

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ  
САД/САМ/САЕ-СИСТЕМ**

**Монографія**

Затверджено  
на засіданні вченої ради  
Протокол № 3 від 01.12.2016

Краматорськ  
ЦТРІ «Друкарський дім»  
2017

**Автори:**

*Тарасов О. Ф.*, д-р техн. наук, професор;  
*Алтухов О. В.*, канд. техн. наук;  
*Сагайда П. І.*, канд. техн. наук, доцент;  
*Васильєва Л. В.*, канд. техн. наук, доцент;  
*Аносов В. Л.*, старший викладач.

**Рецензенти:**

*Зорі А. А.*, д-р техн. наук, професор, Донецький національний технічний університет (м. Покровськ);

*Оксанич А. П.*, д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського (м. Кременчук);

*Марков О. Є.*, д-р техн. наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ).

*Видання здійснено за підтримки міжнародного проекту «Розробка курсів із вбудованих систем з використанням інноваційних віртуальних підходів для інтеграції науки, освіти та промисловості в Україні, Грузії та Вірменії DesIRE» (544091-TEMPUS-1-2013-1-BE-TEMPUS-JPCR) за програмою TEMPUS Європейської комісії.*

*Поданий матеріал відображає думку авторів. Європейська комісія не несе відповідальності за використання інформації, що міститься в монографії.*

А 22 Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем : монографія / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва, В. Л. Аносов. – Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. – 239 с.  
ISBN 978-966-379-772-4.

Виконано аналіз розвитку автоматизованого проектування і виготовлення виробів, зокрема імплантатів, із застосуванням промислових CAD/CAM/CAE-систем. Наведено приклади різних САПР, створених на основі інтеграції з ними. Виконано моделювання процесів пластичного деформування заготовок для формування субмікроструктурної структури матеріалів, що підвищує якість виробів. Розглянуто шляхи вдосконалення інформаційного забезпечення автоматизованого проектування на основі онтологічного підходу.

УДК 004.9+004.896+004.652

© О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов,  
П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва,  
В. Л. Аносов, 2017

ISBN 978-966-379-772-4

© ДДМА, 2017



## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	6
ВСТУП.....	7
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ CAD/CAM/CAE-СИСТЕМ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Виділення основних функцій CAD/CAM/CAE-систем.....	10
1.2 Оптимізація конструктивних і технологічних рішень.....	16
1.3 Програмні інтерфейси CAD/CAM/CAE-систем для інтеграції їх компонентів у комплексну САПР.....	17
1.4 Проектування технологічних процесів інтенсивного пластичного деформування.....	18
1.5 Види і класифікація металевих імплантатів .....	20
1.6 Системний підхід як основа сучасної теорії проектування.....	26
1.7 Етапи проектування промислового виробу (на прикладі різального інструменту).....	28
1.8 Аналіз властивостей, що визначають якість проектного виробу .....	31
1.9 Синтез конструкцій на основі комбінаторних методів .....	46
Висновки за розділом 1.....	52
Список використаних джерел.....	53
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ НАСКРІЗНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРІЇ (НА ПРИКЛАДІ ІМПЛАНТАТІВ З ЛИСТОВОГО ТИТАНУ).....</b>	<b>59</b>
2.1 Актуальність автоматизації процесу проектування імплантатів з листового титану і оснащення для їх отримання.....	59
2.2 Розроблення методики проектування і виготовлення імплантатів для щелепно-лицьової хірургії і технологічного оснащення.....	61
2.3 Розроблення САПР оснащення для отримання імплантатів пластичним деформуванням на основі інтеграції з CAD- системою PowerSHAPE.....	69
2.4 Розроблення САПР процесів оброблення на верстатах з ЧПК на основі інтеграції з CAM-системою PowerMILL .....	74
Висновки за розділом 2.....	80
Список використаних джерел.....	81
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ САПР ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ БРЕКЕТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ POWERSHAPE .....</b>	<b>82</b>
3.1 Проблеми проектування виробів складної геометрії в галузі стоматологічної ортодонції .....	82
3.2 Розроблення процесу автоматизованого проектування брекет-систем.....	84
3.2.1 Поставлення задачі проектування брекет-систем .....	84

3.2.2	Методика побудови моделі людського зуба з використанням PowerSHAPE (на прикладі другого моляра верхньої щелепи)...	86
3.2.3	Розроблення моделі брекета в PowerSHAPE.....	89
3.2.4	Методика використання макросів і бібліотеки PowerSolution DOTNetOLE для інтеграції з CAD-системою PowerSHAPE .....	90
3.2.5	Проектування поверхонь на основі карти висот.....	96
3.3	Розроблення програмної системи для автоматизованого проектування брекет-системи .....	99
3.3.1	Логічна модель програмної системи .....	99
3.3.2	Етапи роботи програмної системи .....	101
3.3.3	Розроблення математичної моделі числового розрахунку методом скінченних елементів задачі проектування виробів складної геометрії .....	105
	Висновки за розділом 3.....	110
	Список використаних джерел .....	110
	<b>РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>112</b>
4.1	Вдосконалення конструкцій штампового оснащення, засобів автоматизації і пресового обладнання для реалізації процесу гвинтової екструзії .....	112
4.2	Модель процесу деформування за схемою реверсивного зсуву...	117
4.2.1	Проектування штампового оснащення для моделювання операцій ПД заготовок методом реверсивного зсуву.....	118
4.2.2	Розроблення САПР оснащення для інтенсивного пластичного деформування заготовок за схемою реверсивного зсуву.....	121
4.3	Моделювання процесу деформування за схемою реверсивного зсуву в САЕ-системі ABAQUS.....	124
4.4	Моделювання напруженого стану штампового оснащення.....	135
4.5	Експериментальні дослідження процесу деформування за схемою реверсивного зсуву.....	136
4.5.1	Результати експериментальних досліджень за схемою реверсивного зсуву .....	138
	Висновки за розділом 4.....	141
	Список використаних джерел.....	142
	<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ САПР ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ІНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ З CAD/CAM/CAE-СИСТЕМАМИ .....</b>	<b>145</b>
5.1	Моделювання і проектування процесу й оснащення для пластичного деформування поковок деталі «U-імплантат» із застосуванням схем ПД .....	145
5.1.1	Проектування геометричної моделі деталі «U-імплантат» і поковки для її виготовлення.....	145

5.1.2	Проектування оснащення для виготовлення деталі «U-імплантат».....	153
5.1.3	Розрахунок послідовних етапів пластичного деформування поковки .....	154
5.2	Моделювання осаджування заготовки «U-імплантат» в САЕ-системі ABAQUS.....	157
5.2.1	Генерація скрипту для моделювання технологічного процесу пластичного деформування й оснащення за допомогою САЕ-систем.....	157
5.2.2	Дослідження процесу пластичного деформування заготовок і оснащення за допомогою САПР .....	167
5.3	Розроблення САПР для проектування технологічного процесу механічного оброблення виробу на основі інтеграції з PowerMILL.....	176
5.3.1	Загальні відомості про підхід до створення САПР для технологічного процесу оброблення виробу .....	176
5.3.2	Створення технологічного процесу механічного оброблення виробу .....	176
5.3.3	Опис процесу реалізації програмного продукту .....	178
5.4	Моделювання тертя в рухливих вузлах імплантатів і візуалізація коливального процесу в машині тертя .....	183
5.5	Застосування шаблону «Адаптер» для інтеграції програмних продуктів у комплексну САПР .....	192
5.6	Синтез конструкцій збірного різального інструменту на основі морфологічного аналізу й синтезу .....	193
	Висновки за розділом 5.....	198
	Список використаних джерел.....	199
	<b>РОЗДІЛ 6. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕННЯ DSL .....</b>	<b>201</b>
6.1	Методика розроблення DSL для підсистем спеціалізованих САПР на основі онтології предметної області й приклад її реалізації в програмно-методичному комплексі.....	201
6.1.1	Концептуальний аналіз процесу інформаційного моделювання предметної області при проектуванні бази даних.....	202
6.1.2	Розроблення предметно-орієнтованої мови для автоматизації процесу проектування баз даних .....	206
6.1.3	Розроблення програмно-методичного комплексу для проектування баз даних з використанням предметно-орієнтованої мови.....	217
6.2	Вибір технологій динамічного обміну даними для компонентів інтегрованої САПР у багатозадачних операційних системах.....	227
	Висновки за розділом 6.....	233
	Список використаних джерел.....	235
	Висновки.....	238

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних  
ВСП – візуальне структурне проектування  
ІАД – інтелектуальний аналіз даних  
ІПД – інтенсивне пластичне деформування  
ІСАПР – інтегровані системи автоматизованого проектування  
МСЕ – метод скінченних елементів  
НДС – напружено-деформований стан  
ОМТ – оброблення металів тиском  
ООП – об'єктно-орієнтований підхід  
ООПС – об'єктно-орієнтована програмна система  
ПМК – програмно-методичний комплекс  
ПрП – проблемний простір  
ПС – програмна система  
САПР – системи автоматизованого проектування  
СППР – система підтримки прийняття рішень  
ТП – технологічний процес  
ТПр – технологічний простір  
ЧПК – числове програмне керування  
ІІ (AI) – штучний інтелект  
API – Application Programming Interface  
CASE – Computer-Aided Software Engineering  
CAD – Computer-Aided Design  
CAE – Computer Aided Engineering  
CAM – Computer Aided Manufacturing  
CORBA – Common Object Request Broker Architecture  
COM – Component Object Model  
COM/DCOM – Component Object Model / Distributed COM  
DSL – Domain-Specific programming Language, Domain-Specific Language  
SADT – Structured Analysis and Design Technique  
SOA (COA) – Service-Oriented Architecture  
XML – Extensible Markup Language

## ВСТУП

Розвиток техніки постійно вимагає нових рішень: конструктивних, технологічних, організаційних та ін. Процес створення нового є творчим, інноваційним, причому творчість – це теж процес, який досліджується з різних точок зору. Ефективність нових технічних рішень підтримує інтерес до сучасних системних методів, методик, алгоритмів вирішення завдань автоматизації процесу проектування, включаючи і вирішення творчих завдань створення нових конструкцій і технологічних процесів. Для автоматизованого вирішення різних завдань в галузі конструкторського проектування і розроблення технологічних процесів застосовують інтегровані системи автоматизованого проектування (ІСАПР), які забезпечують реалізацію наскрізного процесу проектування, виготовлення і контролю якості виробів.

У якості об'єкта конструкторського проектування і розроблення технологічних процесів розглянуто імплантати різного типу, оскільки вони вимагають індивідуального підходу до проектування у кожному окремому випадку, мають складну геометричну форму, тому для їх проектування і виготовлення потрібні засоби автоматизації. Матеріали, які застосовують для імплантатів, повинні мати високі фізико-механічні властивості, що підвищує актуальність розроблення сучасних методів підвищення якості структури матеріалу імплантатів і, відповідно, методів проектування і моделювання процесів оброблення таких матеріалів. До таких методів, зокрема, відносяться технології оброблення тиском з інтенсифікацією зсувних пластичних деформацій (ПД). Застосування цих методів дозволяє отримати об'ємні заготовки для імплантатів з субмікроструктурною структурою.

У наш час для автоматизації різних етапів життєвого циклу виробів у промисловості широко застосовуються САД/САЕ/САМ-системи. Створення інтегрованих САПР на базі промислових САД/САЕ/САМ-систем дозволяє не лише автоматизувати проектування виробів, але і виконувати оптимізацію технологічних процесів отримання деталей (заготовок) з необхідними властивостями шляхом вибору раціональних параметрів конструкцій і технологічних процесів. При цьому інтеграція з САД-системами на основі параметричних моделей оснащення дозволяє автоматизувати створення типових конструкцій і мінімізувати витрати часу при формуванні геометричних моделей для моделювання процесів ПД. Інтеграція з САЕ-системами дозволяє оптимізувати вибір технологічних параметрів процесів ПД шляхом визначення найбільш раціональних маршрутів деформування заготовок і параметрів процесу. Інтеграція з САМ-системами за

допомогою спеціалізованих бібліотек функцій і параметричних макросів дає можливість оптимізувати технологічні переходи механічного оброблення деталей.

Автоматизація процесу проектування в САПР, реалізація пошукового конструювання і розвиток інформаційної підтримки цього процесу вимагають вирішення ряду проблем, які пов'язані з великим об'ємом інформаційних фондів, накопичених на підприємстві (ДСТУ, нормалей, технічних рішень), різноманітністю існуючих підходів до класифікацій у різних предметних областях, складністю постановки завдань автоматизованого пошуку нових технічних рішень.

Для розширення пошукового поля при вирішенні різних технічних завдань застосовують різні методи пошукового конструювання, зокрема морфологічний аналіз, який ґрунтується на підборі можливих рішень для окремих частин завдання (так званих морфологічних ознаках, що характеризують пристрій) і наступному систематизованому отриманні (комбінуванні) і оцінюванні їх поєднань. Цей метод відноситься до евристичних методів вирішення творчих завдань. Для проведення морфологічного аналізу потрібне точне формулювання проблеми для такої системи. У результаті дається відповідь на більш загальне питання за допомогою пошуку варіантів окремих рішень, незалежно від того, що в початковому завданні йшлося тільки про одну конкретну систему.

Окрім розвитку методів вирішення удосконалюється і інформаційна база, що забезпечує підтримання творчого процесу. Це фонди фізичних і хімічних ефектів, прийомів усунення технічних протиріч, які містять накопичений досвід у різних галузях техніки і в цілому досвід вивчення різних об'єктів матеріального світу. Основне завдання створення інформаційної бази ефективних технічних рішень – узагальнення досвіду вчених і винахідників і формалізація його для загального використання. Вирішення цієї задачі вимагає використання системних методів структуризації, зберігання і використання інформації в різних предметних сферах.

Одним із можливих варіантів вирішення проблеми створення баз даних і знань для вирішення проектних завдань є використання онтологічного підходу. Онтології як своєрідні бази знань здатні накопичувати і структурувати інформацію, створюючи основу для автоматизованого оброблення цих знань. Крім того, розвиваються і методи автоматизованого виявлення цих знань при обробленні масивів накопиченої інформації (Data Mining). Ці методи дозволяють забезпечити інтелектуальну підтримку вирішення творчих завдань. Однак ефективність пошуку, в тому числі евристичного, інформації в базах даних і Інтернеті визначається якістю методів створення і використання онтологій.

Перспективи використання онтологій пов'язані з низкою їх властивостей, які забезпечують ефективну інформаційну підтримку процесів створення нових технічних рішень з точки зору формалізації знань і їх автоматизованого оброблення: класифікацій типових завдань створення нових технічних рішень (онтологія завдань) як основи розпізнавання і виділення типових конфліктних ситуацій; формалізації у вигляді онтології загальних принципів вирішення задач, фізичних і хімічних явищ і ефектів, фондів, прийомів усунення технічних протиріч; алгоритмів розв'язання (онтологія процесів розв'язання); пошуку і аналізу аналогів (онтологія технічних рішень); наявність загального підходу і спеціалізованих мов формалізованого опису знань (rdf, owl); наявність програмних систем для складання, візуалізації і онтологічного пошуку.

Із застосуванням онтологічного підходу можуть бути реалізовані важливі для САПР завдання, зокрема завдання пошуку аналогів конструктивних рішень у базах САД-проектів на основі онтології геометричних фігур і онтології геометричних примітивів САД-системи, завдання пошуку типових структур, пов'язаних понять (шаблонів проектування – design patterns) в онтологіях різних предметних областей, щоб використати їх при проектуванні програмних систем, САПР, структура яких не має єдиного рішення. Розвиваються і нові напрями застосування САПР: для топологічної оптимізації, моделювання адитивних технологій, підвищення інтелектуальності процесу проектування й інші.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ CAD/CAM/CAE-СИСТЕМ

### 1.1 Виділення основних функцій CAD/CAM/CAE-систем

В умовах гострої конкурентної боротьби і необхідності зниження собівартості продукції, що випускається, промислові підприємства вимушені скорочувати витрати на етапах проектування виробів, підготовки конструкторської і технологічної документації і безпосередньо на виробництві.

Застосування сучасних CAD/CAM/CAE-систем і способів оптимізації конструкцій дозволяє істотно підвищити якість продукції, яка випускається, понизити її собівартість і виготовляти конструктивно складні наукоємні вироби з високими робітничими характеристиками за рахунок ефективного опрацювання на етапі підготовки проекту [1; 2].

Сьогодні створено нові класи матеріалів для низки галузей промисловості, у тому числі із субмікрокристалічною (СМК) і наноструктурами, які мають набір унікальних фізико-механічних властивостей, які невластиві матеріалам, отриманим класичними методами оброблення. Це також вимагає розвитку методів автоматизації проектування і моделювання поведінки таких матеріалів при навантаженні конструкцій з їх використанням. Такі матеріали дозволяють зменшити вагу готового виробу або ж значно посилити його слабкі вузли і таким чином підвищити конкурентоздатність продукції, що випускається. У наш час заготовки із СМК-структурою знаходять своє застосування в медицині, авіабудуванні, автомобілебудуванні і хімічній промисловості. Проте обмеження розмірів отримуваних заготовок із СМК-структурою не дозволяють широко застосовувати їх у багатьох галузях промисловості. Технологічно складними є також процеси отримання заготовок із СМК-структурою, тому комп'ютеризоване моделювання процесів отримання таких матеріалів є актуальним, оскільки знижує витрати на експериментальне дослідження. Великий інтерес також викликають можливості адитивних технологій для отримання деталей складної геометрії з широкого спектру порошкових матеріалів, для яких також необхідно розвивати автоматизоване проектування і моделювання їх поведінки в різних умовах експлуатації.

Підготовка твердотільних моделей складок і деталей здійснюється в промислових CAD-системах (Computer Aided Design), що стало де-факто стандартом сучасної організації конструкторської діяльності більшості підприємств. Формування конструкторської документації на основі спроектованої моделі виробу дозволяє в найкоротші терміни перейти від конструкторських робіт зі створення і розрахунку виробу до розроблення техноло-



гічного процесу його отримання. Підтримання поширених форматів твердотільних моделей дозволяє здійснювати обмін між відомими промисловими САД-системами і виконувати такі графічні функції:

- формування просторової геометричної моделі окремих деталей і складок;
- формування окремих видів, розрізів і перерізів деталей і складок;
- формування документації згідно зі стандартами замовника із зазначенням усього переліку технічною інформації;
- обмін на основі загальноприйнятих стандартів з іншими компонентами САПР, у тому числі з САМ/САЕ-системами.

З метою автоматизації проектування типових конструкцій конструктору вигідно використати параметричні моделі, що дозволяє скоротити терміни проектування і уникнути помилок, пов'язаних з людським чинником. Формування твердотільних моделей на основі параметричних моделей реалізують у вигляді додаткових модулів, створюваних на основі інтерфейсів САД-систем.

