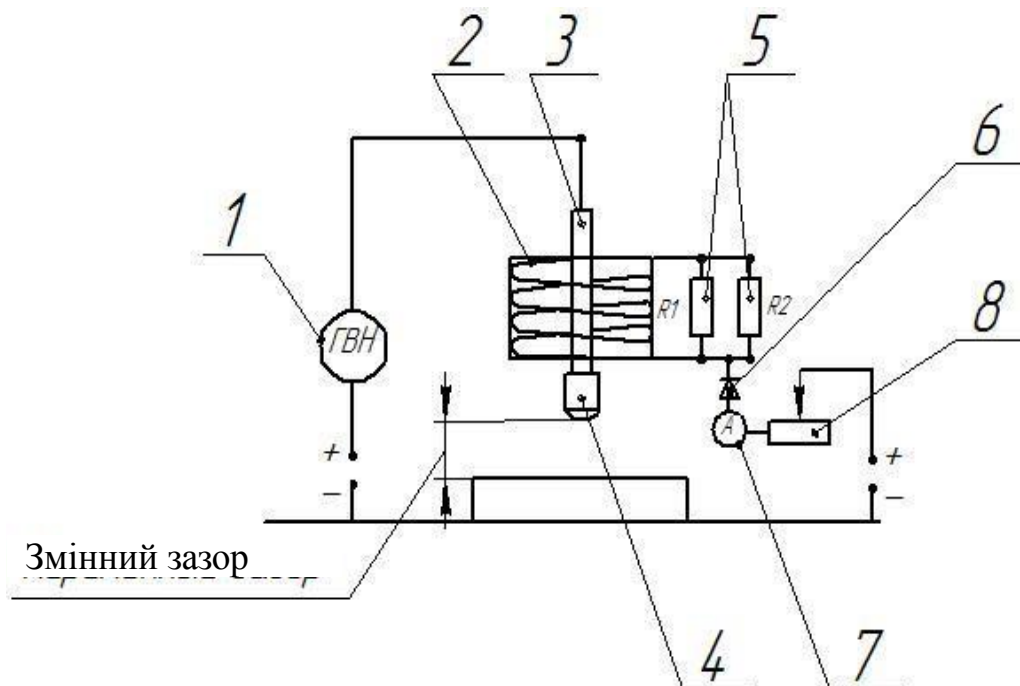
Деталь, яка підлягає обробленню (три зразки різних матеріалів), встановлюється на стіл металообробного верстата (призматичний) або в пристосування токарного верстата (тіло обертання). Їй надається головний рух (обертання) або рух подачі (подача столу).

Електрод 3 (якоря) разом з наконечником 4, виготовлений з матеріалу, який необхідно імплантувати, здійснює зворотно-поступальний рух у бік деталі (рис. 3.106). Рух забезпечується наявністю соленоїда 2 під дією електромагнітного поля від моменту торкання поверхні, оброблюваної до моменту максимального відриву від неї.

Висота максимального відриву наконечника 4 від оброблюваної поверхні залежить від величини приведенного магнітного поля, що виникає під дією електричного струму. Струм високої напруги, який утворює генератор високої напруги 1, діє на електрод 3 і виконує функцію замикаючої ланки електромагнітного ланцюга в момент зіткнення з поверхнею і розмикається у момент відриву від неї. Таким чином, на поверхні деталі не створюється кратер на відстані матеріалу деталі.



Пропонований пристрій насичення забезпечує імпульсний характер впливу на поверхню, що зміцнюється, при цьому з'являється можливість насичення цієї поверхні відповідним матеріалом наконечника без процесу електроіскрового легування як такого.



1 – генератор високої напруги; 2 – соленоїд; 3 – якоря;  
4 – наконечник; 5 – резистори; 6 – діод; 7 – амперметр; 8 – реостат  
Рисунок 3.106 – Установка для насичення матеріалом електрода поверхні

Запропонований спосіб насичення поверхонь деталей машин гарантує імпульсний характер виникнення коронного розряду і загального магнітного поля в зоні оброблення. Особливість і відмінність його від відомих, описаних раніше, в тому, що насичення поверхні відбувається через шнур коронного розряду, при цьому іскра в зоні оброблення не виникає, що усуває ймовірність утворення кратерів на поверхні деталі і електрода (рис. 3.107, 3.108).

