

Алтухов О. В.
Тарасов О. Ф.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ОСНАЩЕННЯ

Проаналізовано тенденції та підходи, які використовуються під час розробки інтегрованих систем автоматизованого проектування (ІСАПР) нових технологічних процесів та штампового оснащення для обробки металів тиском (ОМТ), зокрема процесів інтенсивного пластичного деформування (ІПД). Проведено аналіз проблем промислового впровадження процесів ІПД, що дозволило сформулювати вимоги до функцій компонентів ІСАПР, які розроблені. На основі методології об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) і мови Unified Modeling Language (UML) виконано проектування структури ІСАПР процесів ІПД, яка включає ряд компонентів для моделювання процесу і проектування штампового оснащення. Наведено структуру ІСАПР процесів ІПД, яка містить САД/САЕ-системи як зовнішні модулі.

Проведено оцінювання можливостей сучасних САД-систем для формування збірних одиниць оснащення на основі параметричної моделі деталей. Виконано аналіз різних підходів при побудові параметричних моделей для використання в ІСАПР штампового оснащення. Розроблено параметричну модель зв'язків елементів штампового оснащення процесу ІПД на прикладі модифікованого реверсивного зсуву (РЗ). Параметрична модель розроблена на основі табличного підходу, що включає зв'язки параметрів заготовки, матриці, пуансона та виштовхувача. Ця таблиця забезпечує перебудову геометрії штампового оснащення в залежності від розмірів заготовки. Наведено етапи створення параметричної моделі збірної одиниці штампів для процесу ІПД на прикладі модифікованого РЗ. Створено компонент ІСАПР для проектування штампового оснащення на основі його параметричної моделі, який використовує API САД-системи SolidWorks. Наведено інтерфейс розробленого компоненту ІСАПР для побудови в SolidWorks збірки штампів на прикладі робочого інструменту для процесу модифікованого РЗ.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, штампове оснащення, таблиця параметризації, інтеграція, САПР, параметрична модель, САД

Інтегровані системи автоматизованого проектування процесів ОМТ, зокрема процесів ІПД використовуються у промисловості та при проведенні наукових досліджень з метою зменшення витрат на розробку нових процесів та проектування штампового оснащення. Найбільш вдалим прикладом є розробка САПР процесів ІПД, яка передбачає інтеграцію з сучасними САД/САЕ - системами, що дозволяє значно скоротити терміни розробки ІСАПР та отримання сумісності з промисловими стандартами тривимірної графіки [1, 2]. В тому числі, для вирішення ряду завдань проектування процесів ІПД авторами розроблено компоненти ІСАПР, ряд з яких розглянуто в роботі [1].

Стрімкий розвиток інтернет технологій та поширення хмарних сервісів дозволяє розміщення у мережі компонентів ІСАПР для їх віддаленого використання. Це спрощує обслуговування, супровід та доступ до обчислювальних потужностей, на яких виконується ІСАПР, а також запобігає неліцензійному використанню програмного забезпечення [3-5].

Останнім часом розробники ІСАПР процесів ОМТ включають до складу своїх систем методи штучного інтелекту для підвищення рівня інтелектуальності, що дозволяє також отримувати більш якісні технічні рішення під час проектування. Серед методів штучного інтелекту, які використовуються в промислових ІСАПР, слід відзначити застосування баз знань та експертних систем [6, 7], евристичних алгоритмів для генерації та оптимізації конструкцій під час проектування [8]. Для підвищення ефективності створення нових технічних рішень необхідні системи, які будуть використовувати модель середовища з підтримкою опису структури та поведінки об'єкту проектування [9]. У результаті аналізу технічної проблеми повинні формуватися функціональні вимоги до об'єкту проектування, в якому планується їх реалізувати [10]. Але на даний час відсутні повністю впроваджені реалізації ІСАПР для формування концептуальної моделі об'єкту проектування, технічних рішень для всіх елементів та конструкції загалом.

Процеси ІПД дозволяють підвищувати фізико-механічні властивості існуючих металів та їх сплавів, що дає гарні перспективи впровадження в промисловості [11]. Однак існують

декілька проблем, які стримують широке розповсюдження процесів ПД в промисловості. До таких проблем відносяться: високі навантаження на інструмент, що призводить до обмеження розмірів заготовок, які обробляються, вимоги до пластичності матеріалів, які використовуються для обробки, та складність дослідження нових процесів з пошуком оптимальних параметрів [12].

Автоматизація проектування більшості процесів ПД залишається проблемою при виконанні досліджень, що обмежує їх впровадження в промислових масштабах. Проведення теоретичних досліджень процесів ПД засобами CAE-систем [13], на відміну від натурних експериментів, дозволяє швидко виконати моделювання і значно зменшити час пошуку оптимальних параметрів технологічного процесу. Параметри процесу включають види та послідовність операцій, геометрію та характеристики матеріалів заготовки і інструменту, температурні режими, умови тертя на поверхнях та інше. При цьому для знаходження оптимальних параметрів технічного рішення виконується ряд розрахунків зі зміною вибраних параметрів, що призводить до зміни розмірів заготовки та штампового оснащення. В існуючих ІСАПР найчастіше підготовку геометрії всіх частин інструменту при проектуванні виконують у ручному режимі і витрачають для цього досить багато часу [14]. Тому розробка ІСАПР процесів ПД з можливістю формувати моделі та передавати збірні одиниці штампового оснащення в САД-системи для візуалізації є актуальним питанням.