У САЕ-системі на основі спроектованих твердотільних моделей виконується аналіз властивостей міцності виробів. У процесі моделювання аналізується вплив різних конструктивних і технологічних чинників на розподіл напруги в об'ємі деталі і на підставі отриманих результатів виконується вибір найбільш раціонального співвідношення параметрів.

Для виконання завдань моделювання різних процесів послідовність робіт у САЕ-системі включає такі етапи:

- препроцесінг, який складається з низки кроків: поставлення завдання і формування вхідних даних, таких як створення розрахункової моделі, вибір кроків розрахунку, призначення початкових і граничних умов, умов на контакт з іншими деталями або інструментом;
- розрахунок моделі;
- постпроцесінг, пов'язаний з візуалізацією і аналізом результатів розрахунку в різному поданні.

При моделюванні принципово нових конструкцій поставлення завдання і аналіз результатів можуть тривати великий проміжок часу усього процесу моделювання. Автоматизація побудови розрахункової моделі і аналізу результатів полягає в розробленні допоміжних модулів для САЕ-систем, що підтримують програмні інтерфейси [3; 4], зокрема інтеграцію з САД-системами для побудови геометричних моделей виробів.

Після побудови геометричних моделей і проведення інженерного аналізу розробляють технологічні режими автоматизованого виробництва деталей конструкції із застосуванням САМ-систем.

Для вирішення складних завдань розробляють комплексні САПР на базі САД/САМ/САЕ-систем з відкритими інтерфейсами. Типовий склад комплексної САПР наведено на рис. 1.1.

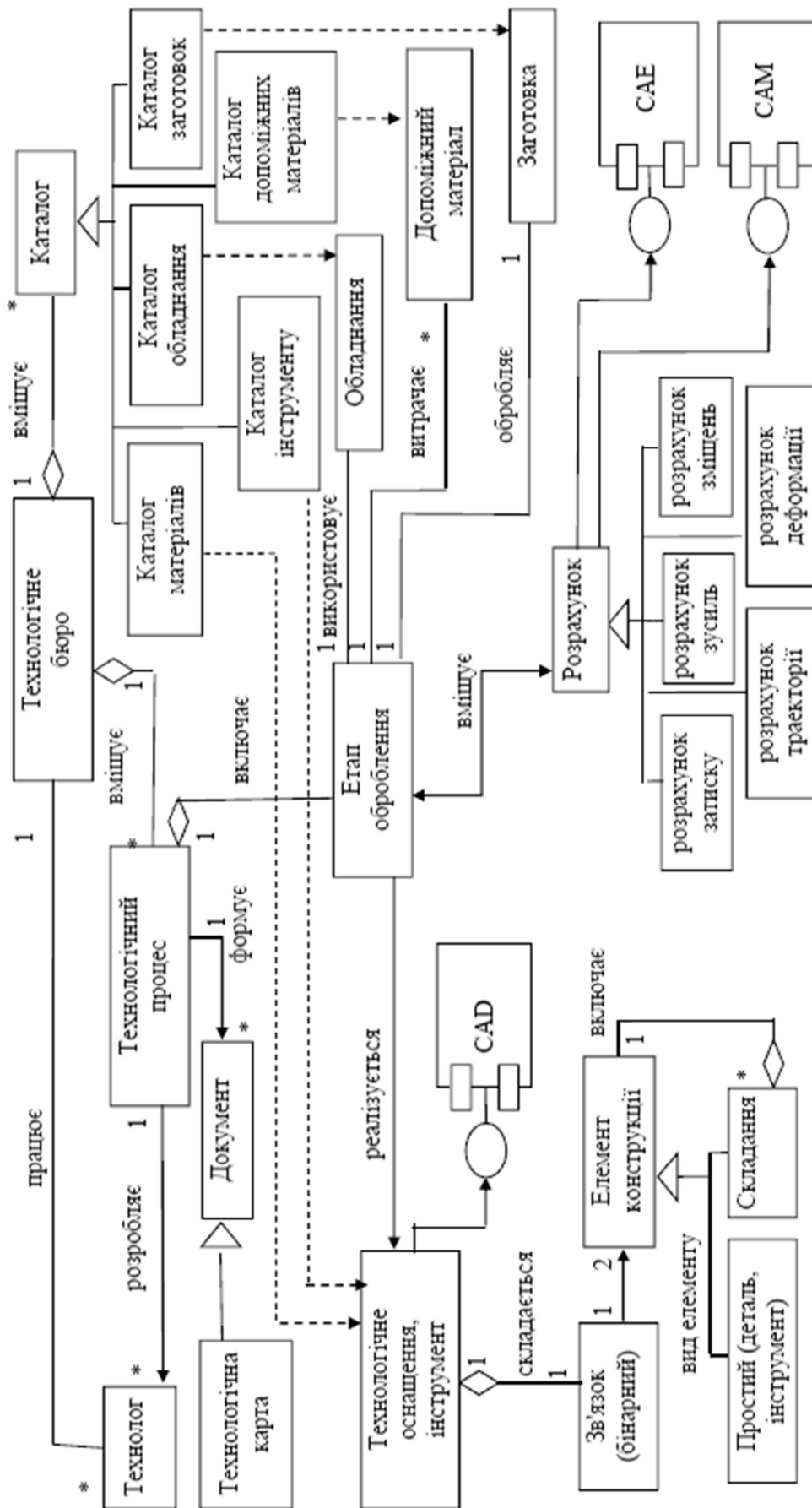


Рисунок 1.1 – Структура комплексної САПР на базі CAD/CAM/CAE-систем

До складних технологічних завдань відносять проектування і виробництво медичних імплантатів, оскільки до таких виробів ставляться підвищені вимоги з низки критеріїв. У той же час отримання імплантатів за допомогою сучасних методів оброблення матеріалів, таких як ПД, створює умови для розширення спектру імплантатів, що випускаються. Використання нових матеріалів при цьому дозволить отримати переваги і в інших сферах застосування.

Технологічні процеси виготовлення імплантатів залежать від їх призначення, геометричної форми, розмірів і використовуваного матеріалу. Розвиток технології проектування і виготовлення імплантатів спостерігається у низці напрямів:

- створення або поліпшення характеристик використовуваних матеріалів;
- автоматизація методів отримання і оброблення інформації про дефекти кісток, на яких будуть встановлені імплантати;
- автоматизація проектування моделей імплантатів і технологічного оснащення для їх отримання;
- аналіз умов функціонування імплантатів для забезпечення заданої міцності і жорсткості конструкції;
- автоматизація проектування технологічного процесу виготовлення шаблонів для подальшого формування складної поверхні імплантату, якщо деталі виготовляються з плоскої листової заготовки;
- автоматизоване виготовлення необхідних елементів на станках з ЧПК або методом 3D-друку і контроль точності їх виготовлення;
- вдосконалення технології формоутворення заготовок пластичним деформуванням з точки зору універсальності процесу і точності отримання заданої геометрії імплантатів.

Вирішення цих питань вимагає участі фахівців у різних предметних областях, передусім медичних працівників, спеціалістів у галузі інформаційних технологій проектування і різних видів оброблення металів.

Томографія дозволяє отримати об'ємну модель кісток людини для аналізу їх стану і висновку про необхідність протезування. Лікар вибирає вид, місце установа і форму імплантату з урахуванням наявного досвіду протезування, вживаних методик, матеріалів і завдань протезування, а також анатомічних особливостей пацієнта. Ця інформація є початковою для конструктора, що виконує розроблення конструкції в CAD-системі і проекту імплантату, а також технологічного оснащення, інструменту для його виготовлення. Основна задача підготовчого етапу – розроблення формалізованого завдання на проектування для конструктора і технолога.

Послідовні етапи наскрізного технологічного процесу проектування і виготовлення імплантатів наведено на рис. 1.2. Початковою для проектування є інформація про наявність дефектів у пацієнта, отримана в результаті проведення діагностики захворювання або травми методом томографії.

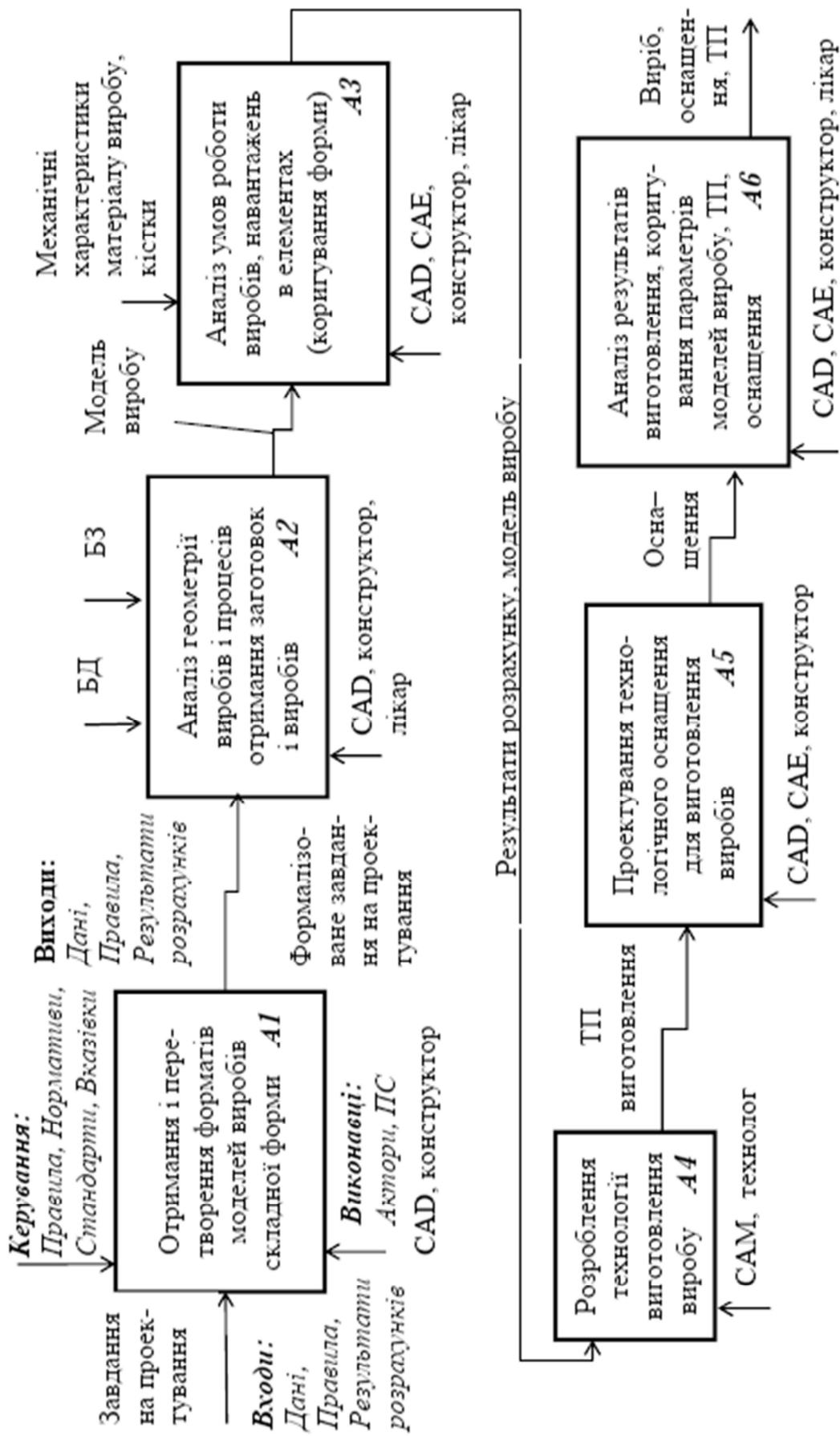


Рисунок 1.2 – Структурно-функціональна діаграма процесу проектування і виготовлення імплантатів

Одним із найбільш перспективних процесів виготовлення імплантів для щелепно-лицьової хірургії є формозмінення плоскої листової заготовки для отримання необхідної просторової форми. Сьогодні випускається досить широка номенклатура листових заготовок з медичного титану VT-0, із яких виготовляють листові імпланти.

Листові заготовки для імплантів відносно дешеві, але номенклатура орієнтована на ручні процеси надання їм потрібної просторової форми. Тому імпланти зі складною просторовою геометрією не завжди відповідають вимогам щодо жорсткості конструкції, що істотно знижує їхню якість. Виготовлення таких імплантів з об'ємних заготовок значно дорожче, особливо при використанні титану, підданого попередньому обробленню методами ПД. Враховуючи розміри листових заготовок для імплантів, актуальним є отримання їх із сучасних матеріалів методами оброблення тиском із застосуванням універсального технологічного устаткування і оснащення. Завданням цього етапу є вибір способу отримання заготовок і імплантів, прийняттого за технологічною складністю і наявністю устаткування.

Слід зазначити, що форма і розміри імплантату визначаються не лише анатомією пацієнта, але й умовами експлуатації. Наприклад, після установлення на щелепі відбувається часткове відновлення її робочих функцій для забезпечення харчування пацієнта. Тому необхідний аналіз міцності імплантату в умовах навантаження при жуванні і забезпечення якісної фіксації імплантату на кістках щелепи. Місце установлення і характеристики міцності кістки є важливим обмежувальним чинником при проектуванні. Найбільш ефективним для вирішення цього завдання є застосування методу скінчених елементів (МСЕ) і САЕ-систем, у яких він реалізований. При поставленні цього завдання потрібне залучення медичних працівників для коректного задавання початкових даних і їх аналізу. У результаті аналізу приймається погоджене рішення про конструкцію імплантату.

Технологічний процес виготовлення імплантату залежить не лише від його геометрії, але і наявності вихідних матеріалів, заготовок. Наприклад, при використанні титану, підданого ПД для підвищення міцності (при дотриманні заданого рівня пластичності), листові заготовки промисловістю не випускаються, тому отримання заготовок з необхідною товщиною і розмірами в кожному конкретному випадку є також актуальним завданням.

Отримання плоскої заготовки з обробленням по товщині може бути виконане на верстаті з ЧПК, що вимагає використання САМ-систем для розроблення керівної програми, але такий процес економічно не вигідний. При виготовленні імплантату просторової форми шляхом пластичного деформування з листа потрібне отримання розгортки для визначення форми контуру заготовки, тому це завдання потребує окремого вивчення із застосуванням САД/САЕ-систем. У будь-якому разі по контуру заготовки потрібний технологічний припуск з подальшим видаленням у відхід.

Проектування технологічного оснащення здійснюється з урахуванням універсальності процесу виготовлення імплантатів. Надання заготовці імплантату об'ємної форми можливе шляхом деформування поліуретаном на матриці-шаблоні. Цей спосіб найбільш універсальний, оскільки потрібен тільки один робочий інструмент, що визначає форму імплантату. Формоутворення заготовки здійснюється в універсальних контейнерах, габарити яких утворюють дискретний ряд.

Шаблон для формоутворення заготовки проектується у вигляді матриці з порожниною або пуансона залежно від форми заготовки. Проектування його виконується з урахуванням геометрії деталі і пружинення матеріалу заготовки в процесі деформування. Таким чином, форма шаблону відрізняється від поверхні імплантату, що необхідно враховувати при проектуванні шаблону. Після проектування і виготовлення імплантату потрібний аналіз результатів процесу для подальшого вдосконалення технології протезування і виявлення функцій для розвитку можливостей підсистем інтегрованої САПР.

## **1.2 Оптимізація конструктивних і технологічних рішень**

Процес проектування деталей і вузлів конструкцій за допомогою сучасних CAD/CAE-систем дозволяє досягти істотного зниження витрат часу на процес підготовки конструкторської документації, проте виконати в прийнятні терміни аналіз великого набору типових конструкцій для пошуку оптимального рішення не є можливим. Багато сучасних систем проектування і інженерного аналізу включають модулі структурної (топологічної) оптимізації для певних типів конструкцій, наприклад будівельних конструкцій. Такі системи дозволяють отримати оптимальну топологію конструкції, виконавши серію розрахунків на міцність відповідно до заданих критеріїв оптимальності.

Робота з удосконалення проектування оптимальних за конструкцією виробів ведеться у напрямі розвитку ІСАПР на базі CAD/CAE-систем із застосуванням топологічної оптимізації для різних конструктивних рішень [5], умов експлуатації [6], нових адитивних технологій [7] і особливостей поведінки матеріалів.

Пошук раціональних конструктивних рішень для типових конструкцій може ґрунтуватися на використанні статистичних даних з літератури або накопиченого досвіду в структурному підрозділі підприємства. Для пошуку раціонального рішення при проектуванні принципово нової конструкції статистичні дані малоприменні, й у такому разі все визначається досвідом проектування подібних конструкцій. Тому за відсутності досвіду розроблення принципово нових конструкцій високою є вірогідність здійснення концептуальних помилок. Застосування сучасних інформаційних технологій, таких як експертні системи, штучний інтелект і інтелекту-

альний аналіз даних, дозволить проектувальникові без достатнього досвіду якісно виконувати проектування принципово нових конструкцій.

Багатьма зарубіжними вченими розробляються підходи до обґрунтування інформативності параметрів процесів і об'єктів аналізу для ефективного оброблення даних і отримання правил і залежностей, а також розвиваються методи Machine Learning, Artificial Intelligence і Data Science (гібридні методи статистичного оброблення і Machine Learning) і практичне їх застосування. Вирішуються питання теоретичного і практичного обґрунтування подання і використання знань (інженерії знань) в організаційно-технічних системах. Розвивається також онтологічний підхід до подання знань і розроблення інформаційних систем на основі онтологій предметних областей і методів оброблення даних. Удосконалюються методи концептуального моделювання предметних областей діяльності і технологічних процесів, що дозволяє проектувати бази даних і знань і ефективно реалізувати їх у складі інформаційних технологій і систем [8–10].

Проектування штампового оснащення і технологічних процесів пов'язане з варіюванням групи конструктивних параметрів, що дозволяє знайти оптимальне їх співвідношення для отримання раціонального рішення. Визначення оптимальних конструктивних і технологічних параметрів досягається структурною і параметричною оптимізацією.

Проте методи типу топологічної оптимізації стосовно технологічних операцій, наприклад ПД, не використовуються. Складність завдань моделювання процесу отримання наноструктурованих заготовок з нових матеріалів із застосуванням ПД визначається істотною нелінійністю процесу, тензорним характером подання інформації про напружено-деформований стан (НДС), необхідністю застосування відсутніх в САЕ-системах моделей поведінки матеріалів зі складною реологією, зокрема порошкових, в умовах великих пластичних деформувань, відсутністю алгоритмів (правил) вибору послідовності операцій у маршруті оброблення заготовок. При створенні САПР для застосування рішень, аналізу даних використовуються методи інженерії знань і ІАД, методи оптимізації. Низка методів оптимізації, що ґрунтуються на контролі НДС скінчених елементів [5–7], для моделювання маршрутів ПД заготовок не прийнятні, тому що потрібне застосування інших критеріїв оптимізації, пов'язаних з рівномірністю накопиченої деформації, інтенсивністю зсувних деформацій, мірою використання ресурсу пластичності, рівнем гідростатичного тиску. Універсальні САПР в галузі розроблення оптимальних технологічних процесів практично відсутні.