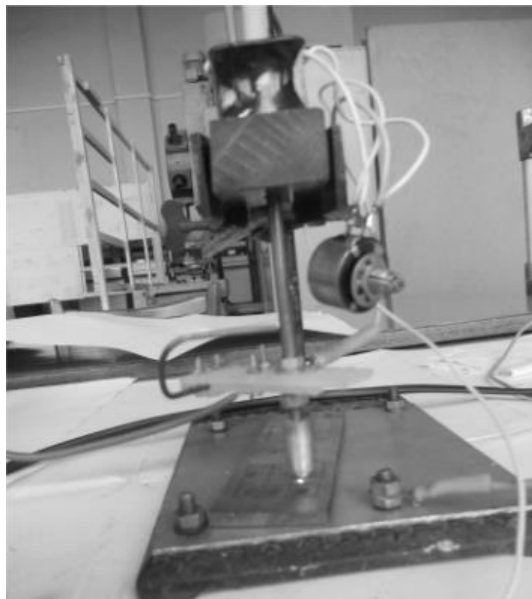
В якості матеріалів, якими насичується оброблювана поверхня, використовуються змінні наконечники з міді, алюмінію і матеріалу Р6М5.

Послідовність проведення експериментів:

1. Вимірюється твердість і шорсткість зразків.
2. Проводиться оброблення при прямій полярності (електрод – «плюс», деталь – «мінус»).
3. На електрод встановлюється один з трьох змінних наконечників.
4. Здійснюється оброблення протягом 5 хвилин.
5. Для кожного типу наконечника (мідь, алюміній, Р6М5) виконуються три експерименти зі змінним струмом.

6. Проводиться оброблення зі зворотною полярністю (електрод – «мінус», деталь – «плюс»).

7. Проводиться вимірювання шорсткості, мікротвердості і глибини насичення.



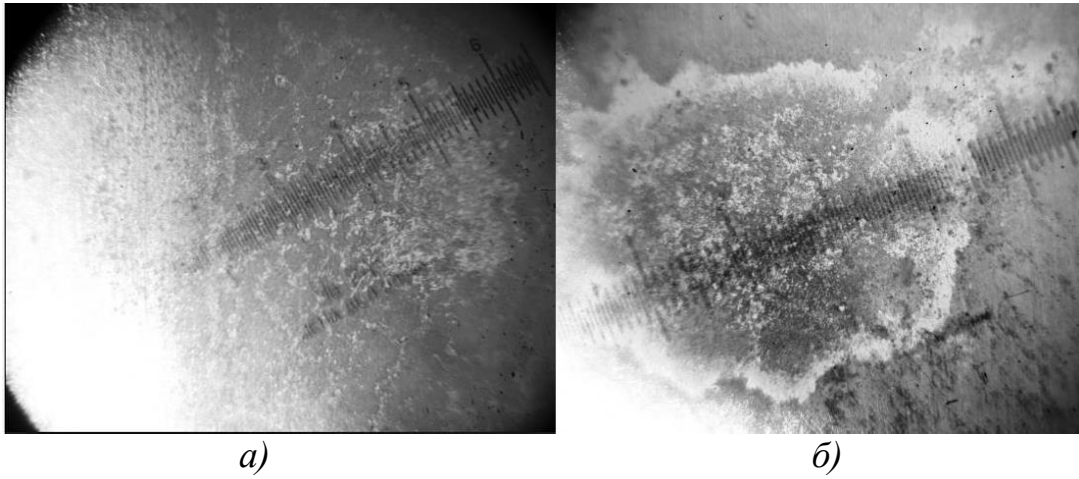
*Рисунок 3.107 – Лабораторна установка для здійснення способу поверхневого насичення у коронному розряді*