Розробка програмного забезпечення для автоматизації проектування процесів ПД можлива на базі промислових САД/CAE-систем, що підтримують відкриті інтерфейси для розробки зовнішніх модулів. Сучасні САД/CAE-системи мають можливості для створення зовнішніх модулів при автоматизації різних технологічних процесів, що дозволяє адаптувати їх для проектування широкого спектра складних завдань, включаючи процеси ПД. Автоматизація моделювання процесів ПД за допомогою зовнішніх модулів для CAE-систем широко використовується на підприємствах і дозволяє суттєво скоротити час на підготовку моделі процесу, виконання моделювання та на аналіз результатів [1]. Однак процесу автоматизації проектування штампового оснащення не приділяється достатня увага, а це, у свою чергу, викликає додаткові витрати часу і не дає можливості повністю перейти на використання ІСАПР процесів ПД. Створення геометричних моделей штампового оснащення дозволить скоротити час на підготовку моделі процесу та після отримання задовільних результатів моделювання технологічного процесу отримати креслення оснастки для виготовлення промислового інструменту.

Проектування складних схем ПД в автоматизованих системах вимагає безліч ітерацій. При цьому фахівець витрачає більшість свого часу не на саме проектування, а на перебудову існуючої моделі і виправлення помилок. Засобом для автоматизації подібних ітеративних завдань є параметричний підхід. В даний час параметричні можливості в САД-системах вважаються невід'ємною їх частиною. Такі системи дозволяють будувати асоціативні моделі і збірки, а також створювати користувальницькі параметричні бібліотеки. При параметричному підході на перший план виходять такі параметри, як розміри, залежності та обмеження. Моделі при цьому будується схематично, що дозволяє прискорити процес.

Існує поділ видів параметризації (за ступенем свободи накладених зв'язків) на м'які (таблична і ієрархічна моделі) і жорсткі (варіаційна і геометрична моделі) [15, 16]. При жорсткій параметризації в моделі повністю задані всі зв'язки. Зміна геометричної моделі відбувається за рахунок характеру зв'язків і чіткого порядку їх накладення. Це виконується відповідно до дерева побудови. Для жорсткої параметризації характерний випадок, при якому рішення може не буде знайдено через конфлікт зв'язків. При м'якій параметризації перебудова геометричної моделі відбувається за рахунок вирішення нелінійних рівнянь, що описують взаємозв'язок в моделі.

При створенні збірних одиниць на основі параметричних моделей виникає низка проблем, таких як складні зв'язки між збірними одиницями, які створюють проблеми при необхідності зміни однієї з одиниць; погано керована конфігурація, що описує зв'язки між одини-

цями та недостатні залежності, які призводять до втрати форми або розмірів при ручному редагуванні збірки. Для побудови збірки штапкової оснастки ППД зручнішим способом є розробка параметричної моделі на основі варіаційного або табличного підходів [16, 17], що дозволяє простіше відстежувати зв'язки між збірними одиницями. Прив'язка внутрішніх розмірів штапкової оснастки виконується до розмірів заготовки, що обробляється, проте можлива і прив'язка зовнішніх розмірів до розмірів робочого простору певних моделей обладнання. Сучасна тенденція при розробці збірок полягає у використанні простих залежностей для зв'язків між збірними одиницями, а також відстеження обмежень та конфігурації, що дозволяє отримати керовану збірну одиницю на основі параметричної моделі. На даний момент такий підхід використовується не у всіх промислових САД-системах, що ускладнює роботу зі збіркою та вимагає розробки зовнішнього програмного забезпечення для автоматизації проектування процесів ППД на основі параметричної моделі.

Таким чином, розробка ІСАПР проектування процесів ППД з використанням методології UML є актуальною задачею, що дозволить зв'язати процеси проектування, пошуку оптимальних параметрів технологічного процесу та отримання креслень штапкового оснащення. Для цього необхідно створення набору компонентів із загальним інтерфейсом і набором функцій, що забезпечить їх взаємодію під управлінням єдиної оболонки, яка інтегрована з САД-системою.

Автоматизація проектування штапкового оснащення для експериментального дослідження процесів ОМТ, зокрема ППД за схемою модифікованого реверсивного зсуву [18] вирішена шляхом створення ІСАПР на базі промислових САД/САЕ-систем: САД-системи DS SolidWorks та САЕ-системи ABAQUS. Для забезпечення повного циклу проектування з використанням ІСАПР, треба включати в її склад ряд підсистем, які забезпечують створення деталей штапкового оснащення та формування збірок. Особливо це необхідно для штампів складної конструкції, які включають декілька збірок. Найбільш повний набір компонентів таких ІСАПР включає підсистеми інженерного аналізу САЕ для аналізу напружено-деформованого стану заготовок та розрахунків конструкцій на міцність, як правило на базі методу скінчених елементів.