### **1.3 Програмні інтерфейси CAD/CAM/CAE-систем для інтеграції їх компонентів у комплексну САПР**

Для створення комплексних САПР, які включають CAD/CAM/CAE-системи, можуть використовуватися такі можливості:

- безпосередня інтеграція CAD/CAM/CAE-систем між собою. Як правило, це можливо для CAD/CAM/CAE-систем, підтримуваних одним розробником. Наприклад, компанія Dassault Systemes – розробник таких пакетів, як SolidWorks, ABAQUS і CATIA, пропонує готові компоненти для інтеграції цих пакетів між собою [11];

- підтримання відкритих інтерфейсів для створення додаткових модулів на різних мовах програмування, наприклад C++ і Python для CAE-системи ABAQUS [12];

- підтримання набору функцій для взаємодії з CAD/CAM/CAE-системами. Наприклад, API (Application Programming Interface) прикладного програмування SolidWorks – універсальна платформа для інтеграції інженерних і бізнес-додатків, що дозволяє розробляти призначені для користувача програми САПР на основі цієї CAD-системи [2]. Для інтеграції з CAD-системою PowerSHAPE застосовується бібліотека API-функцій PowerSolutionDOTNetOLE, розроблена фірмою Delcam. Вона дозволяє інтегруватися з використанням будь-якої .NET-мови [2].

#### **1.4 Проектування технологічних процесів інтенсивного пластичного деформування**

Одним із напрямів оброблення нових матеріалів є застосування методів ІПД для створення наноструктурованих матеріалів з компактних і порошкових металів і сплавів, які мають унікальні властивості і можуть бути застосовані для виготовлення лопаток авіаційних двигунів, медичних імплантатів і інших відповідальних деталей [13]. Проте через невеликі розміри отримуваних заготовок, ручні операції і високі питомі зусилля на інструмент методи ІПД поки що знаходять обмежене застосування в авіабудуванні, медицині й інших галузях.

При проектуванні процесів ІПД важливу роль грає їхня специфіка, яка полягає у багатоетапному процесі деформування для вирівнювання властивостей в об'ємі заготовки, при цьому форма заготовки після кожної операції, як правило, залишається незмінною або змінюється несуттєво. При багатоетапному деформуванні між операціями виконують повороти заготовки в просторі, домагаючись найбільш рівномірного деформованого стану в її об'ємі. Визначення послідовності поворотів (маршруту) виконується емпіричним шляхом на основі аналізу деформованого стану і експериментального вибору маршруту деформування. Наприклад, для процесу ІПД методом рівноканального кутового пресування, при якому заготовку обробляють до 10–15 разів, у результаті багаторічних досліджень виділено найбільш оптимальні маршрути деформування. Проектування нових процесів ІПД є складним у зв'язку з необхідністю визначення раціонального маршруту деформування. Відоме спеціалізоване програмне забезпечення



для моделювання класичних процесів ОМТ малоприсадибне для моделювання процесів ПД, оскільки погано підходить для моделювання багатостадійних процесів з урахуванням деформованого стану з розподілом накопичених деформацій в об'ємі заготовок.

Складність експериментальних досліджень процесів пластичного деформування і високі навантаження на інструмент при реалізації ПД вимагають розвитку методів моделювання НДС при обробленні заготовок. Теоретичні дослідження процесів оброблення металів тиском (ОМТ), які супроводжуються великими пластичними деформаціями і руйнуванням матеріалу заготовки, можливі за допомогою числових методів, у т. ч. методом скінченних елементів. Складність моделювання процесів ПД ставить досить високі вимоги до розрахункових систем. Застосування МСЕ для розрахунків процесів ОМТ і, зокрема, ПД є трудомістким завданням, тому доцільним є використання САЕ-систем для автоматизації розрахунків НДС при обробленні заготовок. Загальною проблемою є необхідність включення в процес МСЕ аналізу НДС в САЕ-системах розроблених користувачами моделей поведінки нових матеріалів у процесі пластичного деформування [14].

Крім того, застосування одного з методів ПД приводить, як правило, до нерівномірності властивостей за об'ємом заготовки [6; 15]. Оскільки вибір послідовності операцій і їх параметрів здійснюється на емпіричному рівні, то якісно вирішити цю задачу без САЕ-системи практично не можливо. При використанні декількох методів ПД проблема ще більше ускладнюється.

САЕ-системи прийнято ділити на спеціалізовані (DEFORM, Forge, QFORM та ін.) і універсальні (ANSYS, ABAQUS [11], Hyper Works та ін.). У низці універсальних систем не реалізовано різні реологічні моделі пластичності, ряд спеціалізованих САЕ-систем призначений для окремих операцій ОМТ (наприклад, для листового штампування) і не придатний для операцій об'ємного оброблення тиском. Тому потрібне обґрунтування застосування САЕ-систем для розрахунку процесів ОМТ. Зокрема, САЕ-системи повинні давати можливість поетапно вивчати деформацію заготовки у двовимірних 2d (плоских) і тривимірних 3d (об'ємних) моделях з можливістю аналізу НДС у будь-якій частині заготовки.

Моделювання процесів ПД супроводжується значними переміщеннями вузлів сітки моделі, що призводить до сильних її спотворень з подальшим звироднінням елементів. Для правильного моделювання процесів пластичного деформування потрібне застосування адаптивних сіток і Arbitrary Lagrangian – Eulerian (ALE) – вирішувача, що дозволяє отримувати високоякісну сітку впродовж усього процесу моделювання, що супроводжується великими ступенями деформації [17]. Таким чином, вибір САЕ-системи пов'язаний з її можливостями для урахування особливостей процесів пластичного деформування: реалізація автоматичного перерозбиття сітки скінченних елементів, підтримання різних видів сіток.

Точність розрахунку залежить від коректності складання моделі, що вимагає ухвалення рішень щодо задавання низки чинників і визначення параметрів деформування:

- 1) геометричні параметри і форма інструменту і заготовки;
- 2) умови (схема) навантаження заготовки;
- 3) властивості матеріалу заготовки і інструменту, спосіб їх задавання;
- 4) початкові і граничні умови, включаючи тертя між поверхнями;
- 5) вид сітки (форма і кількість вузлів у сітці);
- 6) температурний режим;
- 7) зміна щільності сітки за об'ємом заготовки (градієнтні сітки);
- 8) використання перерозбиття сітки для коректного розрахунку значень пластичних деформацій із заданою точністю (застосування адаптивних сіток);
- 9) багатоетапне деформування (необхідність урахування накопичених деформацій і їх розподілу за об'ємом заготовки на кожному етапі).

З урахуванням виділених вимог до CAE-систем при проектуванні нових процесів ПД найбільший інтерес становить CAE-система ABAQUS, яка забезпечує широкі можливості забезпечення відповідності розрахунків експериментальним дослідженням при моделюванні різного інструменту та поведінки матеріалу заготовки, при комбінуванні різнорідних процесів деформування, а також завдяки відкритості системи і можливості розроблення додаткових модулів для автоматизації створення розрахункових моделей і аналізу результатів моделювання.

У CAE-системі ABAQUS закладено використання градієнтних сіток при дискретизації об'єму заготовки, що дозволяє, наприклад, врахувати наявність локалізації деформацій в окремих ділянках осередків пластичного деформування і понизити витрати ресурсів під час обчислення при збереженні точності розрахунків. Вид сітки і необхідна кількість вузлів для інструменту і заготовки в ABAQUS визначаються автоматично. При цьому можна змінити щільність вузлів у сітці для розрахункової моделі заготовок зі складною формою і наявністю перегинів.

## **1.5 Види і класифікація металевих імплантатів**

У сучасній медицині знаходять застосування методи відновлення функцій організму людини за допомогою імплантатів. Найбільш затребуваним є штучне забезпечення функцій опорно-рухового апарату пацієнта у випадках травм тазостегнових, колінних, ліктьових суглобів, а також використання протезів для відновлення відсутніх кінцівок. Окрім цього, імплантати знаходять широке застосування в щелепно-лицьовій хірургії при відновленні фрагментів черепної коробки тощо. Для виготовлення імплантатів використовуються різні матеріали, але найбільше поширення отримали неіржавкі сталі і сплави титану завдяки їх високим властивостям міцності, високій корозійній стійкості.

Провідні стоматологічні клініки світу виділяють імплантати за видами (рис. 1.3) [18–21]:

- ендосальні (внутрішньокісткові) імплантати, використовуються найчастіше. Діляться на підгрупи: коренеподібні, пластинчастої форми і комбінованої. Основний використовуваний матеріал таких імплантатів – сплави титану. Найчастіше імплантат складається з кореневої частини, шийки і голівки, що виступає в порожнину;

- крізькісткові імплантати застосують при частковій атрофії нижньої щелепи. Виконуються об'ємної форми з титанових сплавів;

- піднадкісткові імплантати застосовуються у випадках, коли неможливо виконати внутрішньокісткову імплантацію, за виглядом – металевий каркас з опорами, що виступають у порожнину рота. Часто виконуються з титанових сплавів.

За видом матеріалів, які використовуються у виготовленні імплантатів, їх підрозділяють на такі групи:

- біоактивні – металеві імплантати з покриттям із гідроксиапатиту або трикальційфосфатної кераміки;

- біотолерантні імплантати з неіржавкої сталі або хром-кобальтового сплаву;

- біоінертні імплантати виготовляються з біоінертних матеріалів: титану, нікеліду титану, цирконію, золота, корундової кераміки, скловуглецю – і є максимально переважальними за технологічністю і взаємодією з тканинами.

Стоматологічні імплантати розділяють за формою. Найбільш затребувані імплантати гвинтові, трубчасті й циліндричні. Така форма імплантату може бути отримана операціями ОМТ або механооброблення. Менш поширені імплантати пластинчастої форми у вигляді каркасів або накладок для фіксації пошкоджених ділянок верхньої або нижньої щелепи. Для отримання імплантату такої форми можуть використовуватися методи гнуття або витягування заготовки з листового матеріалу. Практично всі метали і їх сплави, вживані в стоматології, добре обробляються операціями ОМТ і механооброблення. Добре відомо, що методи ПД не є остаточною операцією оброблення, а використовуються для поліпшення структури металу з підвищенням фізико-механічних властивостей. Для надання остаточної форми виробів після оброблення процесами ПД використовуються операції ОМТ або механооброблення. Таким чином, використання комбінованого оброблення процесами ПД і операціями ОМТ дозволяє підвищити властивості міцності імплантатів і використати чистіші, але менш міцні матеріали при виготовленні виробів для стоматології.

Низка досліджень процесів ПД показали, що наявність пір у матеріалі заготовки дозволяє поліпшити біосумісність з тканинами людини й у низці випадків уникнути відторгнення імплантату.

Останніми роками особливу увагу дослідники приділяють проблемам біосумісності матеріалів, які використовуються при виготовленні імплантатів.

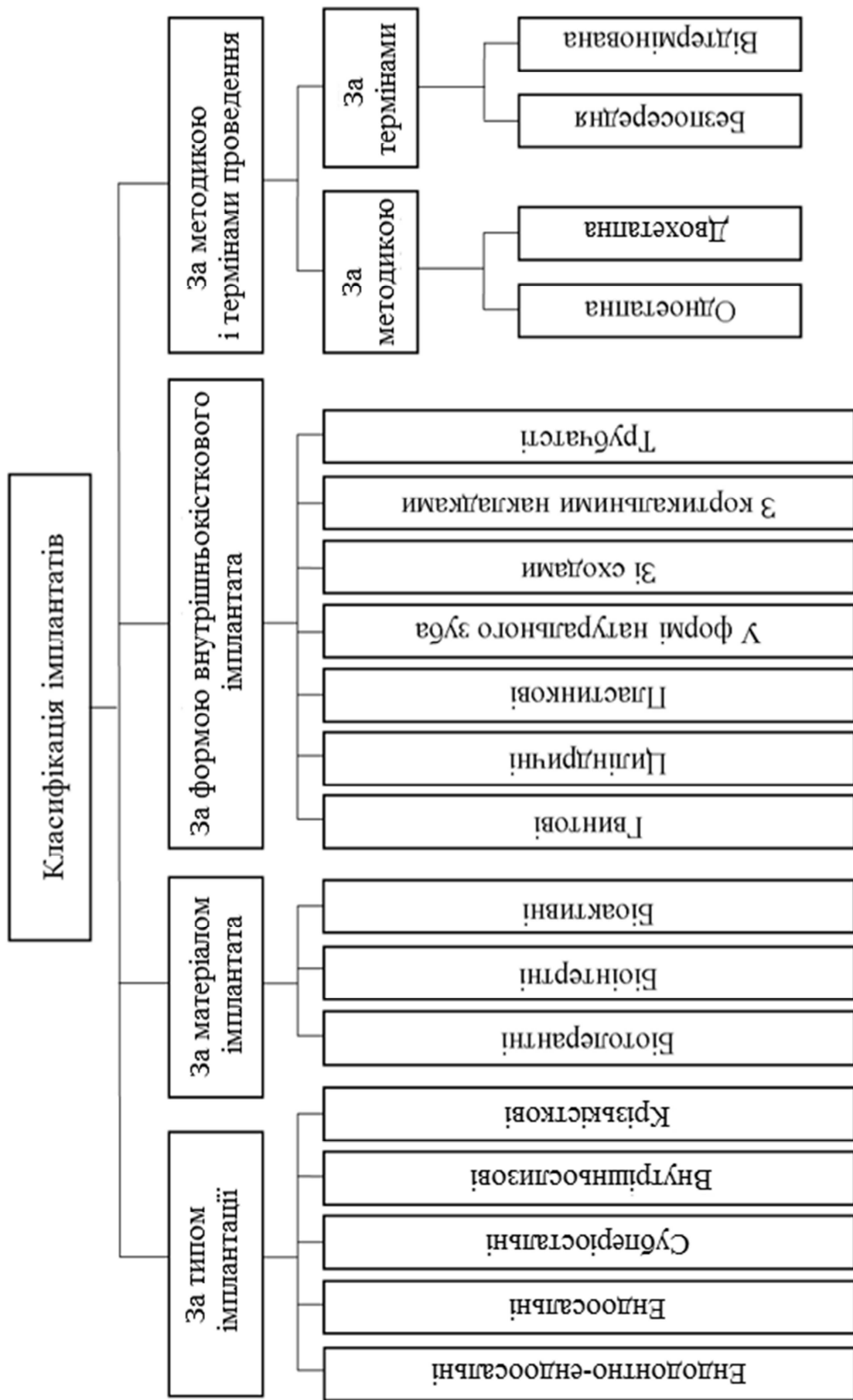
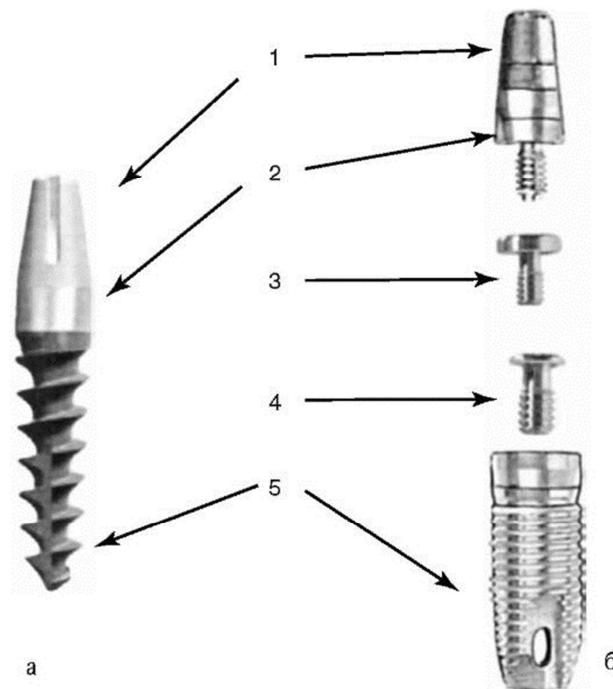


Рисунок 1.3 – Класифікація стоматологічних імплантів [18–21]

Під час проведених досліджень встановлено, що широко вживаний сплав титана ВТ6-0, що має високу міцність і корозійну стійкість, негативно впливає на організм людини і може викликати серйозні ускладнення через наявність у ньому легувальних елементів. Застосування такого сплаву для виготовлення штифтів передніх зубів викликане високою міцністю при невеликих розмірах імплантату, при цьому інші матеріали, що використовуються в стоматології, не можуть забезпечити необхідну міцність при невеликих розмірах.

Над вирішенням проблеми підвищення міцності титанових сплавів без легувальних елементів, таких як технічно чистий титан ВТ10, працюють багато дослідників. Одним із напрямів для підвищення міцності є інтенсивне пластичне деформування. Методи ІПД досить добре зарекомендували себе при виробництві деяких видів імплантатів, проте широке застосування їх обмежене через складність проектування виробів, отримуваних методами ІПД, і недостатнє промислове впровадження самих методів.

Розбірний гвинтовий імплантат коренеподібної форми наведено на рис. 1.4 [22].



*Рисунок 1.4 – Розбірний гвинтовий імплантат коренеподібної форми*

Враховуючи відмінності в конструкції та способах установлення імплантатів, розроблені і застосовуються різні методики і терміни імплантації. Для кращої біосумісності встановлюваних імплантатів з пористою кістковою тканиною на їх поверхню наносять пористе покриття з розмірами пір 0,05–0,25 мм. Таке покриття також призначене для кращої фіксації імплантату в щелепі пацієнта. Наявність мікропор з наскрізною проникністю в ряді титанових сплавів дозволяє обходитися без нанесення поверхневого покриття.

Розглянемо також класифікацію спінальних імплантатів [23]:

- педикулярні гвинти - імплантуються в тіла хребців на 2 і 3 рівнях, виготовляються зі сплавів титану;

- різьбові кейджі – використовуються у поєднанні із задньою фіксацією, виконуються часто з карбонового волокна;

- сферичні протези міжхребцевого диска - мають дуже просту будову у вигляді кулі, як матеріал використовується силікон і карбонове волокно;

- механічні протези міжхребцевого диска – це пристрій з металевими замикальними пластинками, які безпосередньо або через допоміжний пристрій кріпляться до тіл хребців, складаються з центрального ядра, зробленого з відносно м'якого полімеру, оточеного жорсткішим кільцевим полімером і замикальними пластинами;

- фізіологічні протези міжхребцевих дисків – призначені для відновлення функції диска за допомогою поглинання і віддачі рідини в міжхребцевому просторі, використовується ядро з гідрогелю або поліуретану;

- тотальні протези міжхребцевого диска (рис. 1.5), що імітують суглобову функцію диска і поновлюють його нормальний фізіологічний рух, як матеріал використовуються неіржавкі сталі або сплав кобальт-хром-молібден;

- протези пульпозного ядра – призначені для відновлення висоти і функції пульпозного ядра, що полягає в поглинанні/виділенні рідини і переміщенні рідини між тілами хребців, матеріал – волокна полімеру, волокна тканинного поліетилену;

- спейсери (міжостисті імплантати), що встановлюються способом пункції (через мікророзріз) між остистими відростками хребців для розширення міжхребетного отвору і простору навколо нервового корінця. Встановлення імплантату дозволяє знизити навантаження на міжхребцевий диск і зупинити поступне звуження хребетного каналу. Виготовляються з рентгенпрозорого біополімера або сплавів титану.