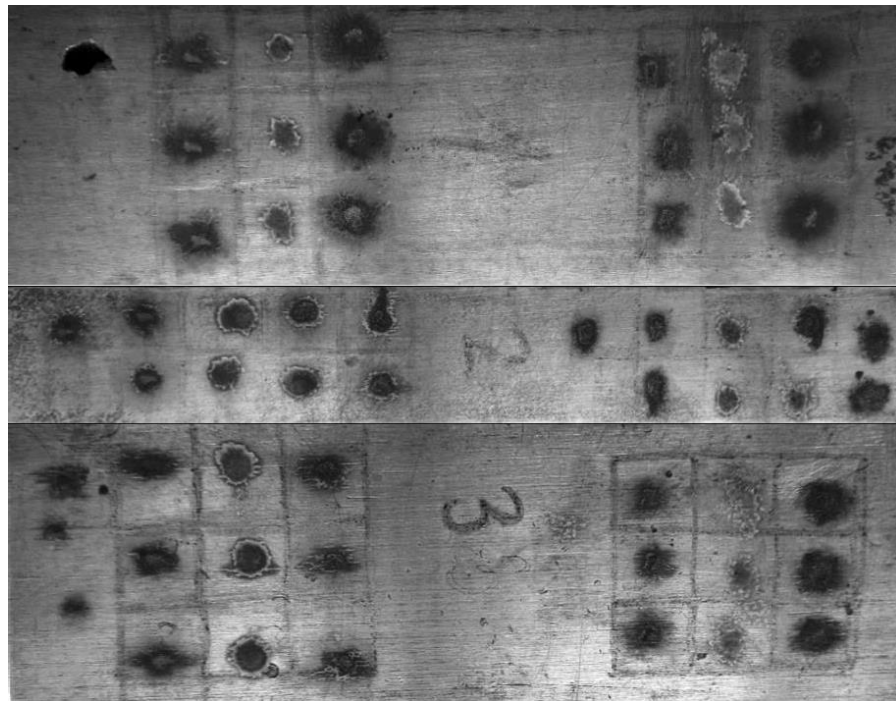
*Рисунок 3.108 – Електрод з наконечником з алюмінію*

Оброблення проводилося при прямій і зворотній полярності для дослідження ефекту насичення. Було відзначено, що при прямій полярності (електрод – «плюс», деталь – «мінус»), відбувалось перенесення іонів з електрода на поверхню зразка (рис. 3.109, а), а із зворотною полярністю (електрод – «мінус», деталь – «плюс») відбувалася ерозія поверхні зразка (рис. 3.109, б).

На рис. 3.110 представлені результати оброблення наконечниками з міді, алюмінію, Р6М5.



*а – при включенні установки з прямою полярністю; б – при включенні установки зі зворотною полярністю*  
*Рисунок 3.109 – Оброблення насиченням*



*Рисунок 3.110 – Зразки, оброблені наконечниками з різних матеріалів*

У таблиці 3.13 представлені результати вимірювання мікротвердості зразків при насиченні їх поверхні електродами з міді, алюмінію і Р6М5.

За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro 0.25 були побудовані математичні моделі на основі нейросітьового моделювання, де вхідними симптомами були сила струму ( $I$ ), оброблюваний матеріал, а кінцевими синдромами – шорсткість ( $Ra$ ) і мікротвердість ( $HV$ ). У результаті нейросітьової апроксимації експериментальних даних отримано дві математичні моделі.

Таблиця 3.13 – Значення мікротвердості зразків при обробці з прямою полярністю

Таблиця значень мікротвердості образців при обробці з прямою полярністю									
Матеріал наконечника електрода	Значення мікротвердості $\times 10$ Мпа								
	Образец №1			Образец № 2			Образец № 3		
<b>Медь</b>	280	230	232	218	337	350	290	277	273
	275	277	209	225	309	309	244	273	355
	209	250	277	275	273	290	209	309	264
<i>Среднее значение</i>	<i>254,667</i>	<i>252,333</i>	<i>239,333</i>	<i>239,333</i>	<i>306,3</i>	<i>316,3</i>	<i>247,667</i>	<i>286,3</i>	<i>297,3</i>
<b>Общее</b>	<b>248,778</b>			<b>287,3</b>			<b>277,1</b>		
<b>Алюминий</b>	244	272	337	319	309	330	244	254	265
	209	245	244	337	275	332	209	272	302
	200	309	272	277	280	270	270	209	277
<i>Среднее значение</i>	<i>217,667</i>	<i>275,333</i>	<i>284,33</i>	<i>311</i>	<i>288</i>	<i>310,7</i>	<i>241</i>	<i>245</i>	<i>281,3</i>
<b>Общее</b>	<b>259,111</b>			<b>303,2</b>			<b>255,8</b>		
<b>Р6М5</b>	290	244	254	319	290	290	209	309	290
	209	229	278	332	330	223	275	309	302
	202	209	223	287	319	284	244	275	244
<i>Среднее значение</i>	<i>233,66667</i>	<i>227,333</i>	<i>251,67</i>	<i>312,667</i>	<i>313</i>	<i>265,7</i>	<i>242,667</i>	<i>297,7</i>	<i>278,7</i>
<b>Общее</b>	<b>237,556</b>			<b>297,1</b>			<b>273</b>		
<b>Начальная микротвердости образца</b>	215			210			210		
	189			192			202		
	202			230			245		
<i>Среднее значение</i>	<i>202,000</i>			<i>210,667</i>			<i>219,000</i>		
<b>Средние значения микротвердості по трем образцам</b>									
Медь	<b>248,482</b>								
Алюминий	<b>295,878</b>								
Р6М5	<b>268,630</b>								