Метою роботи є розробка компоненту ІСАПР з використанням об'єктно-орієнтованого підходу для побудови збірних одиниць штапкового оснащення процесів ППД на основі їх параметричної моделі.

Для опису структури ІСАПР процесів ППД використано уніфіковану мову UML, яка дозволяє схематично представити склад та взаємодію компонентів системи. Структура спроектованої ІСАПР процесів ППД наведена на рис. 1. Головним є модуль роботи з користувачем та прийняття рішень, який містить базу процесів ППД, пропонує користувачу процеси ППД відповідно до висунутих вимог й приймає вибір користувача для подальшого проектування процесу. Модуль роботи з користувачем та прийняття рішень взаємодіє з модулем роботи з САЕ і передає до нього модель обраного процесу ППД для моделювання та проведення досліджень процесу з різними параметрами. Для взаємодії безпосередньо з САЕ-системою використовується модуль Python script, який відповідає за підготовку коду для автоматичної побудови розрахункової моделі в САЕ-системі Abaqus. Після формування скрипта на мові Python для обраної моделі відбувається її передача в САЕ-систему Abaqus за допомогою Windows Shell.

Після проведення досліджень обраного процесу ППД за допомогою САЕ, користувач обирає найкращий варіант та переходить до створення геометричної моделі штапкового оснащення. Модуль роботи з САД отримує параметричну модель обраного процесу ППД та створює проект штапкового оснащення, але перед створенням геометричної моделі, при необхідності, є можливість скорегувати розміри елементів конструкції. Після підтвердження розмірів відбувається перевірка коректності параметричної моделі та побудова геометричної моделі штапкового оснащення. Після цього модель передається в САД-систему. Таким чином, взаємодія між компонентами ІСАПР базується на відкритих програмних інтерфейсах або бібліотеках вбудованих функцій.

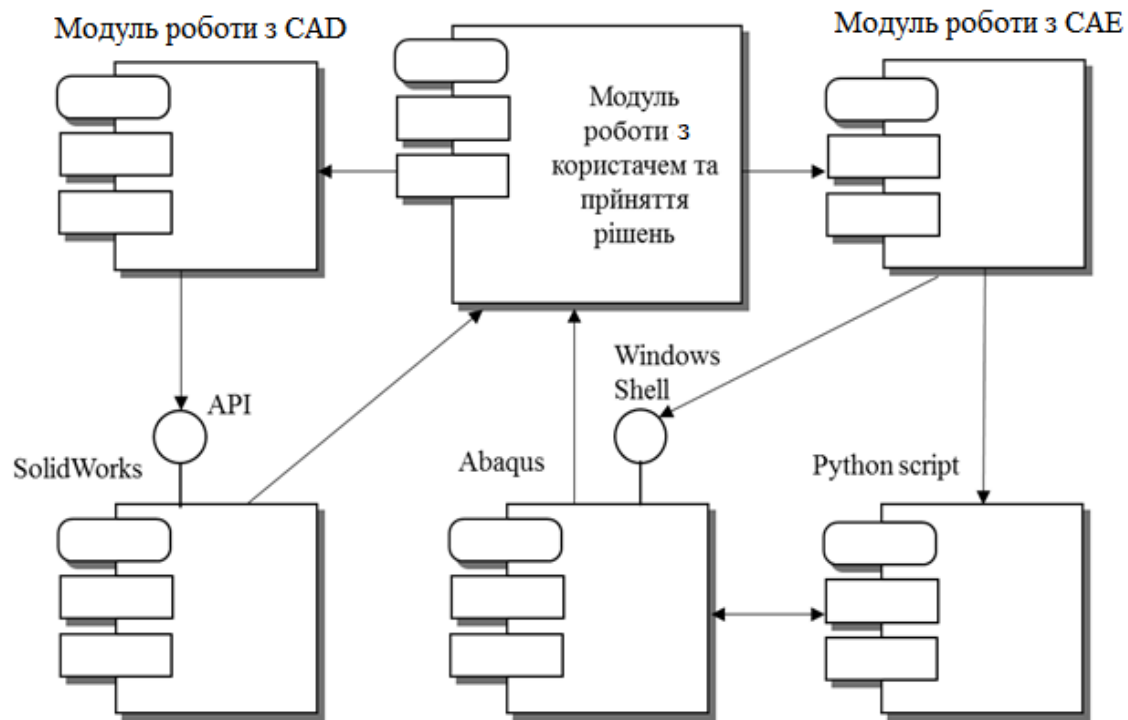


Рис. 1. Діаграма компонентів ІСАІР процесів ПД на основі промислових CAD/CAE-систем