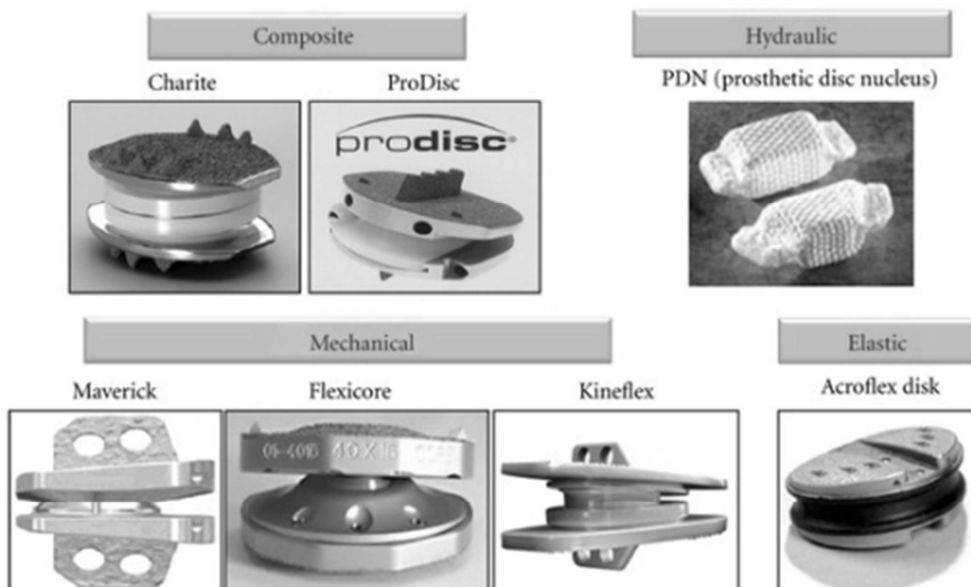
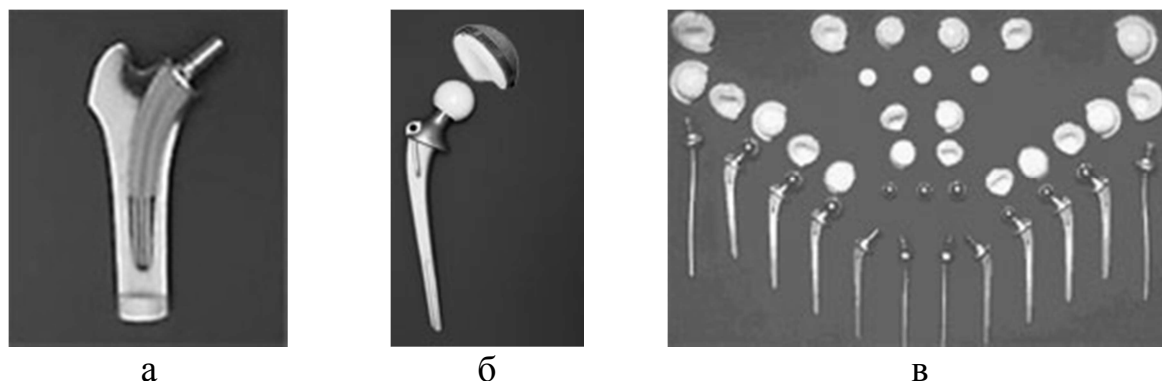


Рисунок 1.5 – Тотальні протези міжхребцевого диска

Імпланти для опорно-рухового апарату людини діляться на протези для тазостегнового (рис. 1.6, а, б, в) і колінного суглобів [24].



*Рисунок 1.6 – Протези тазостегнового суглоба*

Установлення протезів тазостегнового суглоба знайшло широке застосування в ортопедичній практиці при лікуванні захворювань вертлюжної западини. При установленні протеза вивчаються індивідуальні особливості пацієнта і приймається рішення про вибір певного типу протеза. Залежно від ситуації можуть застосовуватися такі типи протезів [25]:

1. Безцементні (рис. 1.6, а). Основна частина такого протеза виготовляється з титанового сплаву, а контактні поверхні покриваються спеціальною речовиною гідроксилапатитом, який за своєю структурою подібен до кісткової тканини, що забезпечує швидке вrostання кісткової тканини в протез. Цей тип протеза підходить не всім пацієнтам і обмежений у застосуванні.

2. Частково цементовані протези (рис. 1.6, б). Відрізняються тим, що тільки частина цементується: або вертлюжна западина, або протез діяфізу.

3. Цементовані протези (рис. 1.6, в). Є найбільш масовими типами імплантів тазостегнового суглоба завдяки більш універсальному способу установлення, який менше залежить від стану кісткової тканини пацієнта, і великому типорозмірному ряду самого протеза, що дає можливість підібрати його під розмір кісток пацієнта. Також важливу роль грає можливість прикладення навантажень практично відразу після його установлення, на відміну від інших типів протезів, де потрібно період дотримання часткового навантаження на протез, поки не станеться зрощування з кістковою тканиною.

Проведений аналіз найбільш затребуваних медичних імплантів показав загальну тенденцію у використанні сплавів титану як основного матеріалу для їх виготовлення. Дослідження у сфері біосумісності виробів із титану з організмом людини приводить до необхідності застосування чистих титанових сплавів без легувальних елементів. Проте у низці випадків застосування технічно чистого титану марки ВТ1-0 (Grade 2) не можливе через низький рівень його міцності. Актуальним завданням є розроб-

лення технологічних процесів для підвищення властивостей міцності титану марки VT1-0 за допомогою комбінованого оброблення та змінення структури металу, що поєднує оброблення методами ПД і надання остаточної форми готового виробу операціями ОМТ з подальшим чистовим механообробленням.

Складна форма імплантатів, яка необхідна для точної відповідності пошкодженим фрагментам організму пацієнтів, вимагає використання сучасних CAD/CAE/CAM-систем при проектуванні моделей імплантатів, а для підвищення ефективності розроблення необхідне об'єднання їх в інтегровані САПР.

## **1.6 Системний підхід як основа сучасної теорії проектування**

Ефективність процесу проектування будь-якого технічного об'єкта багато в чому визначається на етапі попереднього генерування і відбору ідей. З урахуванням постійно зростаючих вимог до виробів потрібне постійне вдосконалення і заміна конструкцій. При цьому первинні етапи процесу проектування найменше автоматизовані у зв'язку зі слабкою формалізацією евристичних процедур, які застосовуються для створення нових технічних рішень.

Забезпечити належний рівень показників якості можна тільки на основі системного підходу, що враховує всі аспекти експлуатації і проектування об'єкта. Тому принципи системного підходу складають основу сучасної теорії проектування. Важливим є саме поняття системи як сукупності елементів, пов'язаних між собою і із довкіллям, склад і структура якої визначається метою її функціонування [26].

Слід врахувати, що скорочення термінів створення сучасних складних технічних об'єктів може бути досягнуте лише при автоматизації усіх етапів проектування. Особливо це стосується пошукового, творчого проектування, що є основою етапу розроблення технічної пропозиції.

Теорія проектування почала інтенсивно розроблятися з середини ХХ століття спочатку стосовно військової техніки, а потім і інших технічних пристроїв. Велику роль зіграли роботи П. Хілла [27], Дж. К. Джонса [28], Д. Діксона [29], І. Мюллера [30], В. Хубки [31] та інших [32], які присвячені загальним принципам проектування нових виробів. Свої підходи розвивали такі дослідники, як Г. С. Альтшуллер [33], Г. Я. Буш [34], М. Ф. Заріпов [35], А. І. Половінкін [36] та інші. Найбільш відомі роботи були узагальнені Дж. К. Джонсом, а також А. М. Дворянкіним, А. И. Половінкіним, В. А. Камаєвим, А. В. Чусом, В. М. Данченко, В. П. Биковим, А. В. Андрейчиковим, Е. Едером [28; 36; 37; 38; 39; 40]. Серед сучасних українських дослідників необхідно відзначити В. М. Одріна і Ю. М. Кузнєцова [41; 42].



Різні дослідники виділяють понад 50 методів формалізації і активізації творчості, які можуть бути класифіковані залежно від їх суті і застосування [28; 29; 30; 31; 36; 38; 40; 41; 42]. Зокрема, Дж. К. Джонс підрозділяє методи за концепціями, покладеними в їх основу: проектувальник – «чорний ящик», проектувальник – «прозорий ящик» і проектувальник – «самоорганізовувана система» [28]. Перша концепція припускає, що проектувальник не може пояснити процедуру пошуку отриманого ним вдалого рішення, друга – що він у змозі усвідомити свої дії, третя розглядає проектувальника як деяку систему зі зворотним зв'язком, яка виконує вибір і коригування стратегії пошуку нових технічних рішень залежно від конкретної ситуації.

Виходячи з аналізу літератури, найбільш логічними видаються підходи до класифікації методів інженерної творчості, викладені в роботах А. І. Половінкіна [36] і Ю. М. Кузнецова [42]. А. І. Половінкін за характером вирішуваних завдань умовно розділяє методи на дві основні групи: евристичні методи технічної творчості і комп'ютерні методи пошукового конструювання. Перші призначені для вирішення завдань технічної творчості і ґрунтуються на використанні досить чітко описаних методик і правил пошуку нових технічних рішень, другі використовуються для пошукового конструювання і ґрунтуються на використанні автоматизованих методів рішення творчих інженерних завдань.

Ю. М. Кузнецов розбиває методи активізації творчості за видом стратегії пошуку на три основні групи:

1) системні (комбінаторні), спрямовані на послідовний перебір усіх можливих варіантів вирішення і ґрунтовані на аналізі структури і властивостей об'єкта (різні варіанти методів морфологічного аналізу і синтезу, матриці відкриття тощо);

2) асоціативні (психологічної активізації творчості), які передбачають активацію генерування ідей за рахунок психологічного подолання інерції мислення (мозковий штурм, методи гірлянд випадковостей і асоціацій, синектики тощо);

3) програмні (алгоритмічні), що забезпечують більш менш цілеспрямований рух до вирішення задачі шляхом виявлення і подолання технічних і фізичних протиріч у відомих об'єктах (бібліотека евристичних прийомів, алгоритми розв'язання винахідницьких задач (АРВЗ), функціонально-вартісний аналіз).

Останніми роками теорія проектування активно розвивалася у рамках теорії систем автоматизованого проектування і методології розроблення програмного забезпечення [38; 39; 43]. У галузі розроблення програмного забезпечення за півстоліття сталася велика еволюція: від «стихійного» програмування до структурного, а потім і до об'єктного підходу. У 90-ті роки ХХ сторіччя з'явився і отримав великий розвиток компонентний підхід [44]. Особливо слід зазначити CASE-технології (Computer Aided Software Engineering), які базуються на методологіях створення інформаційних систем і відповідних комплексах інтегрованих інструментальних засобів, орієнтованих на підтримання повного життєвого циклу інформаційних систем [45].

Цікавою є еволюція моделей життєвого циклу інформаційних систем [43; 46]. Каскадну схему, що характеризується послідовним виконанням етапів розроблення програмного забезпечення, змінила схема з проміжним контролем, що дозволяє за необхідності ітераційно повернутися на будь-який попередній рівень для внесення змін. Серйозним кроком вперед стала поява спіральної схеми, відповідно до якої програмне забезпечення створюється не відразу, а з використанням методу прототипування, що дозволило значно прискорити процес випуску версій інформаційних систем, зменшити вірогідність їх морального застарівання в процесі розроблення і, як результат, підвищити конкурентоздатність. Інтенсивний розвиток інтернет-технологій дав можливість ефективно використовувати актуальні бази знань при проектуванні технічних об'єктів [47]. Ці роботи можуть бути значною мірою поширені і на інші галузі проектування.

Як приклад можна розглянути розвиток процесу автоматизації проектування стосовно конструкцій різального інструменту. Розвиток отримали в основному роботи щодо спеціального інструменту, розрахунків складно-профільного інструменту, а також роботи, які направлені на оптимізацію параметрів конструкцій (роботи М. І. Юлікова [48], В. А. Гречишникова [49], Е. І. Сенькіна [50] та інших). Розвиток сучасних систем автоматизації конструювання і інженерних розрахунків дозволив значно скоротити час на проектні роботи, що привело до зміни методики проектування різального інструменту [51].

### **1.7 Етапи проектування промислового виробу (на прикладі різального інструменту)**

Системний підхід вимагає, щоб не лише об'єкт проектування, але і процес його створення був системою, досить повною для вирішення поставленої мети. Система проектування повинна включати ряд взаємопов'язаних етапів, починаючи із зародження ідеї і закінчуючи виробництвом і споживанням. У зазначених роботах наведено різні схеми процесу проектування. Зокрема, П. Хілл подає процес проектування як послідовність подій, при виконанні і аналізі яких можливий логічний розвиток конструкції. Процес проектування складається з окремих етапів, що дозволяють визначити фактичний стан розробки і подальший етап (рис. 1.7). У процесі вирішення завдань можливе повернення на попередні етапи для досягнення задовільного рівня рішення.

Г. Л. Хаєтом [26] розглядаються 3 групи етапів проектування: перед-проектний аналіз, проектування і випробування, впровадження у виробництво. Сучасний процес проектування передбачає генерування великої кількості ідей.

Виявлені рішення піддаються багатократному оцінюванню і відбору: спочатку на основі експертизи, потім за допомогою лабораторних випро-

бувань дослідних зразків і, нарешті, під час виробничих випробувань дослідно-промислової партії.

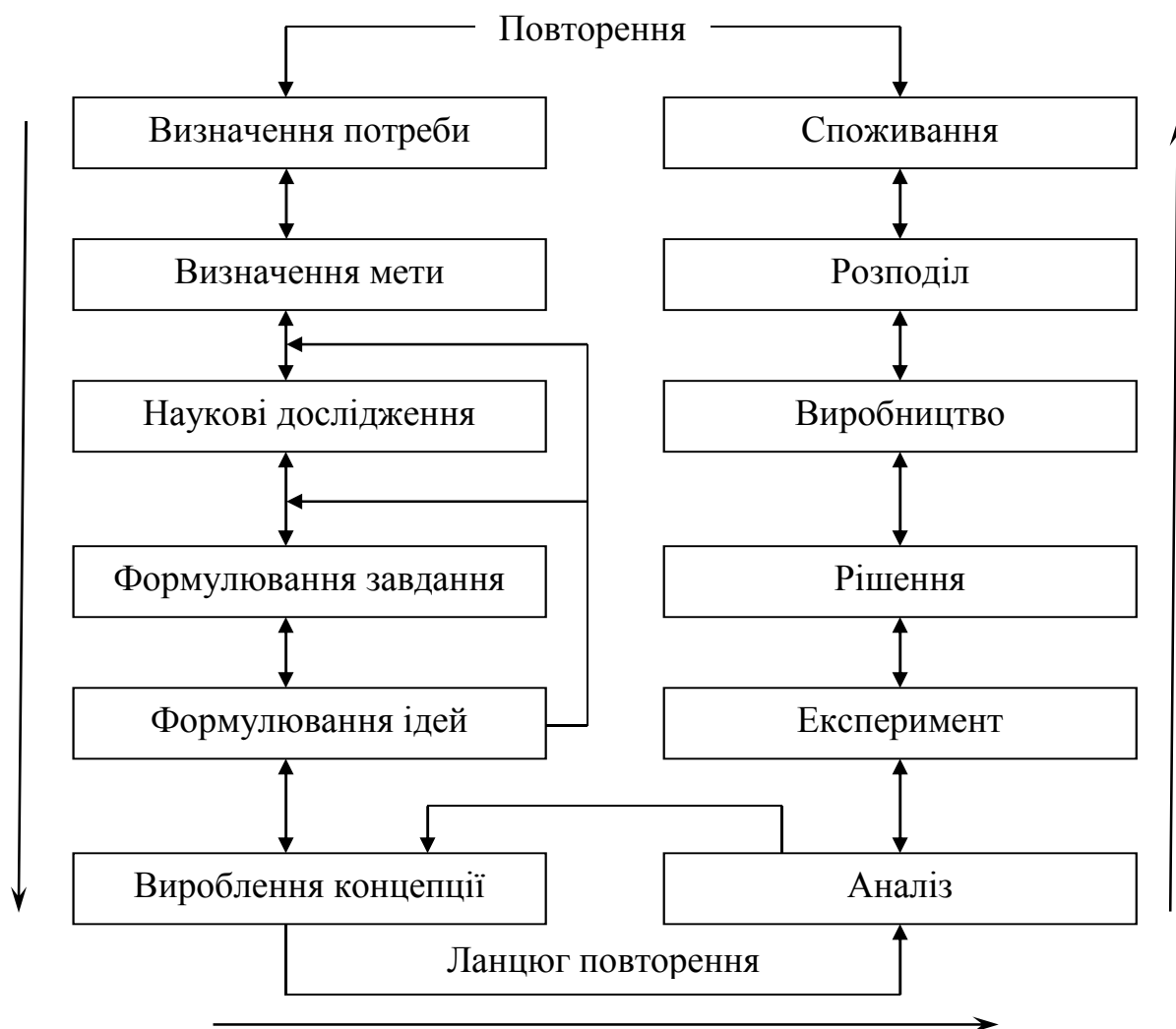


Рисунок 1.7 – Схема процесу проектування за П. Хіллом

Для практичного застосування потрібне розроблення методики оцінювання технічних рішень на кожному етапі роботи. Система проектування передбачає розроблення регламентів експлуатації, навчання персоналу, контроль за експлуатацією і відновлення проектування після освоєння. Таким чином, створюються умови, щоб процес створення нової техніки був безперервним.

Як вже відзначалося, системний підхід вимагає, щоб система проектування забезпечувала комплексність робіт, охоплення усіх аспектів, пов'язаних зі створенням нових конструкцій виробу. Тому велике значення має визначення етапів робіт і послідовності їх виконання.

Стосовно проектування інструменту з використанням концепцій і методології, які описані в роботах [26; 52; 53], можна намітити етапи роботи, показані на рис. 1.8. Вони характеризуються орієнтацією на автоматизацію проектування, застосування моделі відновлюваності інструменту,

а також на розгляд конкретних питань у предметній галузі, пов'язаних зі створенням ефективних конструкцій багатофункціонального інструменту. Інструмент у цьому разі проектувався для унікальних верстатів.