У результаті нейросітьового моделювання визначили, що найбільш значущим параметром є матеріал деталі, але струм також значно впливає на процес поверхневого насичення (рис. 3.111).

Сигнал	Значимость
ME	1
MO	0.5079979
I	0.820291

Рисунок 3.111 – Значимість впливу вхідних параметрів на якість поверхні

На основі створених моделей отримані сітьові значення мікротвердості і шорсткості обробленої поверхні, які залежать від параметрів оброблення (матеріалу деталі і струму).

Результат моделювання показує, що математичні моделі адекватні.

За допомогою отриманих сітьових значень показників якості поверхні обробленої деталі (мікротвердості і шорсткості) побудовані графіки показників при відповідних значеннях струму і оброблюваної деталі (рис. 3.112).

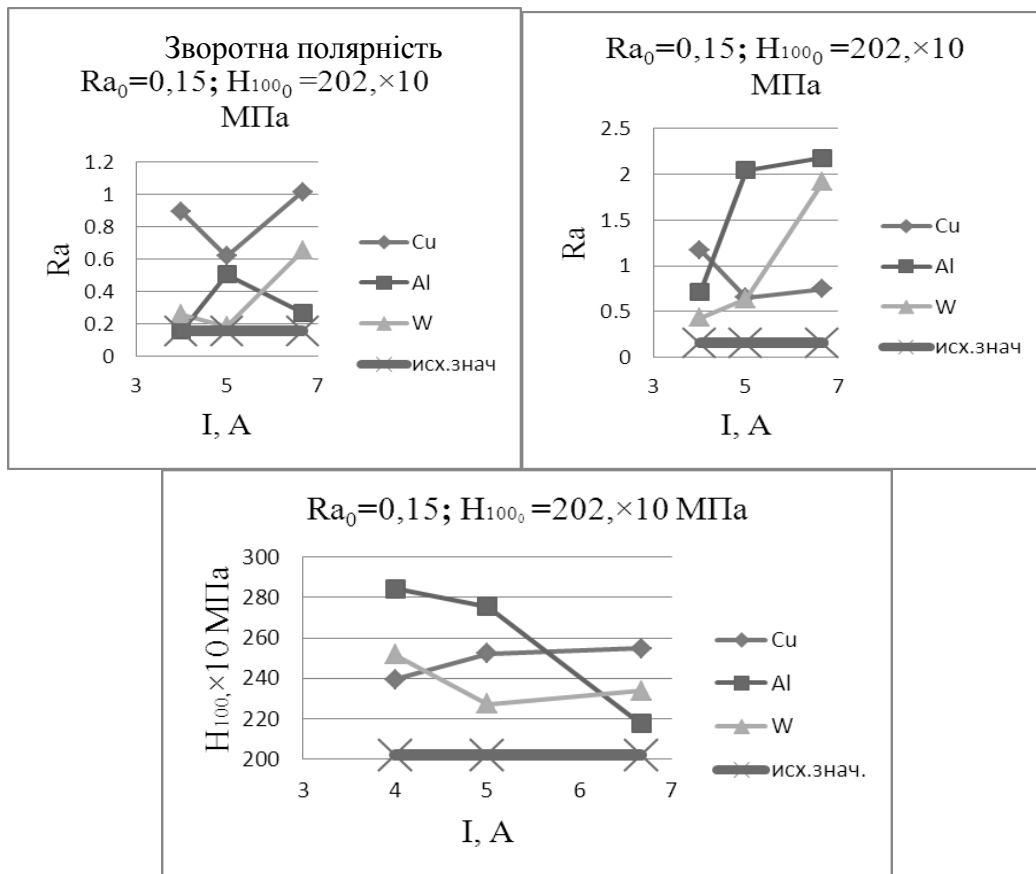


Рисунок 3.112 – Залежність показників якості при  $Ra_0 = 0,15$  мкм;  
 $H_{100_0} = 202 \times 10$  МПа

На основі отриманих даних за допомогою нейросітьового моделювання було проаналізовано новий спосіб насичення поверхонь деталей машин у коронному розряді із саморегуляцією процесу; спираючись на вербальний опис двох математичних моделей оброблення даних інтегральних показників мікротвердості і шорсткості, можна дослідити вплив режимів оброблення на якість і експлуатаційні показники обробленої поверхні.