Для опису структури ІСАІР процесів ПД використано уніфіковану мову UML, яка дозволяє схематично представити склад та взаємодію компонентів системи. Функціональність системи розділена для реалізації у вигляді функцій між класами системи, які зв'язані між собою для сумісної роботи, за Діаграма класів ІСАІР процесів ПД показує, що основним класом є AiCAD SPD, з якого успадковуються класи SPD Process, WorkPiece та ParametricModel, містять функції для обробки даних про процеси ПД, про типи заготовок та параметричні моделі процесів ПД відповідно. Клас Modeling включає функції для запуску процесу моделювання в CAE та отримання його результатів. Класи GeometryModel і ParametricModel відповідають у системі за формування геометричної моделі штампового оснащення на основі параметричної моделі обраного процесу ПД. Клас Analyze відповідає за аналіз результатів моделювання в CAE, Optimization виконує пошук оптимальних параметрів обраного процесу ПД. Ряд класів виконують обробку результатів розрахунків або експериментальних досліджень: клас Microstructure містить функції обробки мікроструктури отриманих зразків, Graphics відповідає за побудову графіків з результатами досліджень обраного процесу ПД, Клас Experiment реалізує програму експериментальних досліджень впливу параметрів технологічного процесу на результати розрахунку напружено-деформованого стану заготовки в процесі формозміни.

Розроблений компонент ІСАІР для проектування штампового оснащення процесу ПД використовує параметричну модель, що дає можливість розширити варіативність виробів, які проектуються. Для ІСАІР обрано табличний спосіб параметризації, який часто використовується в подібних проектах. Параметрична модель штампового оснащення для процесу ПД за схемою модифікованого реверсивного зсуву [18] наведена на рис. 2. У схему процесу ПД модифікованого реверсивного зсуву входить типовий набір інструментів: дві частини матриці з внутрішньою порожниною (поз. 1, 2), пуансон (3), виштовхувач (4) і заготовка (5).

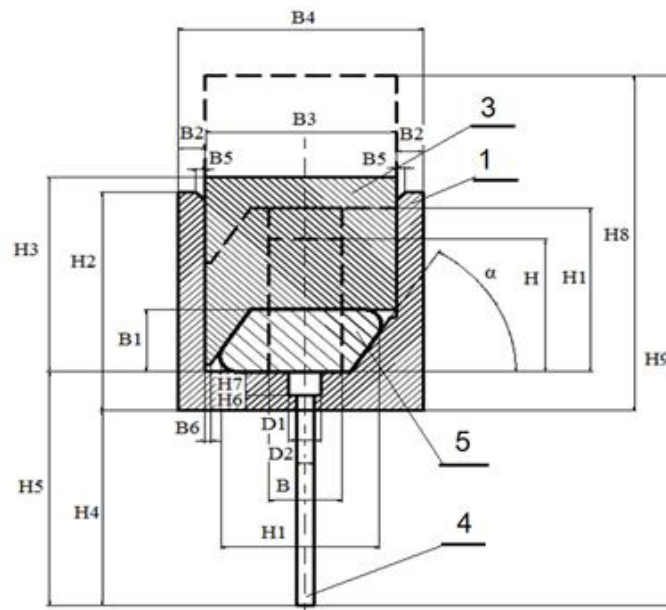


Рис. 2. Параметрична модель штампового оснащення для процесу ППД за схемою модифікованого реверсивного зсуву:

1 – матриця; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач; 5 – заготовка

Базовими розмірами є початкові розміри заготовки: висота H , ширина B і кут нахилу поверхонь пуансона і нижнього інструмента α , що деформують заготовку. Залежності інших розмірів від вихідних базових показано в табл. 1.

Таблиця 1

Таблиця залежностей між параметрами деталей (див. рис. 2)

Деталь	Параметр	Залежності або значення, мм	Деталь	Параметр	Залежності або значення, мм
Заготовка	H	80	Матриця	$H7$	10
	B	40		$H8$	$H3+H5$
	$H1$	$H+B+tg(\alpha)$		$H9$	$H8+H4$
	$B1$	$(H*B)/H1$		$B2$	15
Матриця	α	60 градусів		$B3$	$H1-10$
	$H2$	$H1+10+H6+H7$		$B4$	$B3+2*B2$
	$H3$	$H2+10$		$B5$	5
	$H4$	$H2+10$		$B6$	3
	$H5$	$H4+25$		$D1$	$B/2$
	$H6$	15		$D2$	$0.8*D1$

Створення параметричних моделей збірних одиниць штампового оснащення виконується за кілька етапів. На першому етапі виконується введення розмірів заготовки (довжина, висота, ширина) та кутів нахилу деформуючих поверхонь пуансонів. Після введення розмірів виконується перевірка їхньої коректності. На другому етапі виконується розрахунок розмірів штампового оснащення (матриці та пуансону) за геометричною моделлю. На третьому етапі виконується перевірка коректності геометрії, що включає перевірку на обмеження пов'язані

з іншими збірними одиницями, наприклад, з розмірами штампового блока. На четвертому етапі виконується формування масиву параметрів деталей для передачі в CAD-систему. На п'ятому етапі виконується запуск CAD - системи. На останньому етапі виконується побудова деталей та зборка штампового оснащення в CAD-системі. Після цього можливе редагування окремих деталей у CAD-системі, в якості якої використовували DS SolidWorks.