Рисунок 1.8 – Етапи системи проектування і їх методичне забезпечення (на прикладі різального інструменту)

## 1.8 Аналіз властивостей, які визначають якість проектного виробу

Процес проектування розпочинається з визначення потреби в створюваному об'єкті. Для цього потрібний аналіз умов експлуатації подібних за своїм функціональним призначенням об'єктів – функціональний маркетинг [24; 52; 53]. Такий аналіз може бути виконаний із застосуванням статистичного оброблення раніше зібраної інформації. Крім того, на подальших стадіях проектування потрібна довідкова інформація щодо існуючих конструктивних рішень, стандартизованих деталей і вузлів, властивостей матеріалів тощо.

Необхідна інформація може зберігатися у вигляді бази даних (БД). Під БД мається на увазі сукупність даних, що мають такі властивості, як інтегрованість, модульність, взаємозв'язок, незалежність їх опису від програм, що застосовуються [54].

Керування БД і забезпечення доступу до даних здійснюється за допомогою програмно-апаратного пакета – системи керування базою даних (СКБД). БД і СКБД складають основу банку даних. Банк даних визначають як систему інформаційних, математичних, програмних, мовних, організаційних і технічних засобів, призначених для централізованого накопичення і колективного багатоаспектного використання даних для отримання необхідної інформації [26]. Якщо розглядати банк даних як частину системи проектування, то він є інформаційною системою, що включає до свого складу комплекс спеціальних методів і засобів для підтримання динамічної інформаційної моделі предметної галузі [38].

При розробленні банку даних розрізняють два аспекти: інфологічний і датологічний. Перший вживається при розгляді питань смислового змісту даних, другий – їх фізичного подання. Подання інформації про предметну галузь у прийнятному для користувача вигляді і незалежному від конкретної СКБД здійснюється за допомогою інфологічної моделі [54], що є початковою як при використанні, так і при проектуванні банку даних (рис. 1.9). Конкретні завдання, що вирішуються або окремими програмами, або однією загальною, визначаються зовнішніми інфологічними моделями. Останні, у свою чергу, виражаються у вигляді структурованих даних з іменами і форматами полів – зовнішніх датологічних моделей. Модель БД, що повністю охоплює увесь вміст і прийняте логічне подання, визначається як концептуальна модель даних.

Для забезпечення відносної незалежності операцій зберігання і оброблення даних від технічних засобів зазвичай використовуються СКБД. Цьому відповідає внутрішня модель даних як сукупність збережуваних файлів з відомою структурою і методами доступу.

У подібній трирівневій архітектурі банку цих СКБД реалізує такі відображення: «Зовнішня модель ↔ концептуальна модель ↔ внутрішня модель ↔ фізична база даних».

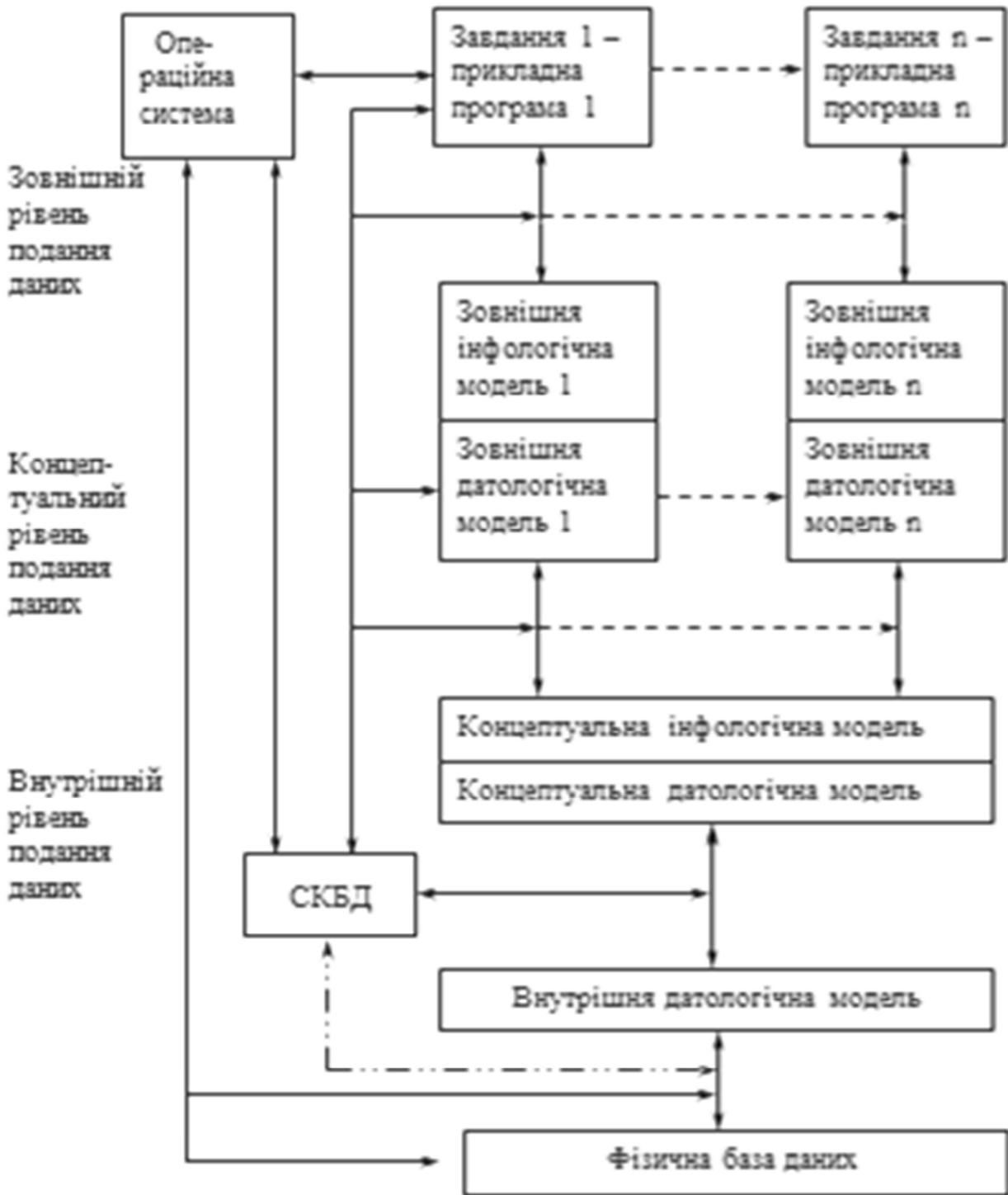


Рисунок 1.9 – Архітектура банку даних

На початковому етапі проектування металорізальних інструментів також виконується аналіз середовища їх функціонування. Це вимагає оперативного використання великої кількості статистичних даних. Важливим завданням є отримання початкових математичних моделей показників надійності, що визначають цільові функції для оптимізації систем інструменту і режимів експлуатації, систем «Людина – технологія – середовище», а також математичний аналіз таких моделей [70; 71]. Для ефективної експлуатації інструменту важливим є вибір прецедентів металооб-

роблення для певних умов, прикладів оброблення на різних заводах деталей, близьких до тієї, для якої необхідно розробити технологію. Ці завдання можуть бути вирішені з використанням системного банку механооброблення.

Узагальнену структуру системного банку металооброблення наведено на рис. 1.10 [55].

Зібрана інформація згрупована за методами отримання:

- 1) моментних спостережень;
- 2) тривалих спостережень;
- 3) за допомогою експертизи;
- 4) вивченням стану інструмента після відмови;
- 5) вивченням документів про експлуатацію інструмента.

Інформація всередині кожного основного модуля підрозділяється на модулі нижчого рівня:

- а) технологічні, функціональні характеристики;
- б) економічні, маркетингові характеристики;
- в) характеристики, безпосередньо пов'язані з верстатником.

Дані банку даних для проектування інструмента були зібрані на 34 підприємствах 7 галузей промисловості: важке машинобудування, енергетичне і атомне машинобудування, електротехнічна промисловість, важке верстатобудування, чорна металургія, хімічне машинобудування, загальне машинобудування. У цілому до бази даних внесено близько 4000 прецедентів металооброблення на верстатах токарної групи, включаючи карусельні, а також на горизонтально-розточувальних і подовжньо-фрезерних верстатах.

Збирання даних здійснювалося методами моментних і тривалих спостережень. Збирання даних методом моментних спостережень [26] полягав у тому, що спостерігач у випадковому порядку обходив верстати, на яких застосовувався досліджуваний інструмент, і фіксував дані про прецедент оброблення, з яким він зустрівся. Загалом, для фрез реєструвалися 39 параметрів. Метод тривалих спостережень полягав у безперервному спостереженні за процесом металооброблення, а також за процесами переналагоджування і обслуговування. Це дало можливість фіксувати значно більшу кількість параметрів.

Головним чином метод призначався для визначення характеристик надійності: періоду стійкості і кількості періодів стійкості, часу відновлення, а також їх залежності від різних факторів. Для фрез у цьому методі реєструвалися 52 параметри.

Дані, зібрані описаними методами, а також вивченням стану інструмента після відмови, отримані безпосередньо на виробництві, що дозволяє врахувати всю сукупність діючих чинників і якнайкраще відповідає ідеології системного підходу.

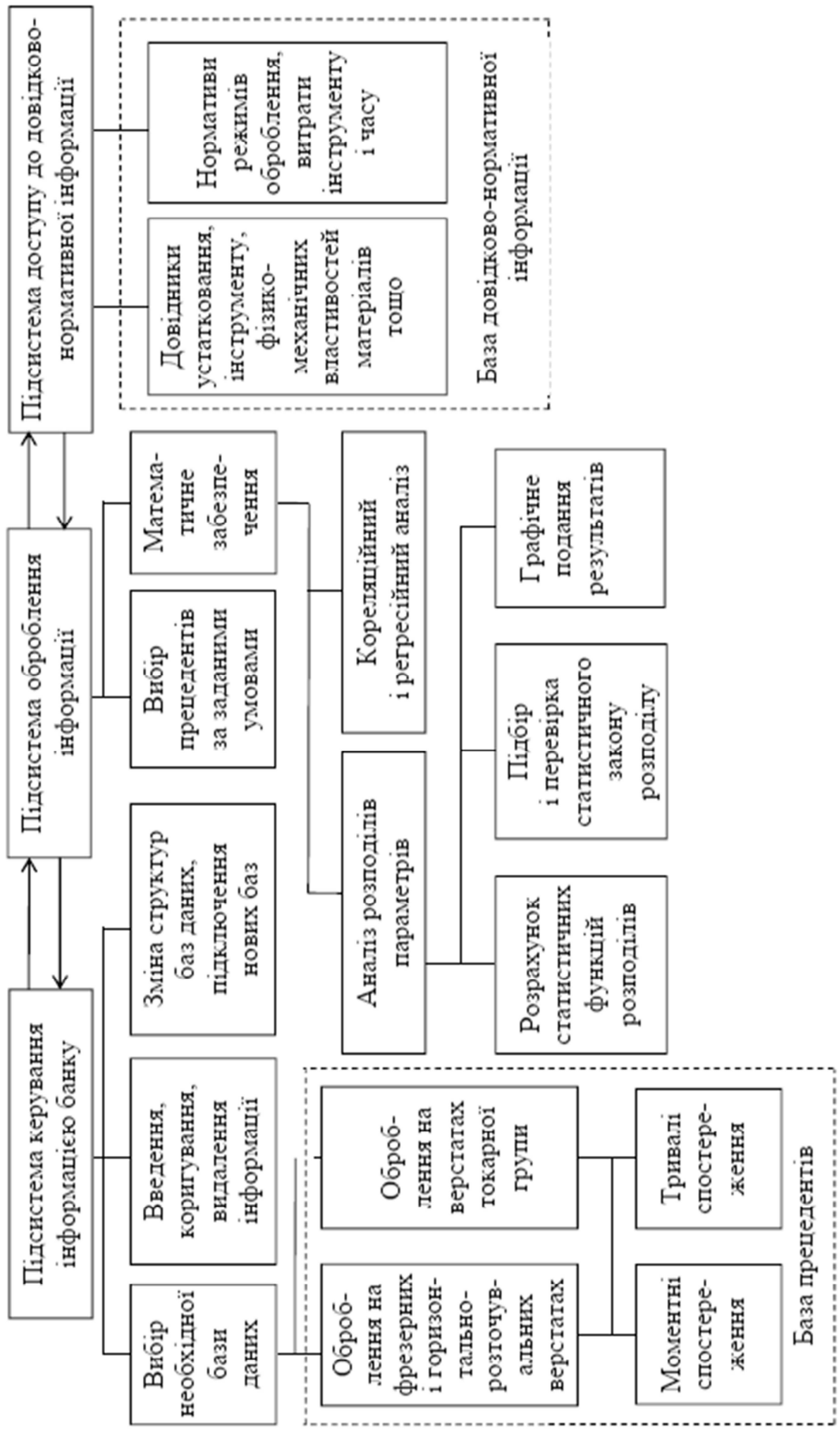


Рисунок 1.10 – Структура системного банку механооброблення



Програмне забезпечення автоматизованого проектування включає введення, перегляд і коригування даних за предметними галузями, підтримання файлів в актуальному стані, процедури контролю даних, виведення даних у різних форматах, формування запитів (образів вибірки) і видавання інформації за запитом, процедури статистичних розрахунків, організацію контекстно-залежної допомоги, навігації при виконання роботи в пакеті за допомогою системи меню, архівування основних баз даних, результати розрахунків, різні запити й інші сервісні процедури, а також функціональні процедури з формування й статистичного аналізування вибірки, кореляційного і регресійного аналізу для визначення початкових математичних моделей, необхідних при оптимізації номенклатури проектованого інструменту [55].

Для вибору інструмента і режимів оброблення деталей на основі досвіду різних підприємств використовувалася можливість формування пошукового образу користувачем. У результаті розрахунку видається інформація про наявні в базі прецеденти, у цьому прикладі – про фрезерне оброблення елементів деталей (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Прецеденти фрезерного оброблення деталей при заданих обмеженнях

О Б М Е Ж Е Н Н Я							
Габарити оброблюваної поверхні: довжина $L = 1000...3000$ мм, ширина $H=50...900$ мм							
Матеріал: Сталь4* НВ: 200...300 Тип станка: розточний							
ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПЕРЕХОДИ							
№	Завод	Назва деталі	$L$ , мм	$H$ , мм	Матеріал	НВ	Матеріал різ. частини
1	НКМЗ**	Ексцентрик	1715	550	40Х2МА	270	T5K10
2	НКМЗ	Ексцентрик	1715	550	40Х2МА	280	T5K10
3	КЗВВ	Вал	1150	70	40Х	220	T5K10
4	НКМЗ	Півмуфта	1280	300	40ХН2МА	280	T5K10
5	ОгнРМЗ	Траверса	1870	190	45Л	207	T5K10

№	$D$ , мм	$B$ , мм	$z$ , шт.	$t$ , мм	$S$ , мм/хв	$V$ , м/хв	$T$ , хв	$T_{\text{зам. інстр.}}$ , хв
1	250	150	8	10	270	110,0	22	5
2	250	230	8	10	160	125,7	265	5
3	70	70	3	5	80	88,0	35	
4	250	150	8	10	320	102,1	110	
5	250	190	14	3	240	78,6	240	

\* - марки сталей, що починаються з цифри «4»;

\*\*НКМЗ – Новокраматорський машинобудівний завод

Маркетинг ризального інструменту розпочинається з вивчення комплексу технологічних завдань підприємств-споживачів, функцій інструменту, що визначає потребу в кількості інструменту конкретних типорозмірів [26; 52; 53]. Інформація для вказаного комплексу завдань є  $n$ -вимірний технологічний простір (ТПр), що характеризується набором функціональних показників. Сегмент ТПр – мінімальна частина цього простору, для якого доцільно використати конкретні вид, розмір і тип конструкції інструмента. Декілька сегментів або один з них, які оптимальні для інструменту, проєктованого і планованого до випуску підприємством-виготівником, складають технологічну нішу.

Рівень якості за різними властивостями, як правило, не буває однаковим. Для вирішення певного завдання може бути виявлена відсутність інструменту, що випускається і має досить високий рівень якості за відповідною властивістю, і знайдена технологічна ніша для інструменту цього виготівника. Визначення структури технологічної ніші й ринку інструменту, що відповідає їй, означає сегментацію відповідних областей. Геометрична форма сегмента залежно від кількості параметрів є прямокутником, паралелепіпедом або має деяку  $n$ -вимірну фігуру з обмеженнями у вигляді постійних значень параметрів.

Місткість ніші може бути оцінена, наприклад, трудомісткістю оброблення у верстатогодинах або працегодинах. На рис. 1.11 показано щільність розподілу  $f(B)$  ширини фрезерування  $B$  у міліметрах за даними, зібраними на заводах м. Краматорська. Цьому процесу може бути поставлена у відповідність щільність розподілу діаметрів торцевих фрез  $D$  у міліметрах (рис. 1.12).