Таким чином, з використанням способу поверхневого насичення у коронному розряді із саморегуляцією процесу розширюються технологічні можливості його використання, підвищується зручність і простота використання в звичайних виробничих умовах. Експериментально підтверджено, що фактори оброблення, а саме струм і матеріал оброблення, впливають на якість і характеристики обробленої поверхні. Отримані результати свідчать про те, що поліпшуються експлуатаційні показники робочих поверхонь деталей.

Експериментальні дослідження способу поверхневого насичення у коронному розряді із застосуванням нейросітьових моделей дозволяють стверджувати, що застосування даного способу оброблення дозволяє підвищити якість і мікротвердість, що дозволяє поліпшити експлуатаційні властивості деталей машин.

Встановлено, що управління декількома технологічними параметрами оброблення дозволяє досягти максимального показника мікротвердості при мінімальних значеннях шорсткості поверхневого шару деталей машин [157–160].

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено класифікатор комбінованих методів оброблення деталей машин. Запропоновано методикау комбінування інтегрованих методів оброблення в одну систему, що дозволяє забезпечувати сукупність функціонально взаємозалежних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва і виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів чи операцій механічного оброблення деталей важкого машинобудування.

Зроблено детальний огляд комбінованих методів, розроблених на кафедрі технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії.

2. Проведено аналіз літературних джерел зі спеціальних методів оброблення деталей машин важкого машинобудування. Запропоновано методикау формування бази даних спеціальних методів, яка дозволяє проводити «декомпозицію» складних об'єктів і систем, які поділяються на ряд складових елементів. Представлення кожного об'єкта в БД здійснюється за допомогою певного набору властивостей, які має даний об'єкт. Запропонована база може бути використана для пошуку оптимального рішення щодо застосування спеціального методу оброблення із внесених до бази даних методів за умовами, заданими цільовою функцією.

3. Представлені в монографії методи зміцнювального оброблення робочих поверхонь деталей машин дозволяють отримати експлуатаційні властивості поверхні, що підвищує довговічність і надійність виробів машинобудування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Ковалевський, С. В.** Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов. – Краматорск : ДДМА, 2012. – 100 с.
2. **Патент 31437 Україна МПК (2006), В 23 Н 7/00.** Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u200713240 ; заявл. 28.11.2007; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 7. – 3 с.
3. **Матюха, П. Г.** Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими діями на робочу поверхню круга / П. Г. Матюха, В. В. Полтавець. – Донецьк : ДонНТУ, 2006. – 164 с.
4. **Патент 46605 Україна МПК (2006), В 23 Н 9/04 (2009.01).**  
Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, Я. С. Азарова ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u200907850 ; заявл. 27.07.2009 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24. – 3 с.
5. **Патент 59102 Україна МПК (2011.01) В 24 В 31/00.** Спосіб електромагнітно-абразивного оброблення поверхні деталей машин з використанням імпульсного струму / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, Д. П. Шистко, О. С. Новостройна ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201009166 ; заявл. 21.07.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9. – 2 с.
6. Моделювання коливальних процесів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С. В. Ковалевський, С. А. Матвієнко, О. Ю. Деньщикова, О. В. Лукічов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2(32), Т.1. – С. 93–99.
7. **Ковалевський, С. В.** Технологічне забезпечення зносостійкості поверхневого шару деталей автомобілів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі / С. В. Ковалевський, С. А. Матвієнко, О. В. Лукічов // Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві : Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2012. – Вип. 122. – С. 122–127.
8. **Колот, О. В.** Методологічні принципи вібростабілізаційного оброблення нежорстких деталей / О. В. Колот // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ, 2007. – Вип. 21. – С. 76–80.
9. **Руденко, О. Г.** Штучні нейронні сіті : навчальний посібник / О. Г. Руденко, Є. В. Бодянський. – Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.
10. Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing / Ed. Alan, W. Weimer. – London – Weinheim – New York – Tokyo – Melbourne – Madras : Chapman & Hall, 1997. – 671 p.
11. **Borisov, Anatoli A.** Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials, Edited by Anatoli A. Borisov, Luigi De Luca and Alex Merzhanov /

Translated by Yury B. Scheck

12. **Corbin, N.D.**, and McCauley, J.W., Self-Propagating High Temperature Synthesis (SHS) : Current Status and Future Prospects, MTL MS 86-1, Wattertown, MA, May 1986.