При реалізації компонента, який забезпечує зв'язок ІСАПР з промисловою CAD - системою DS SolidWorks використовували її вбудований набір функцій API [19]. Для успішної взаємодії розробленого компонента ІСАПР з CAD - системою версії MS Visual Studio та DS SolidWorks повинні бути не старіше за 2015 рік.

На рис. 3 наведено інтерфейс розробленого компонента ІСАПР процесів ІПД для побудови геометричної моделі штампового оснащення для обраного процесу. Для обраного процесу ІПД побудова моделі в ІСАПР починається з вибору елемента меню «Геометрія». На формі (у лівій частині) розміщено поля для редагування початкових розмірів, якщо це необхідно, та елементи вибору для деталей у збірці. Після побудови моделі відбувається перевірка розмірів, побудова геометричної моделі та передача її у CAD-систему (кнопка «Передати у CAD»).

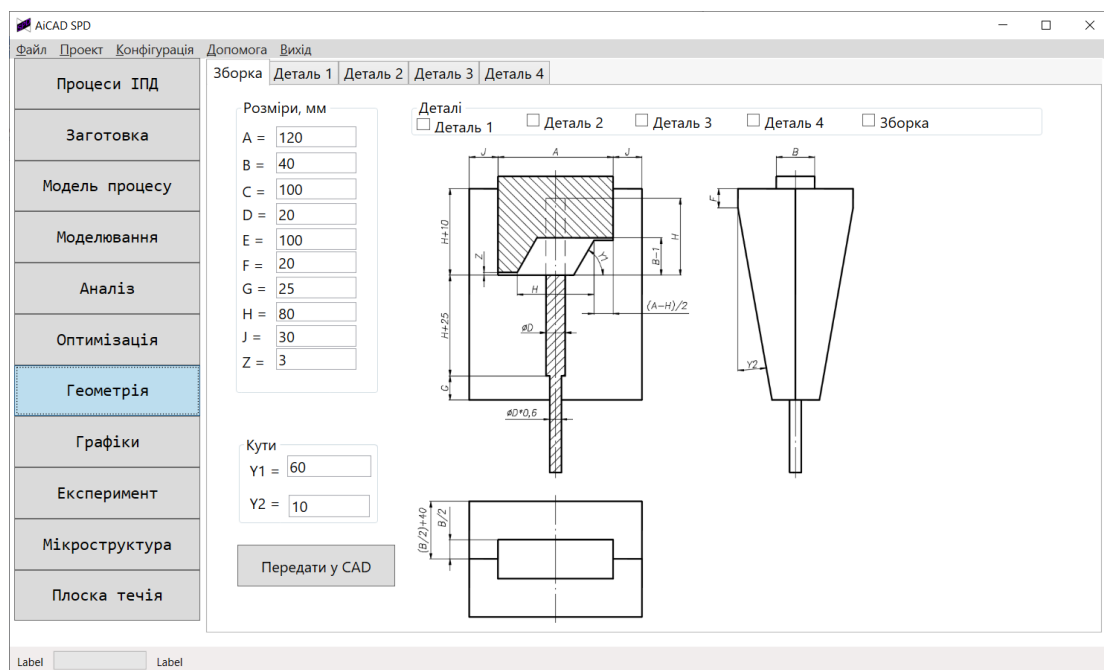


Рис. 3. Інтерфейс розробленого компонента ІСАПР процесів ІПД для побудови геометричної моделі штампового оснащення

На рис. 4 наведено результат роботи компонента ІСАПР у вигляді побудованої моделі частини матриці (рис. 4а) та всієї збірної одиниці робочого інструменту для реалізації технології ІПД (рис. 4б). Послідовність формування зборки наступна: спочатку будуються частини матриці, потім пуансон і останнім виштовхувач.

Розроблений компонент є частиною ІСАПР процесів ІПД, який використовується на заключному етапі роботи після проведення досліджень ефективності процесу деформування для створення конструкторської документації штампового оснащення з заданими параметрами.

У процесі створення компонента ІСАПР для процесів ІПД було використано методологію ООП та мову UML для проектування структури компонентів. Розглянуто підхід при створенні ІСАПР процесів ІПД на основі відкритих інтерфейсів промислових CAD-систем. В результаті сформовано методикку взаємодії з промисловою CAD-системою SolidWorks на основі її програмного інтерфейсу, а також розроблено набір функцій для формування збірних одиниць штампового оснащення на основі параметричної моделі процесу ІПД. Розроблене

програмне забезпечення може бути використане для вирішення загальних завдань проектування штампового оснащення, як процесів ПД так і ОМТ. Розроблений компонент ІСАПР процесів ПД дозволив отримати комплексне рішення та сформувати цикл розробки технологічного процесу ПД починаючи з його вибору до отримання геометричної моделі штампового оснащення. У результаті проведеної роботи обрані параметри штампового оснащення, розроблена та виготовлена оснастка для проведення експерименту.