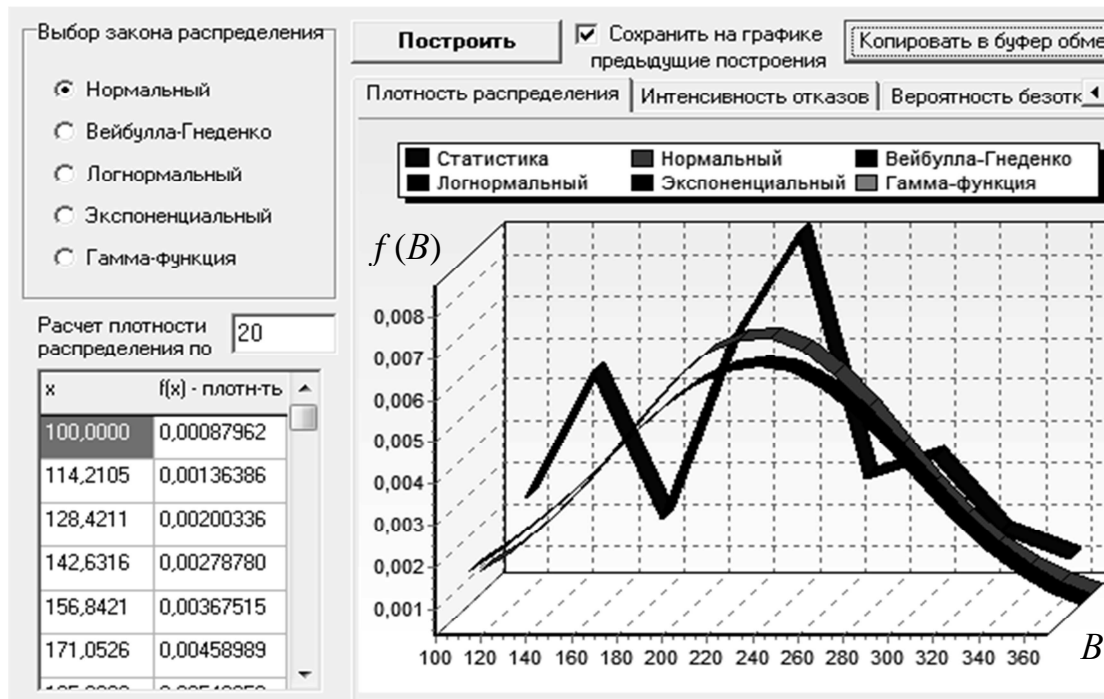


Рисунок 1.11 – Щільність розподілу ширини фрезерування при обробленні сталей

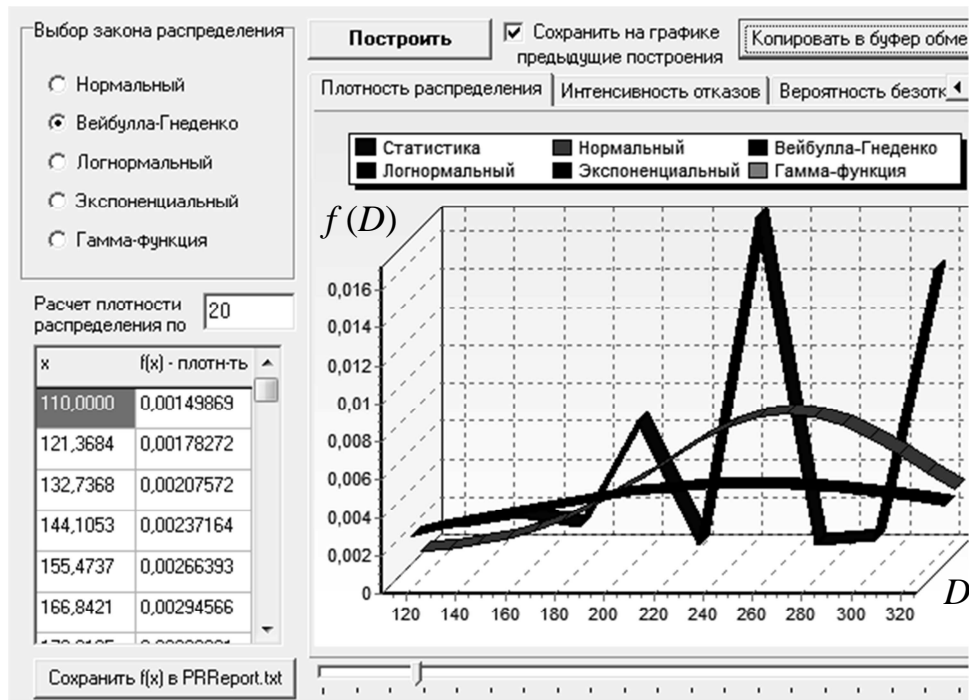


Рисунок 1.12 – Щільність розподілу діаметрів торцевих фрез при обробленні сталей

Для кількісного аналізу необхідно встановити вид закону розподілу. Найчастіше емпіричні дані доволі адекватно описуються законами розподілу Вейбула-Гнеденко і нормальним законом розподілу. Але за певних умов адекватнішими є логарифмічно-нормальний закон і гамма-розподіл. З діаграм видно, що найчастіше ширина фрезерування знаходиться в діапазоні 220...250 мм. Також дуже поширеним є діапазон ширини фрезерування в межах 130...160 мм. Також є певна кореляція з діаметрами фрез. Так, найбільше поширення на важких верстатах мають фрези діаметром 200, 250 і 315 мм.

Для вибору схеми різання, розмірів різальної частини і конструкції інструмента важливу інформацію дають розподіли припусків і глибин різання в процесі оброблення, оскільки глибина визначає довжину різального леза, а також навантаження на інструмент.

На рис. 1.13 і 1.14 наведено щільність розподілу припусків і глибин різання  $T$  і  $t$ , відповідно, у міліметрах при фрезеруванні торцевими фрезами [56]. Вибірка значень припусків склала 268 прецедентів, глибин різання – 329. При цьому емпіричні дані за припусками адекватно описуються розподілом Вейбула-Гнеденко. На графіку видимий певний «стрибок» великих припусків у діапазоні від 45 до 50 мм. Глибина різання в основному не перевищує 10 мм. Звідси можна зробити висновок, що навіть з урахуванням необхідності декількох проходів для першого з них є істотна потреба у збільшенні глибини різання.

У реальних умовах не може бути повністю вільного ТПр. Типовий випадок – це функціонування старого інструмента, якість якого вже перестає задовольняти споживача.

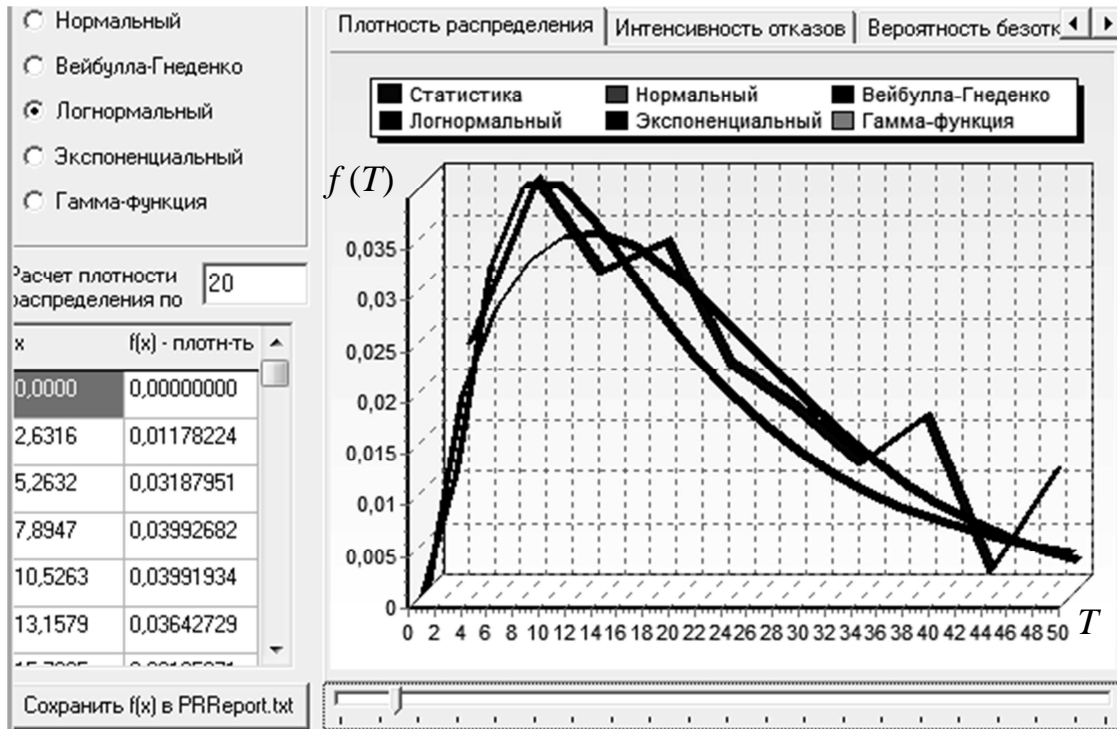


Рисунок 1.13 – Щільність розподілу припусків при фрезеруванні сталей



Рисунок 1.14 – Щільність розподілу глибин різання при фрезеруванні сталей

З'являються нові інструменти, але їм поки що не вдається зайняти увесь ТПр. Частина технологічного простору, що залишилася, можна вважати вільною. Місткість технологічного простору при заданому значенні цього параметра характеризується щільністю розподілу  $f(t)$  – диференціальною функцією, а місткість ТПр у діапазоні – інтегральною функцією розподілу  $F(t)$ .

Вказані функції визначають у частках одиниці або в натуральному вираженні:

$$F_{a-b}(t) = \int_a^b f(t) dt Q, \quad (1.1)$$

де  $a-b$  – діапазон параметра, що розглядається;

$Q$  – загальна місткість технологічного простору.

Щоб уточнити місткість вільної частини ТПр для нових конструкцій інструменту, потрібний прогноз зміщення ніш. Іноді потрібен додатковий аналіз для підтвердження наявності вільної частини ТПр і хоча б евристичного оцінювання її об'єму. Показано, що для інструменту вільною є частина ТПр для великих глибин різання. Проте глибини для нового інструменту вибиратимуться не такими, якими вони були раніше, а залежно від припуску й необхідної точності оброблення.

Оцінювання різального інструменту, як і будь-якого об'єкта, виконується на основі прийнятого критерію якості. Якість – міра відповідності характеристик об'єкта вимогам (система стандартів ISO 9000), що ставляться до нього. Кваліметрія різального інструменту [26] ґрунтується на загальних засадах кваліметрії [57].

Якість різального інструменту визначається сукупністю властивостей, що обумовлюють придатність інструменту до процесу різання із забезпеченням заданих форм, розмірів і шорсткості поверхонь деталі при певній продуктивності й матеріальних витратах. Кількісні характеристики властивостей продукції, що розглядаються стосовно певних умов її створення, експлуатації або споживання, є показниками якості [58]. Якість інструменту як промислової продукції може бути подана комплексним критерієм, склад якого може змінюватися залежно від виду інструмента і режиму його експлуатації.

Оцінювання якості різального інструменту розпочинається з побудови блок-схеми і потім – дерева якості [26]. Таке подання дозволяє врахувати ієрархію властивостей і їх досить складні взаємозв'язки (рис. 1.15). Для забезпечення можливості кількісного аналізу властивостей шляхом експертного оцінювання систему властивостей рекомендується подати у вигляді дерева, залишивши найбільш важливі властивості нижнього рівня [58]. При побудові дерева кожна властивість обумовлює разом з властивостями цього рівня тільки одну з властивостей попереднього (верхнього) рівня ієрархії і, у свою чергу, обумовлюється певними властивостями подальшого (нижнього) рівня.

При конкретних розробках з метою зменшення кількості властивостей, що враховуються, деякі з них можуть бути подані як обмежувальні. Наприклад, патентний захист можна подати обмежувальною властивістю, тому що без нього постановка інструмента на серійне виробництво неможлива. Ієрархічну систему властивостей, що визначають якість збірних торцевих фрез великих діаметрів, подано на рис. 1.16.

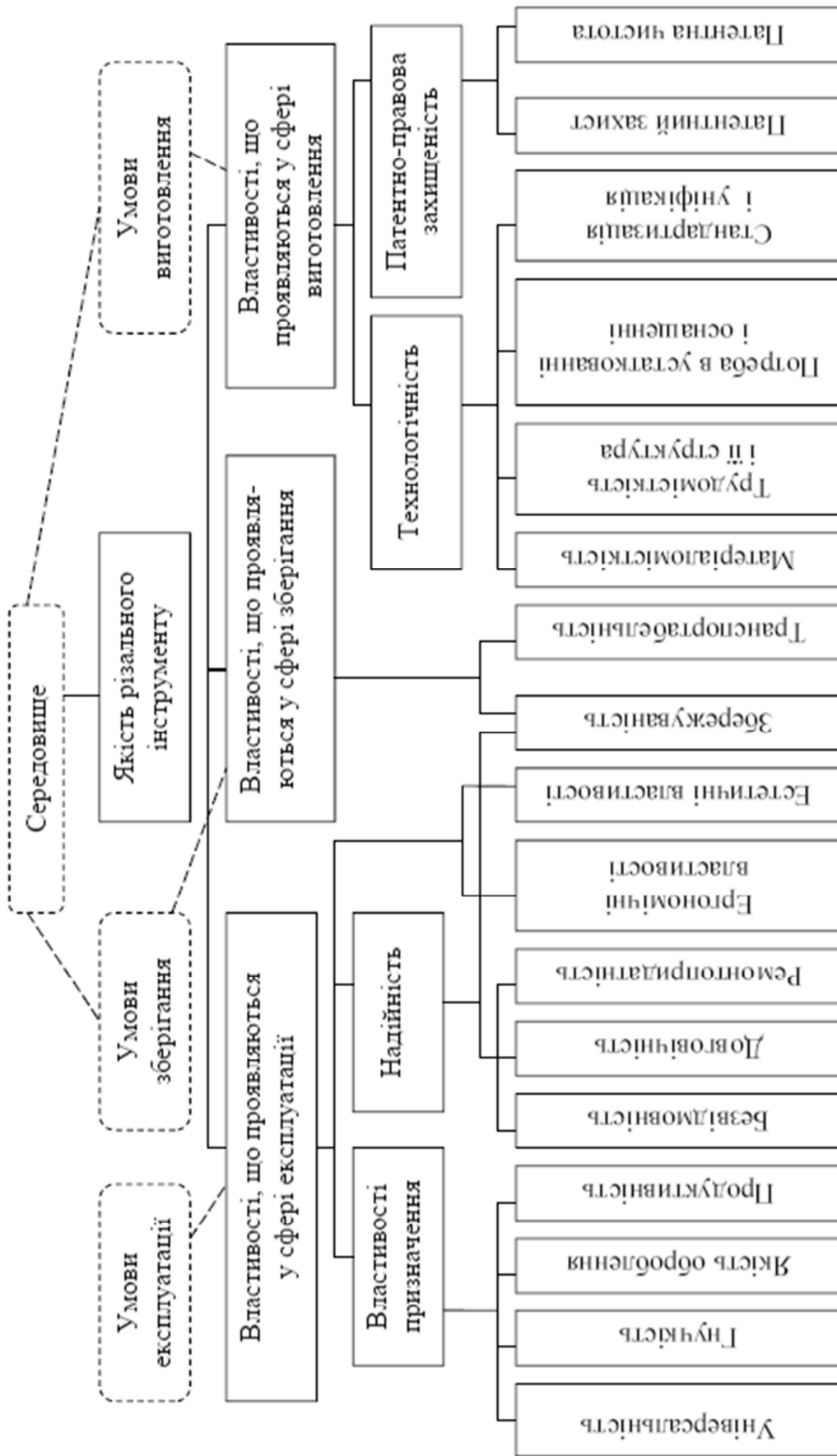


Рисунок 1.15 – Система властивостей, що визначають якість різального інструменту

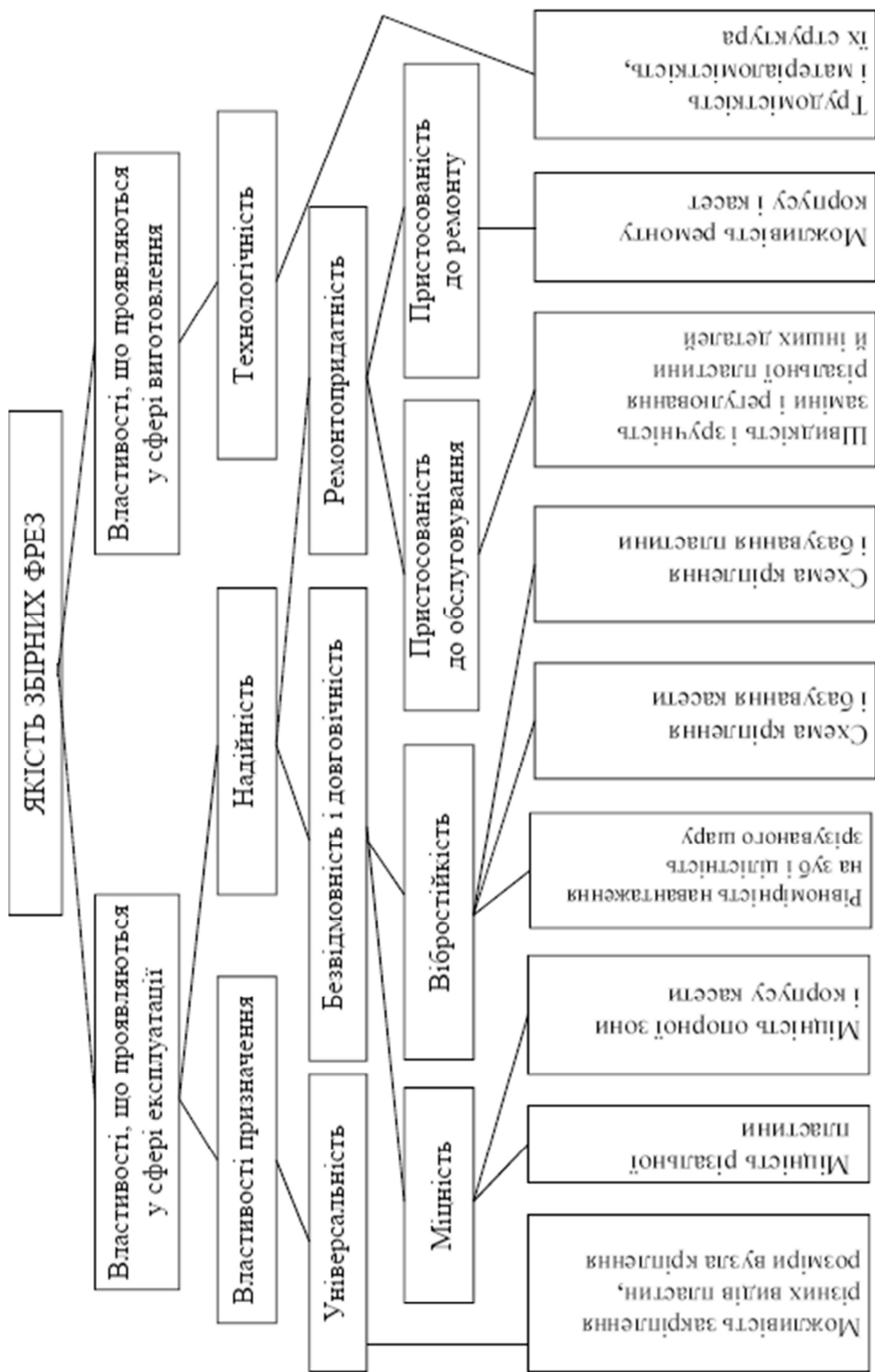


Рисунок 1.16 – Ієрархічна система властивостей, що становлять якість збірних торцевих фрез великих діаметрів

Ефективно оцінити різні варіанти конструктивних рішень на стадії проектування, а також значення показників вагомості окремих властивостей виробу, що визначають його якість, можна застосовуючи експертний метод [26; 72]. Для цього може бути використана як відкрита групова експертиза зі взаємодією експертів, так і замкнута – без їх взаємодії. Перший варіант дозволяє прискорити процедуру, другий – підвищує об'єктивність отримуваних оцінок.

Кількість експертів, що залучаються, може бути визначена з урахуванням заданої точності експертної оцінки  $\varepsilon$  і її надійності  $\gamma$ :

$$N_{\text{екс}} \geq \frac{t_1^2 \cdot W}{\varepsilon}, \quad (1.2)$$

де  $t_1$  – коефіцієнт, що залежить від  $\gamma$  (значення критерію Стюдента);  
 $W$  – коефіцієнт варіації оцінок.