13. **Frankhouser, W.L.**, Brendley, K.W., Kieszek, M.C., and Sullivan, S.T., Gasless Combustion Synthesis of Refractory Compounds, Noyes Publications, 1985.

14. **Munir, Z.A.** Combustion and Plasma Synthesis of High Temperature Materials, Munir, Z.A., and Holt, J.B., Eds., VCH Publishers, 1990.

15. Mathematic Modeling of SHS of TiN, Samuel a. Maeby, A seminar submitted to the faculty of Rensselear at Hartford, Connecticut, 2000. – P. 118–129.

16. Ignition criteria for Self-propagating Combustion Synthesis, Yangsheng Zhang and Gregory C. Stangle, J.Mater. Res., № 7, July, 1993. –P. 1703–1711

17. SHS and Magnetic properties of Ni<sub>0.35</sub>Zn<sub>0.65</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Powders, Bull. Mater, № 4, August, 2002. – P. 263–266

18. Synthesis and Application of New Functionally Graded Materials and Coatings, E. Levashov, a Book of Abstract, 2004. – P. 96–98

19. New aluminium-based Materials, a Book of Abstract, 2004. – P. 125–129.

20. Numerical simulations of melting and refining processes, a Book of Abstract, 2004. – P. 116–117.

21. **Klimchuk, E.G.** Autowave exothermic organic synthesis in the mixes of organic solids / E. G. Klimchuk. – Macromolecular symposia, 2000. – V.160. – P.107–114

22. **Патент 42986 Україна МПК (2006), С 23 С 26/00.** Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, О. А. Завгородня ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u200902507 ; заявл. 20.03.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14. – 3 с.

23. **Патент 45984 Україна МПК (2006), С 23 С 26/00.** Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, О. А. Завгородня, С. М. Пецик ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u200903367 ; заявл. 08.04.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 3 с.

24. **Пат. 6932876 США, МПК 7 С 21 D 10/00, С 22 F 3/00.** U. I. T., L. L. C., Statnikov Efim S. – № 10/207859 ; заявл. 31.07.2002 ; опубл. 23.08.2005 ; НПК 148/558. Ultrasonic impact machining of body surfaces to correct defects and strengthen work surfaces.

25. **Ahmed, N.A.** Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718 / N. A. Ahmed, A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, V. V. Silberschmidt // Mater. Sci. and Eng. A. – 2006. – 424, № 1-2. – P. 318–325. (АНГЛ.).

26. Дослідження впливу параметрів процесу оброблення в середовищі коронного розряду на нейромережному базисі / С. В. Ковалевський, С. В. Сокур, А. І. Хоруженко, А. С. Янюшкін // Нейросітьові технології і їх застосування: збірник праць Міжнародної наукової конференції



«Нейросітьові технології і їх застосування». – Краматорськ : ДДМА, 2012. – С. 81–85.

27. Ковалевський, С. В. Дослідження робочих поверхонь деталей машин на основі точкового створення коронного шнура / С. В. Ковалевський, К. Є. Паригіна, С. В. Сокур // Нейросітьові технології і їх застосування: збірник праць Міжнародної наукової конференції «Нейросітьові технології і їх застосування». – Краматорськ : ДДМА, 2012. – С. 77–81.

**КОВАЛЕВСЬКИЙ Сергій Вадимович,  
ОНИЩУК Сергій Григорович,  
ТУЛУПОВ Володимир Іванович,**

## **Технологія функціональних та наноповерхонь (ч1)**

*Навчальний посібник*

Редагування О. О. Дудченко

Комп'ютерне верстання О. П. Ордіна

1/2021 Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк.  
Обл.-вид. арк. . Тираж 100 прим. Зам. № 94

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1633 від 24.12.2003