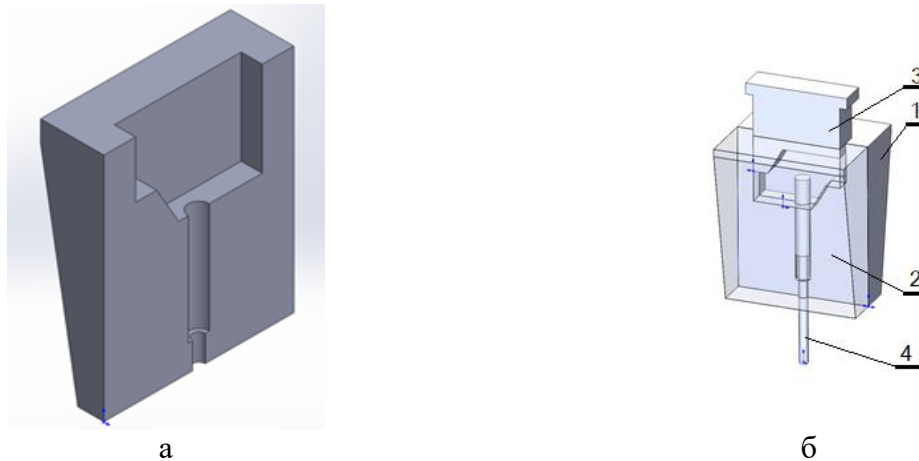


Рис. 4. Результат побудови геометричних моделей елементів штампу:
а – частина матриці; б – робочий інструмент (збірна одиниця штампового оснащення);
1 – матриця; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз сучасних тенденцій та підходів розробки ІСАПР штампового оснащення для процесів ОМТ, зокрема процесів ПД, що дозволило сформулювати вимоги до функцій компоненту, який забезпечує побудову геометричної моделі штампового оснащення обраного процесу ПД. Проаналізовано проблеми промислового впровадження як процесів ПД, так і ІСАПР, які пов'язані з відсутністю підтримки параметризації та автоматизованої передачі інформації з САД-систем до САЕ-систем. Цей аналіз дозволив сформулювати вимоги до функцій компонентів ІСАПР.

2. Розроблено структуру ІСАПР з використанням методології ООП та мови UML. ІСАПР процесів ПД виконує наступне: забезпечує вибір процесу ПД по параметрам заготовки, моделювання у САЕ-системі, вибір оптимальних параметрів обраного процесу ПД, формування збірної одиниці штампового оснащення обраного процесу ПД на основі його параметричної моделі, передачу розрахованих параметрів моделі в САД-систему.

3. Розроблено параметричну модель штампового оснащення для процесу ПД по схемі комбінованого реверсивного зсуву з використанням табличної параметризації, яка включає заготовку, дві частини матриці, пуансон та виштовхувач. Розгляд процесу проектування дозволив розробити загальний підхід до автоматизації проектування типового штампового оснащення процесів ПД. Експериментально перевірено роботоспроможність параметричної моделі та підтверджено, що вона дозволяє забезпечити побудову штампового оснащення у широкому діапазоні розмірів, використовувати штампове оснащення та ІСАПР на значному спектрі ковальсько-пресового обладнання. Використання параметричної моделі дозволяє масштабувати розміри заготовок, що спрощує розрахунки для ряду заготовок з наступним аналізом напружено-деформованого стану.

4. Розглянуто етапи створення параметричної моделі збірної одиниці штампового оснащення для процесу ПД. Реалізовано компонент ІСАПР для побудови штампового оснащення на основі параметричної моделі процесу ПД по схемі комбінованого реверсивного зсуву в САД-системі DS SolidWorks. Використання розвиненого програмного інтерфейсу