Якщо прийняти точність експертних оцінок не нижче  $\varepsilon < 0.1$ , надійність  $\gamma_1 > 0.9$  ( $t_1 = 2.1$ ) і середню узгодженість суджень експертів, то достатньо семи експертів..

Експерт повинен задовольняти ряду вимог: компетентність, упевненість, об'єктивність, діловитість і зацікавленість. Серед експертів мають бути фахівці, які представляють усі сторони діяльності, що формують якість виробів (дослідження, конструювання, виготовлення, експлуатацію тощо), а також усі широко поширені умови виробництва і споживання виробу [26]. Якість експертів оцінюється при аналізі результатів експертизи: чим ближче перша оцінка експерта до середньої оцінки, отриманої у кінці роботи, тим вище його якість.

Особливу увагу необхідно надати правильності поставлення завдання експертам. Це повинно бути відбито у формулюванні питань і вказівці обмежень (діапазон умов експлуатації виробу, для якого робиться експертиза). У разі проведення заочної експертизи має бути підготовлена письмова інструкція.

Структура властивостей виробу може бути змінена експертами: є можливість внести нові властивості при оцінюванні вагомості, а також виставити нульову або малу вагомість і цим самим виключити будь-яку із запропонованих властивостей. Така методика експертизи забезпечує не лише оцінювання вагомостей властивостей і значення їх показників для різних конструкцій, але і є перевіркою запропонованої структури властивостей, їх дерева.

Для оцінювання конструктивних рішень зручною є бальна система, причому максимальний бал отримує найкраще конструктивне рішення з запропонованих уцій групі. Оцінювання властивостей може проводитися як прямим призначенням вагомостей, так і з використанням інших методів, наприклад парних порівнянь. У останньому випадку потрібне нормування - приведення суми вагомостей  $B_j$  або  $B_n$  до одиниці:

$$\sum_{j=1}^J B_j = 1; \quad \sum_{n=1}^{N_j} B_n = 1, \quad (1.3)$$



де  $j$  – номер властивості 1-го рівня;  
 $J$  – кількість властивостей 1-го рівня;  
 $n$  – номер властивості 2-го рівня;  
 $N_j$  – кількість властивостей 2-го рівня, що становлять  $j$ -ту властивість 1-го рівня.

Підсумкова вагомість  $n$ -ї властивості 2-го рівня:

$$B_{nj} = B_j \cdot B_n. \quad (1.4)$$

Залежно від узгодженості думок експертів експертиза здійснюється за два або три тури. Після кожного туру експерти отримують таку інформацію:

а) середнє для усіх експертів значення вагомостей властивостей  $B_{j\_сер}$  і оцінок  $q$ -го конструктивного рішення  $B_{q\_сер}$ :

$$B_{j\_сер} = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} B_{ji}; \quad B_{q\_сер} = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} B_{qi}, \quad (1.5)$$

де  $N_E$  – кількість експертів;  $i$  – номер експерта;

б) відносний розмах варіювання  $\Delta_{відн}$ :

$$\Delta B_{j\_відн} = \frac{B_{j\_max} - B_{j\_min}}{B_{j\_сер}}; \quad \Delta B_{q\_відн} = \frac{B_{q\_max} - B_{q\_min}}{B_{q\_сер}}. \quad (1.6)$$

Якщо значення оцінок або вагомостей окремого експерта відрізняються від середніх на величину, більшу, ніж  $0.25\Delta$ , йому пропонується обґрунтувати свою точку зору. На цьому етапі можна скоригувати недоліки в запропонованій системі властивостей.

Після кожного туру робиться аналіз узгодженості думок експертів. При зниженні  $\Delta_{відн}$  до  $0.5 \dots 0.8$  проводиться повніша перевірка узгодженості думок за коефіцієнтом варіації:

$$W_{Bj} = \frac{\sigma_{Bj}}{B_{j\_сер}}; \quad \sigma_{Bj} = \sqrt{\frac{1}{N_E - 1} \sum_{i=1}^{N_E} (B_{ji} - B_{j\_сер})^2};$$

$$W_{Bq} = \frac{\sigma_{Bq}}{B_{q\_сер}}; \quad \sigma_{Bq} = \sqrt{\frac{1}{N_E - 1} \sum_{i=1}^{N_E} (B_{qi} - B_{q\_сер})^2}, \quad (1.7)$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення.

Узгодженість вважається високою при  $W \leq 0,10$ , вищою за середню – при  $W = 0,11 \dots 0,15$ , середньою – при  $W = 0,16 \dots 0,25$ , нижчою за середню – при  $W = 0,26 \dots 0,35$ , низькою – при  $W > 0,35$ . Після досягнення середньої узгодженості думок процедуру вважають закінченою. Зазвичай це відбувається на II–III турі.

Досвід оцінювання якості багатьох видів технічних виробів показує, що при правильній організації точність експертної оцінки наближена до точності, що отримується іншими методами [26]. Окрім того, експертне

оцінювання дозволяє визначити напрями подальшого вдосконалення конструктивних рішень.

Як приклад розглянемо оцінювання вагомостей властивостей, що визначають якість збірних торцевих фрез і їх залежність від умов оброблення. Групова закрита експертиза проводилася у два тури. У табл. 1.2 наведено дані запрошених експертів.

Таблиця 1.2 – Характеристика членів експертної групи

№ експерта	Місце роботи	Стаж за фахом	Вчений ступінь	Посада	Колишнє місце роботи	Кількість друкованих праць	Відхилення I туру від підсумків
1	ДДМА	48	д-р техн. наук	професор	ГНДЛ*, НКМЗ	210	28 %
2	НКМЗ	19	канд. техн. наук	нач. бюро	НКМЗ	17	35 %
3	ДДМА	29	канд. техн. наук	доцент	ГНДЛ	71	36 %
4	ДДМА	16	–	ст. викл.	ДДМА	32	42 %
5	ДДМА	24	канд. техн. наук	провід. наук. співроб.	ГНДЛ	130	31 %
6	ДДМА	20	канд. техн. наук	доцент	ГНДЛ	53	31 %
7	ДДМА	25	канд. техн. наук	доцент	ГНДЛ	72	27 %

\*ГНДЛ – Галузева науково-дослідна лабораторія Мінверстатпрому

Як відзначалось, певною характеристикою експерта може служити усереднене відносне відхилення його оцінки від середньої, отриманої при закінченні експертизи. Це відношення для більшості експертів коливалося близько 30 %, що слід вважати високим показником якості експертів. Середній коефіцієнт варіації  $W$  за критеріями склав 0.31 і 0.34 за ознаками в I турі. У II турі він знизився відповідно до 0.24 і 0.22, що говорить про відносно високу узгодженість думок експертів.

Результати експертизи за визначенням показників якості і ознак збірних торцевих фрез для глибин фрезерування 3...12 мм наведено в табл. 1.3.

Тут найбільш значущим є показник вібростійкості фрез: вагомість 0.26 і 0.27 (перше число відповідає діапазону глибин фрезерування до 7 мм, друге – до 7.12 мм). Далі йдуть такі властивості, як міцність, вагомість (0.24 і 0.28), ремонтпридатність (0.18 і 0.16), універсальність (0.14 і 0.11) і технологічність (0.18 і 0.18).

Зі зростанням глибини різання, у зв'язку з різким збільшенням складових сил різання, зростає важливість таких показників, як міцність і вібростійкість. При цьому вимушено знижуються вимоги до таких властивостей, як ремонтпридатність і універсальність.

Таблиця 1.3 – Вагомості показників якості і ознак збірних торцевих фрез

Показник	Ознаки	Діапазон глибин фрезерування $t$ , мм					
		$3 \leq t \leq 7$			$7 \leq t \leq 12$		
		Вагомість показників	Вагомість ознак		Вагомість показників	Вагомість ознак	
			Окремо	Підсумкова		Окремо	Підсумкова
Вібростійкість	Ділення зрізу по ширині	0,26	0,17	0,044	0,27	0,20	0,054
	Ділення зрізу по товщині		0,15	0,039		0,16	0,043
	Напрямок сил закріплення пластини		0,23	0,060		0,22	0,059
	Базування пластини		0,20	0,052		0,17	0,046
	Базування ножа		0,14	0,036		0,14	0,038
	Напрямок сил кріплення ножа		0,11	0,029		0,11	0,030
Міцність	Форма поперечного перерізу пластини	0,24	0,27	0,065	0,28	0,3	0,084
	Цілісність пластини		0,28	0,067		0,29	0,081
	Характеристика опорної зони		0,29	0,070		0,25	0,070
	Форма корпусу ножа		0,16	0,038		0,16	0,045
Ремонтопридатність	Характеристика механізму кріплення	0,18	0,3	0,054	0,16	0,3	0,048
	Характеристика механізму регулювання		0,25	0,045		0,19	0,030
	Можливість відновлення корпусу фрези		0,26	0,047		0,29	0,046
	Можливість відновлення корпусу ножа		0,19	0,034		0,22	0,035
Універсальність	Розмірна характеристика вузла кріплення	0,14	0,5	0,070	0,11	0,56	0,062
	Кількість видів закріплюваних пластин		0,5	0,070		0,44	0,048
Технологічність	Кількість деталей	0,18	0,45	0,081	0,18	0,44	0,079
	Кількість складних деталей або поверхонь		0,55	0,099		0,56	0,101

Можна стверджувати, що вказані зміни відбивають фундаментальний принцип компромісу при проектуванні, який за аналогією з множиною Парето при оптимізації [52] можна назвати множиною Парето при проектуванні.

Він полягає в тому, що у більшості випадків (зокрема, при проектуванні сталих, добре опрацьованих конструктивно виробів) поліпшення конструкції за однією властивістю може бути досягнуте тільки за рахунок погіршення за іншою.

## 1.9 Синтез конструкцій на основі комбінаторних методів

Одним із найбільш ефективних комбінаторних методів пошуку нових технічних рішень є морфологічний аналіз і синтез. Суть методу полягає в тому, що в удосконалюваній системі (об'єкті) виділяють характерні для неї класифікаційні (морфологічні) ознаки (функції), для кожної з яких визначають її можливі значення – альтернативи. Ознаки і їх альтернативи складають багатовимірні таблиці (морфологічні ящики) охоплюючи таким чином усі можливі варіанти рішень.

Опис варіантів методу морфологічного аналізу і синтезу можна знайти у Дж. Джонса [28], П. Хілла [27], А. І. Половінкіна [36], В. П. Бикова [38] та інших фахівців у галузі теорії проектування [59]. Достатньо глибокий аналіз сучасного використання і можливостей морфологічного методу наведено в роботі А. Альвареса і Т. Річі [60]. Якнайповніше метод подано в роботах В. М. Одріна [41]. Ним наведено чітке формулювання методу, а також запропоновано систему робочих визначень, покладену в його основу. В. М. Одрін розглядає морфологічний аналіз і синтез як морфологічний метод дослідження систем і вирішення завдань, розділений на два якісно різні етапи:

- отримання опису усіх систем, що належать до досліджуваного класу, в  $N$ -мірному просторі ознак, тобто класифікація множини досліджуваних систем і побудова морфологічних таблиць (етап морфологічного аналізу, оскільки класифікація є різновидом і результатом аналізу);

- оцінювання описів різних систем досліджуваного класу і вибір тих з них, які в тому або іншому наближенні відповідають умовам завдання, тобто відповідають вимогам до проектованої системи (етап морфологічного синтезу).

Основне призначення морфологічних таблиць – бути пошуковим полем усіх можливих рішень задачі. Крім того, морфологічний аналіз може мати цінні додаткові щодо початкової мети пошуку результати:

- може служити зручним засобом впорядкування інформації, що відноситься до досліджуваної галузі знань, засобом багатоаспектної організації інформаційних масивів у інформаційно-пошукових, автоматизованих довідково-інформаційних системах тощо;

- морфологічна таблиця, виконана на основі вибраного переліку потенційних класифікаційних ознак може служити ефективним інструментом прогнозування розвитку класу рішень для системи, яку проектують.

У роботі [61], присвяченій етапу морфологічного синтезу, наведено класифікацію методів морфологічного синтезу. При оцінюванні потенційно можливих функціональних систем морфологічний синтез використовується як інструмент пошуку нових рішень (метод конструювання нових об'єктів). Якщо ж оцінювати вже існуючі системи, то морфологічний синтез можна використати як інструмент ідентифікації систем (метод пошуку). Серед ряду методів пошуку інтерес представляє такий метод «зондування» допустимої морфологічної великої кількості рішень, як пошук з ви-

користанням ЛПт-послідовностей, запропонований І. М. Соболев і Р. Б. Статніковим [62]. В. М. Одріним розроблені процедури блочно-лабіринтового і прискореного блочно-лабіринтового конструювання. У останній процедурі вибирається одна-дві найбільш суттєві ознаки, що характеризують функціонування цієї підсистеми, формується «скелетна» морфологічна таблиця. На ній здійснюється пошук «скелетних варіантів», що відповідають шуканій меті в першому наближенні, які потім розширюються до повних варіантів рішень, що відповідають початковій морфологічній таблиці.

Як варіант морфологічного методу для пошукового проектування можуть бути застосовані І – АБО-дерева (графи), що представляють з себе багаторівневі морфологічні таблиці [36], які останнім часом знайшли досить широке застосування [63; 64].

У роботах Ю. М. Кузнєцова морфологічний аналіз і синтез розвивається стосовно проектування затискних механізмів верстатів [42; 65]. Об'єкт розчленовується за функціональними або технологічними ознаками, створюється комбінаторний файл з урахуванням усіх можливих конструктивних і технологічних реалізацій об'єкта, а також обмежень.

При проектуванні різального інструменту морфологічний метод застосований у С. Г. Нагорняка [66] для торцевих фрез з пружно-демпфувальними елементами й у В. А. Настасенко [67] – для стружкових канавок черв'ячних модульних фрез.

Згадані автори використовують морфологічний метод без процедури автоматичного оцінювання конструкції, що вимагає значних витрат часу при розгляді великої кількості конструкцій і робить трудомістким вибір оптимального варіанту.

У цілому оцінювання виявлених рішень є слабким місцем морфологічного аналізу і синтезу, оскільки цей процес погано піддається формалізації. Крім того, простий перебір варіантів («у темну») не сприяє активізації творчості конструктора. З метою усунення цих недоліків В. С. Гузенко був застосований «спрямований морфологічний аналіз» [68]. У цьому разі оцінювалися не рішення на перетині рядків і стовпців (їх надзвичайно багато), а альтернативи ознак, причому останні розташовувалися в рядках і стовпцях у порядку зниження оцінки альтернатив. Для оцінювання альтернатив використовувалися методи кваліметрії [26]. При цьому спочатку будувалося дерево якості й визначалася вагомість його властивостей (відповідно, показників, критеріїв). Побудова морфологічних таблиць, оцінювання альтернатив і рішень проводилися послідовно за критеріями: від вагоміших до менш вагомих. Автори назвали цей метод «критерійним, спрямованим морфологічним аналізом».

Згодом метод піддався подальшій формалізації з метою використання при автоматизованому проектуванні, а також вирішення низки інших дослідних і проектних завдань [52; 69]. Узагальнений алгоритм робіт з проектування збірного інструменту з використанням цього методу наведено на рис. 1.17.

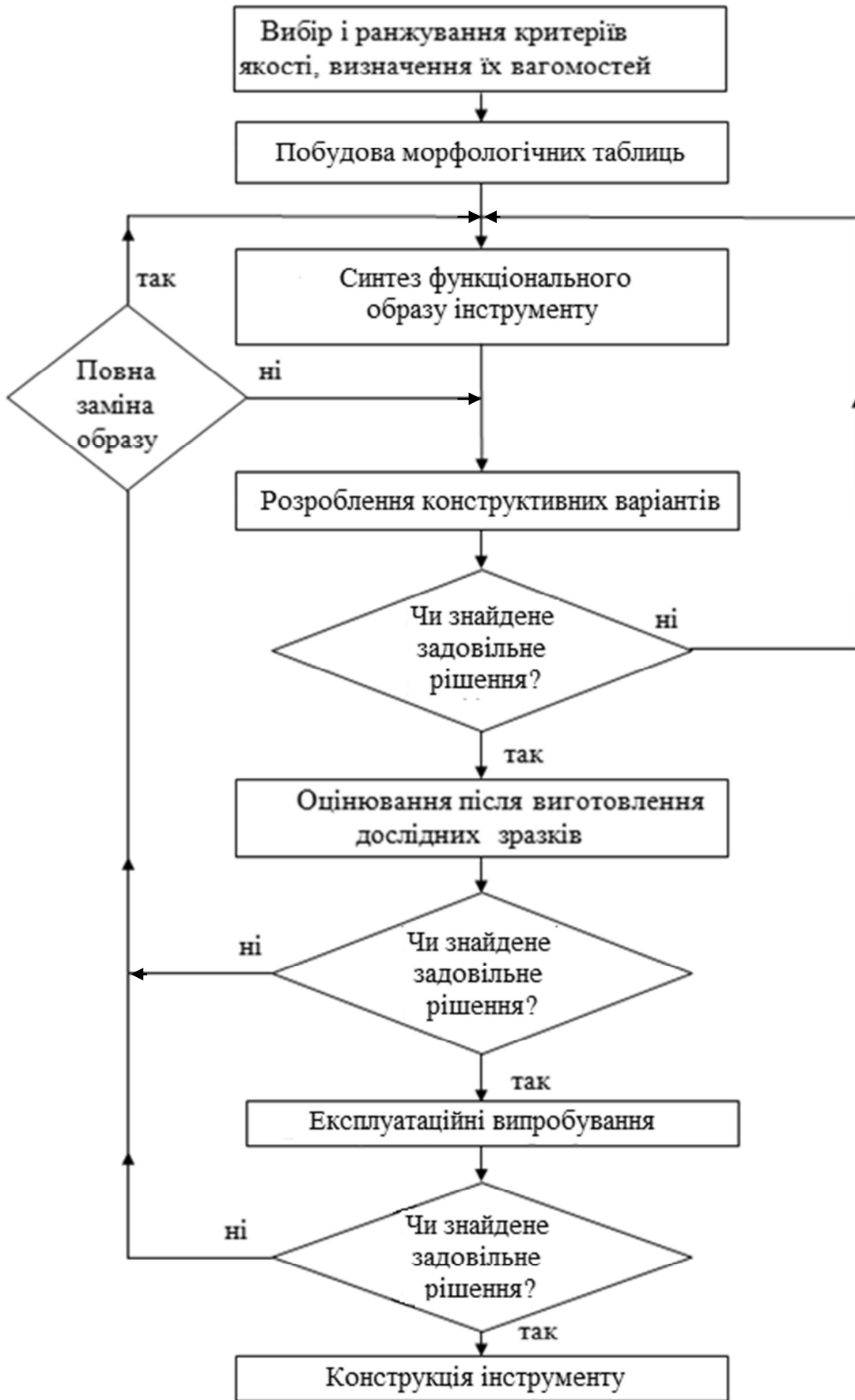


Рисунок 1.17 – Порядок робіт при проектуванні з використанням морфологічного аналізу і синтезу

Для кожної області умов функціонування можна ввести узагальнений критерій якості  $K_0$ , визначивши його як кортеж (впорядкований набір) одиничних критеріїв (показників):

$$K_0 := (K^1, K^2, \dots, K^J), \quad (1.8)$$

де  $K^j$  –  $j$ -й одиничний показник (критерій) якості;

$J$  – кількість використовуваних критеріїв.