DS SolidWorks дозволяє автоматизувати побудову збірних одиниць штампового оснащення, що значно зменшує час підготовки конструкторської документації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тарасов О. Ф., Алтухов О. В., Сагайда П. І., Васильєва Л. В., Аносов В. Л. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія. Краматорськ: ЦТPI «Друкарський дім». 2017. 239 с.
2. Zhi-Xin J., Hong-Lin L., Xue-Chang Z., Ji-Qiang L., Bo-Jie C. Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. 54(9-12), pp. 837–852 DOI: 10.1007/s00170-010-3006-7
3. Zissis D., Lekkas D., Azariadis P., Papanikos P., Xidias E. Collaborative CAD/CAE as a cloud service. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2016, pp. 1–17 DOI: 10.1080/23302674.2016.1186237
4. Ihara Y., Hashimoto G., Okuda H. Web-based integrated cloud CAE platform for large-scale finite element analysis. *Mechanical Engineering Letters*. 2017. 3, pp. 1-8. DOI: 10.1299/mel.17-00520.
5. Deng Z., Zhang J., Yin H. Architecture of cloud platform for CAE simulation in supercomputing environment. *International Journal of High Performance Systems Architecture*. 2016. 6 (3), pp. 131–142 DOI: 10.1504/ijhpsa.2016.080656.
6. Rahulkumar S. H. Advances in metal forming. expert system for metal forming. Springer. 2015. 126 p. ISBN 978-3-662-44496-2.
7. Kulon J., Mynors D.J., Broomhead P. A knowledge-based engineering design tool for metal forging. *Elsevier Science*. 2006. 177 (1-3), pp. 331–335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.062
8. Brecher C., Klein W., Tannert M. Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes. *Production Engineering*. 2010. 4 (2-3), pp. 279–286. DOI: 10.1007/s11740-010-0226-5.
9. Tarasov O., Vasylijeva L., Altukhov O., Anosov V. Automation of the synthesis of new design solutions based on the requirements for the functionality of the created object. *Nine International Conference «Information Control Systems & Technologies» (ICST-2020)*. Odessa. Ukraine. September 24–26. 2020, pp. 161–175. CEUR-WS.org. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/paper13.pdf>.
10. Lin, BT., Chang, MR., Huang, HL. et al. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009. 42, p. 1140. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1670-7>
11. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2008. 57. 2, pp. 716–735, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
12. Faraji G., Kim H. S., Kashi H. T. Severe plastic deformation: methods. *Processing and Properties*. Elsevier. 2018. 315 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7>
13. Kuang-Hua C. Product performance evaluation with CAD/CAE. Elsevier. 2013. 537 p. ISBN: 978-0-12-398460-9.
14. Um D. Solid modeling and application: rapid prototyping. *CAD and CAE Theory*. Springer. 2016. 304 p. ISBN 978-3-319-21821-2.
15. Stan C., Zapciu M., Paraschiv M., Ungureanu M. 3D parametric modeling for complex parts generation. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 371, pp. 504–508. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.504
16. Ruchik T. D., Dhaval S. B., Kaushik P. M. 3D parametric modeling for product variants using case study on inner ring of spherical roller bearing. *Procedia Engineering*. 2013. 51, pp. 709–714.
17. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.101.
18. Potocnik D., Dolsak B., Ulbin M. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2013.14. 5, pp. 327-340. DOI: 10.1631/jzus.A1200245
19. Пат. 102513 Україна. The method of severe plastic deformation of the workpiece by deposition with a change in the direction of deformation. Tarasov O.F., Tarasov S.O.; Donbass State Engineering Academy. 2015. Nov 10. (in Ukrainian).
20. Пат. 102513 Україна, Спосіб інтенсивної пластичної деформації заготовки осадженням зі зміною напрямку деформування. О.Ф. Тарасов, С.О. Тарасов; Донбасская государственная машиностроительная академия. №а201505723; заявл. 10.06.2015; опубл. 10.11.2015, бюл. № 21.
21. Malpass L. SolidWorks 2009 API: Advanced product development. AngelSix. 2009. 246 p.

REFERENCES

1. Tarasov O. F., Altukhov O. V., Sagaida P. I., Vasylijeva L. V., Anosov V. L. Automated design and manufacture of products using CAD/CAM/CAE systems: monograph. Kramatorsk: Central Research Institute "Printing House". 2017. 239 p. (in Ukrainian).
2. Zhi-Xin J., Hong-Lin L., Xue-Chang Z., Ji-Qiang L., Bo-Jie C. Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. 54 (9–12), pp. 837–852 DOI: 10.1007/s00170-010-3006-7
3. Zissis D., Lekkas D., Azariadis P., Papanikos P., Xidias E. Collaborative CAD/CAE as a cloud service. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2016, pp. 1–17 DOI: 10.1080/23302674.2016.1186237
4. Ihara Y., Hashimoto G., Okuda H. Web-based integrated cloud CAE platform for large-scale finite element analysis. *Mechanical Engineering Letters*. 2017. 3, pp. 1–8. DOI: 10.1299/mel.17-00520.

5. Deng Z., Zhang J., Yin H. Architecture of cloud platform for CAE simulation in supercomputing environment. *International Journal of High Performance Systems Architecture*. 2016. 6 (3), pp. 131–142 DOI: 10.1504/ijhpsa.2016.080656.
6. Rahul Kumar S. H. *Advances in metal forming. expert system for metal forming*. Springer. 2015. 126 p. ISBN 978-3-662-44496-2.
7. Kulon J., Mynors D.J., Broomhead P. A knowledge-based engineering design tool for metal forging. *Elsevier Science*. 2006. 177 (1-3), pp. 331–335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.062
8. Brecher C., Klein W., Tannert M. Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes. *Production Engineering*. 2010. 4 (2-3), pp. 279–286. DOI: 10.1007/s11740-010-0226-5.
9. Tarasov O., Vasyliieva L., Altukhov O., Anosov V. Automation of the synthesis of new design solutions based on the requirements for the functionality of the created object. *Nine International Conference «Information Control Systems & Technologies» (ICST-2020)*. Odessa. Ukraine. September 24–26. 2020, pp. 161–175. CEUR-WS.org. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/paper13.pdf>.
10. Lin, BT., Chang, MR., Huang, HL. et al. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *Int J Adv Manuf Technol*. 2009. 42, p. 1140. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1670-7>
11. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2008. 57. 2, pp. 716–735, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
12. Faraji G., Kim H. S., Kashi H. T. Severe plastic deformation: methods. *Processing and Properties*. Elsevier. 2018. 315 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7>
13. Kuang-Hua C. *Product performance evaluation with CAD/CAE*. Elsevier. 2013. 537 p. ISBN: 978-0-12-398460-9.
14. Um D. *Solid modeling and application: rapid prototyping*. CAD and CAE Theory. Springer. 2016. 304 p. ISBN 978-3-319-21821-2.
15. Stan C., Zapciu M., Paraschiv M., Ungureanu M. 3D parametric modeling for complex parts generation. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 371, pp. 504–508. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.504
16. Ruchik T. D., Dhaval S. B., Kaushik P. M. 3D parametric modeling for product variants using case study on inner ring of spherical roller bearing. *Procedia Engineering*. 2013. 51, pp. 709–714. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.101.
17. Potocnik D., Dolsak B., Ulbin M. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2013.14. 5, pp. 327–340. DOI: 10.1631/jzus.A1200245
18. Pat. 102513 Ukraine. The method of severe plastic deformation of the workpiece by deposition with a change in the direction of deformation. Tarasov O.F., Tarasov S.O.; Donbass State Engineering Academy. 2015. Nov 10. (in Ukrainian).
19. Malpass L. *SolidWorks 2009 API: Advanced product development*. AngelSix. 2009. 246 p.

Altukhov O., Tarasov O. Development of software components for simulation of severe plastic deformation based on the parametric model of the die set

The trends and approaches used during the development of integrated computer-aided design (ICAD) of new technological processes and die set for metal forming (MF), in particular, processes of severe plastic deformation (SPD), are analyzed. Analysis of the industrial implementation of SPD processes problems was carried out. It made it possible to formulate the requirements for the functions of the developed ICAD components. On the basis of the methodology of object-oriented programming (OOP) and Unified Modeling Language (UML), the design of the ICAD structure of SPD processes was performed. The ICAD includes a number of components for process modelling and design of die sets. The structure of ICAD for SPD processes, which contains CAD/CAE systems as external modules, is presented.

An evaluation of the capabilities of modern CAD systems for the formation of prefabricated equipment units based on the parametric model of parts was carried out. An analysis of various approaches to the construction of parametric models for use in ICAD for the design of die sets was performed. A parametric model of the die set elements connections for the SPD process was developed using the example of a modified reverse shear scheme (RS). The parametric model is developed on the basis of a tabular approach, which includes relationships between the parameters of the billet, die, punch and ejector. This table provides a reconstruction of the die set geometry depending on the dimensions of the billet. The stages of creating a parametric model of a pre-assembled unit of a die set for the SPD process are given as an example of a modified RS scheme.

The ICAD component was created for the design of die sets based on their parametric models, which use the API of the SolidWorks CAD system. The interface of the developed ICAD component for building and visualization of die set assembly in SolidWorks is given, using the example of a working tool for the process of modified RS scheme.

Keywords: *severe plastic deformation, die set, tabular parameterization, integration, CAD, parametric model*

Алтухов А. В., Тарасов А. Ф. Разработка программных компонентов для моделирования интенсивного пластического деформирования на основе параметрической модели оснащения

Проанализированы тенденции и подходы, используемые при разработке интегрированных систем автоматизированного проектирования (ИСАПП) новых технологических процессов и штамповой оснастки для обработки металлов давлением (ОМД), в частности процессов интенсивного пластического деформирования (ИПД). Проведен анализ проблем промышленного внедрения процессов ИПД, что позволило сформулировать требова-

ния к функциям компонентов ИСАПР, которые разработаны. На основе методологии объектно-ориентированного программирования (ООП) и языка Unified Modeling Language (UML) выполнено проектирование структуры ИСАПР процессов ИПД, включающей ряд компонентов для моделирования процесса и проектирования штамповой оснастки. Приведена структура ИСАПР процессов ИПД, содержащая САД/САЕ-системы как внешние модули.

Проведена оценка возможностей современных САД-систем для формирования сборных единиц оснастки на основе параметрической модели деталей. Выполнен анализ разных подходов при построении параметрических моделей для использования в ИСАПР штамповой оснастки. Разработана параметрическая модель связей элементов штамповой оснастки процесса ИПД на примере модифицированного реверсивного сдвига (РС). Параметрическая модель разработана на основе табличного подхода, включающего связи параметров заготовки, матрицы, пуансона и выталкивателя. Эта таблица обеспечивает перестройку геометрии штамповой оснастки в зависимости от размеров заготовки. Представлены этапы создания параметрической модели сборной единицы штампа для процесса ИПД на примере модифицированного РС. Создан компонент ИСАПР для проектирования штамповой оснастки на основе его параметрической модели, использующей API САД-системы SolidWorks. Представлен интерфейс разработанного компонента ИСАПР для построения в SolidWorks сборки штампа на примере рабочего инструмента для процесса модифицированного РС.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, штамповая оснастка, табличная параметризация, интеграция, САПР, параметрическая модель, САД

Алтухов Александр Валерійович – канд. техн. наук, старший викл. ДДМА

Altukhov Oleksandr – candidate. technical of Sciences, Senior lecturer DSEA

Алтухов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, старший преп. ДГМА

E-mail: astratsl@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6310-3272>

Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДДМА

Tarasov Oleksandr – Dr. Tech. Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА

E-mail: alexandrtar50@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0493-1529>

Стаття поступила до редакції 05.05.22 р.