Тут і далі знак «:=» означає «за визначенням дорівнює».

Найпростіша множина критеріїв може бути врахована шляхом їх лінійної (адитивної) або мультиплікативної згортки [57; 58]:

$$K_0 = \sum_{j=1}^J K^j B^j, \quad (1.9)$$

де  $B^j$  – вагомість  $j$ -го одиничного показника якості.

Кожен критерій  $K^j$  визначається  $N^j$  ознаками:

$$K^j := (\Pi^{1j}, \dots, \Pi^{n_j}, \dots, \Pi^{N^j}). \quad (1.10)$$

Кожна  $n_j$ -та ознака може набувати  $m_{n_j}$  значень, які відповідають  $m_{n_j}$  можливих альтернатив або реалізацій:

$$\Pi^{n_j} \in \{a_1^{n_j}, a_{2, \dots}^{n_j}, a_{m_{n_j}}^{n_j}\} = \{a_{q_{n_j}}^{n_j} \mid q_{n_j} = 1, \dots, m_{n_j}\}, \quad (1.11)$$

де  $q_{n_j}$  – номер альтернативи ознаки  $n_j$ ;

$m_{n_j}$  – загальна кількість альтернатив ознаки  $n_j$ .

Оцінювання значень ознаки для кожної альтернативи (реалізації) можна здійснити експертним шляхом, аналогічно визначенню вагомостей критеріїв і ознак.

Функціональний образ інструмента (реалізації) складається з деяких значень альтернатив для усіх ознак:

$$W_i = \{a_{q_{11}}^{11}, a_{q_{21}}^{21}, \dots, a_{q_{N^1 1}}^{N^1 1}, \dots, a_{q_{N^j j}}^{N^j j}\}. \quad (1.12)$$

Множину можливих рішень можна подати декартовим добутком множин альтернатив для всіх ознак:

$$W = \Pi^{11} \times \Pi^{21} \times \dots \times \Pi^{N^1 1} \times \dots \times \Pi^{N^j j}. \quad (1.13)$$

Кількість можливих рішень (потужність множини) при цьому

$$|W| = \prod_{j=1}^J \prod_{n=1}^{N_j} m_{n_j}. \quad (1.14)$$

Наприклад, для загальної кількості ознак  $N = \sum N^j = 10$  і кількості альтернатив за кожною ознакою  $m_{nj} = 4$  кількість можливих рішень

$$|W| = 4^{10} > 10^6.$$

Кожне з цих рішень, передусім, має бути оцінене експертом з урахуванням можливості технічної реалізації, що робить практично неможливим аналіз усіх рішень. Оптимізаційний морфологічний аналіз і синтез дозволяє скоротити витрати часу за рахунок оцінювання не конкретних рішень, а альтернатив ознак, спеціального комбінування ознак і перебору рішень у порядку зниження значення узагальненого критерію якості. Вже при парному порівнянні відповідних альтернатив відсівається деяка частина варіантів, що значно скорочує подальший аналіз. Відповідні пари ознак при цьому утворюють двовимірні морфологічні таблиці. Ці морфологічні таблиці чергуються в порядку зменшення вагомостей відповідних пар ознак, що також дозволяє прискорити пошук перспективних варіантів.

Для різних умов експлуатації інструменту вагомості критеріїв і ознак можуть бути різними, тому послідовність розгляду таблиць і порядок розташування альтернатив у них не є фіксованими. У свою чергу альтернативи ранжовані і розташовуються в порядку убуття їх оцінок таким чином, що кращі рішення за даною бінарною сукупністю ознак опиняються в лівому верхньому куті таблиці. Як приклад у таблиці 1.4 наведено морфологічну таблицю першого рівня розгляду за критерієм вібростійкості збірних торцевих фрез. Морфологічна таблиця побудована на основі двох ознак: ділення (дроблення) величини зрізу матеріалу між пластинами по ширині й товщині.

Як елемент синтезу, на етапі побудови таблиць перевіряється на можливість реалізації і оцінюється кожна бінарна сукупність  $a_q^{nj}$  і  $a_{q'}^{(n+1)j}$  з урахуванням можливого системного ефекту (рис. 1.18):

$$B_q^{nj} B_{q'}^{(n+1)j} = (B_q^{nj} B_{n_j} + B_{q'}^{(n+1)j} B_{(n+1)_j}) \eta, \quad (1.15)$$

де  $B_q^{nj}$  – бальна оцінка  $q$ -ї альтернативи ознаки  $n_j$ ;

$B_{n_j}$  – вагомість  $n_j$ -ї ознаки,

$\eta$  – коефіцієнт системного ефекту (у разі, якщо ця бінарна сукупність не може бути реалізована,  $\eta = 0$ ).

Оцінку бінарної сукупності раціонально вказувати в клітинах морфологічної таблиці (табл. 1.4). Сукупності, які технічно не можливо реалізувати, відзначаються при цьому прочерком.



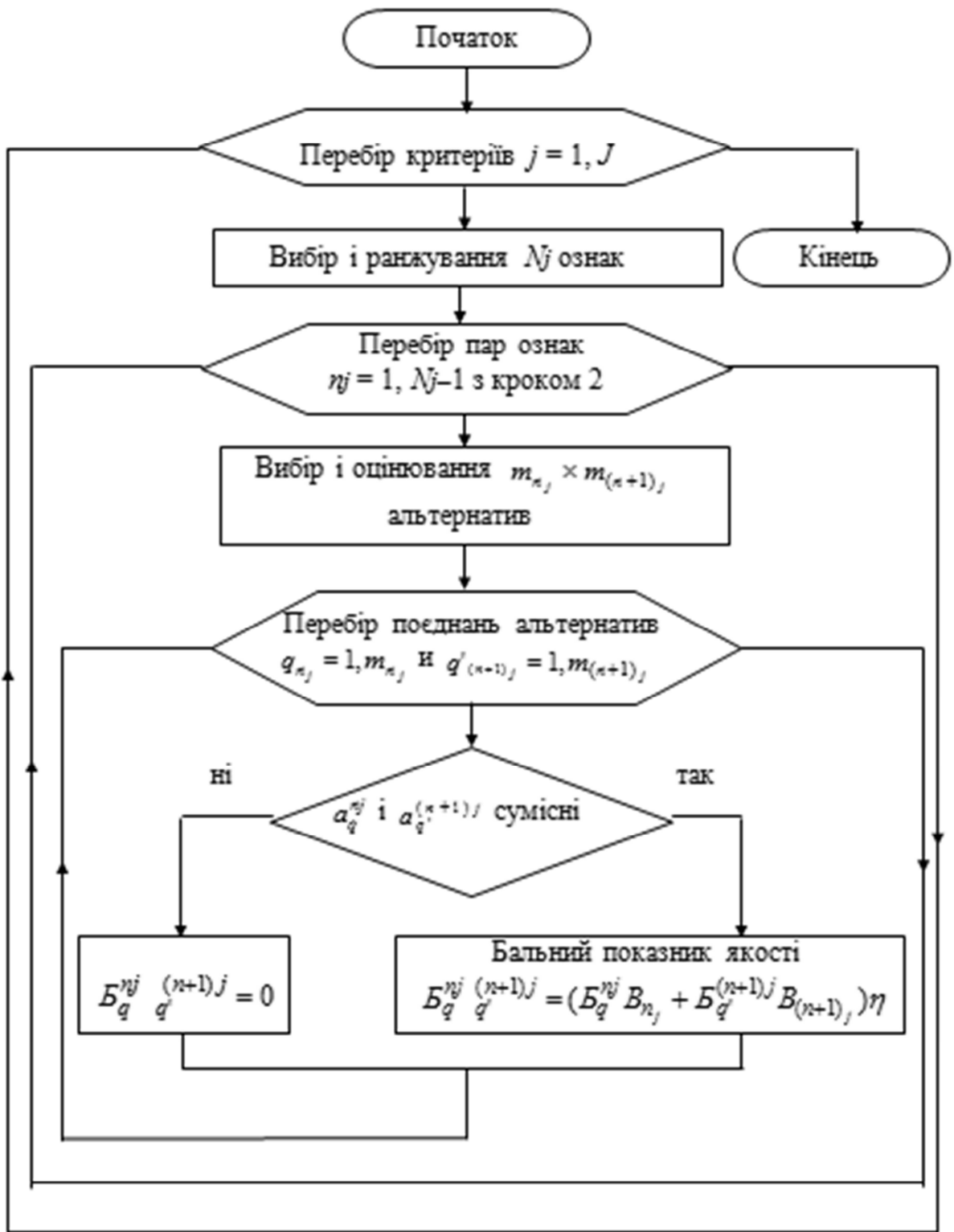




Рисунок 1.18 – Алгоритм побудови бінарних морфологічних таблиць

Таблиця 1.4 – Морфологічна таблиця схем ділення зрізу при торцевому фрезеруванні. Оцінка рішень за критерієм вібростійкості

Ділення зрізу по товщині $B_2 = 0.043$	Позначення альтернатив і їх оцінка у балах	Ділення зрізу по ширині $B_1 = 0,054$			
		Між пластинами		На пластинах	Відсутнє
		$\varphi_1 \neq \varphi_2$	$\varphi_1 = \varphi_2$		
		Позначення альтернатив і їх оцінка у балах			
		$a_1^1$ 5	$a_2^1$ 4,5	$a_3^1$ 4	$a_4^1$ 2,5
Позначення рішень і їх оцінка					
Нерівномірне 	$a_1^2$ 5	$\frac{a_1^1 a_1^2}{0,486}$	$\frac{a_2^1 a_1^2}{0,459}$	$\frac{a_3^1 a_1^2}{0,432}$	$\frac{a_4^1 a_1^2}{0,351}$
Рівномірне 	$a_2^2$ 4	$\frac{a_1^1 a_2^2}{0,443}$	$\frac{a_2^1 a_2^2}{0,416}$	$\frac{a_3^1 a_2^2}{0,389}$	$\frac{a_4^1 a_2^2}{0,308}$

## Висновки за розділом 1

1. Розглянуті способи підвищення інтелектуальності сучасних CAD/CAM/CAE-систем показали необхідність застосування оптимізації для пошуку раціональних рішень при проектуванні конструкцій, технологічних процесів і реалізації наскрізного процесу технологічної підготовки виробництва від проектування до виготовлення.

2. Проаналізовані існуючі підходи і можливості інтеграції з промисловими системами (Delcam PowerShape, DS SolidWorks) для створення зовнішніх модулів на основі їх програмних інтерфейсів, що забезпечує використання CAD/CAM/CAE-систем у якості компонентів комплексної САПР.

3. Розгляд конструкцій імплантатів і випадків їх застосування дозволив виконати класифікацію металевих імплантатів, використовуваних матеріали для визначення номенклатури заготовок, потрібних для виготовлення імплантатів і окремих видів медичного інструменту. Аналіз конструкції імплантатів показав, що велика їх частина виготовляється з неіржавких сталей і сплавів титану, які можуть бути заздалегідь оброблені методами оброблення тиском і, зокрема, методами інтенсивного пластичного деформування для створення субмікроструктурної структури.

4. Виконано аналіз особливостей реалізації процесів пластичного деформування і проблем проектування технологічних процесів з викорис-

танням CAD/CAM/CAE-систем, зокрема проблеми пошуку маршруту деформування для знаходження оптимального розподілу деформацій в об'ємі заготовки. Показано необхідність використання оптимізації технологічних процесів пластичного деформування шляхом варіювання групи конструктивних параметрів технологічного оснащення для вибору їх геометрії і досягнення раціональних технологічних рішень.

5. Аналіз робіт з теорії проектування показав, що реалізація пошукового конструювання і розвиток інформаційної підтримки цього процесу вимагають вирішення ряду проблем, які пов'язані з великим об'ємом накопичених інформаційних фондів, різноманітністю існуючих підходів до класифікацій у різних предметних галузях, складністю поставлення завдань автоматизованого пошуку нових технічних рішень.

6. На основі аналізу і формалізації умов експлуатації торцевих фрез з використанням зібраних матеріалів розроблено методичку і програмне забезпечення для аналізу умов експлуатації і надійності різального інструменту, що допомагає визначити структуру технологічних ніш окремих видів інструменту і характеристик їх надійності.

7. Сформовано інформаційне забезпечення САПР процесу металооброблення на верстатах фрезерно-розточувальної групи, яке забезпечує пошук аналогічних прецедентів металооброблення. Експертним шляхом уточнено структуру і вагомості властивостей, що визначають якість касетних торцевих фрез для використання і отримання дво- і багатовимірних морфологічних таблиць.

8. Виконано застосування методу морфологічного аналізу і синтезу до формування і оцінювання конструктивних образів різального інструменту, що дозволило отримувати експрес-оцінку цих образів на початкових етапах проектування. Воно відрізняється попередньою експертною оцінкою вагомостей критеріїв якості за ознаками, а також альтернатив у порядку їх значущості. Такий підхід забезпечує прискорення процесу розроблення нових конструкцій.

### **Список використаних джерел**

1. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Ли К. – СПб : Питер, 2004. – 560 с.
2. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград : Ин-Фолио, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-903826-22-3.
3. Leondes, Cornelius T. Computer Aided And Integrated Manufacturing Systems. Vol. 5: Manufacturing Processes / Cornelius T. Leondes. – World Scientific, 2003. – 256 p.

4. Leondes, Cornelius T. Computer aided and integrated manufacturing systems. Vol. 4: Computer aided design/computer aided manufacturing (CAD/CAM) / Cornelius T. Leondes. – World Scientific, 2003. – 312 p.

5. Waqas, Saleem. Topology Optimization – Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools / Waqas Saleem, Hu Lu, Fan Yuqing // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2008. – ISBN: 978-988-98671-0-2.

6. Topology and shape optimization for non-linear problems. Edward de Boer MT 11.10. – Sydney, December 2010, – P. 63. – <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12798.pdf>

7. Tomlin, M. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part / Matthew Tomlin, Jonathan Meyer // the 7th Altair CAE technology conference. – Altair Engineering, 2011. – P. 1–9. – <http://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/uploadedFiles/Topology-Optimization-of-an-Additive-Layer-Manufactured-Aerospace-Part.pdf>.

8. Методы искусственного интеллекта для синтеза проектных решений : учебное пособие / В. Е. Подольский, И. Л. Коробова, И. В. Милованов, И. А. Дьяков, Н. В. Майстренко. – Тамбов : ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.

9. Leondes Cornelius, T. Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 2: Intelligent Systems Technologies / Cornelius T. Leondes. – World Scientific, 2003. – 256 p.

10. Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems, Vol. 3: Optimization Methods / Cornelius T. Leondes. – World Scientific, 2003. – 240 p.

11. Khennane Amar. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and ABAQUS / Khennane Amar. – CRC Press, 2013. – 486 p.

12. Gautam Puri. Python Scripts for ABAQUS: learn by example / Gautam Puri. – Charleston, 2011 – 747 p.

13. Titanium in Medicine. Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications / D. M. Brunette, P. Tengvall, M. Textor, P. Thomsen. – Springer, 2001. – 1018 p. – ISBN 978-3-642-63119-1.

14. Sinka, I. C. Constitutive Model Development for Powder Compaction and Implementation into ABAQUS / I. C. Sinka, A. C. F. Cocks, J. Pan // SIMULIA Customer Conference. – 2009. – P. 1–11. – [http://www.simulia.com/download/pdf2009/Sinka\\_SCC2009.pdf](http://www.simulia.com/download/pdf2009/Sinka_SCC2009.pdf).

15. Valiev, R. Z. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications / Ruslan Z. Valiev, Alexander P. Zhilyaev and Terence G. // Langdon Published Online: 20 SEP 2013 DOI: 10.1002/9781118742679.ch9. – ISBN 978-1-118-09540-9. – URL: [http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781118742617\\_sample\\_414742.pdf](http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781118742617_sample_414742.pdf).

16. Винтовая экструзия порошковых заготовок / Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков, М. Б. Штерн, Е. Олевский // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18, № 1. – С.69–82.

17. Stein, E. Adaptive Finite Elements in Linear and Nonlinear Solid and Structural Mechanics / Erwin Stein. – Springer, 2005. – P. 368. – ISBN 13 978-3-211-26975-6.
18. Graeme, C. Cochlear implants: fundamentals and applications / Graeme Clark. – Springer, 2003. – 868 p.
19. Palmer, R. Implants in clinical dentistry. Second edition / Richard Palmer. – Informa Healthcare, 2011. – 228 p.
20. Lang, Niklaus P. Clinical periodontology and implant dentistry : 2 Volume Set / Niklaus P. Lang, Jan Lindhe. – Wiley–Blackwell, 2015. – 1480 p.
21. Bidra, Avinash S. Journal of prosthodontics on dental implants / Bidra Avinash S., Parel Stephen M. – Wiley–Blackwell, 2015. – 294 p.
22. Информационный сайт по стоматологии. – <http://neostom.ru/implantatsiya/stroenie-i-klassifikatsiya-implantatov.html>.
23. Melkerson, Mark N. Spinal implants: Are we evaluating them appropriately? / Mark N. Melkerson, Steven L. Griffith. – ASTM International, 2003. – 238 p.
24. Ортопедические операции. – <https://orthopedicsurgery.ru/treatment/Germany/hipjointartificiallimb/>.
25. Pezzotti, Giuseppe. Advanced materials for joint implants / Giuseppe Pezzotti. – CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. – 622 p.
26. Хаёт, Г. Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хаёт [и др.] ; под общ ред. Г. Л. Хаёта.– М. : Машиностроение, 1989.– 256 с.
27. Хилл, П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования. Научное обоснование решений : пер. с англ. / Хилл П. – М. : Мир, 1973. – 203 с.
28. Джонс, Дж. К. Методы проектирования : пер. с англ. / Джонс Дж. К. – 2-е изд., доп. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
29. Диксон, Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ, принятие решений : пер. с англ. / Диксон Дж. –М. : Мир, 1969. – 440 с.
30. Мюллер, И. Эвристические методы в инженерных разработках : пер. с нем. / Мюллер И. –М. : Радио и связь, 1984. –144 с.
31. Хубка, В. Теория технических систем : пер. с нем. / Хубка В. – М. : Мир, 1987. – 208 с.
32. Protzen, Jean-Pierre. The Universe of Design: Horst Rittel's Theories of Design and Planning / Protzen Jean-Pierre, Harris David J. – London : Routledge, 2010. – 251 p. – ISBN 0415779898.
33. Альтшуллер, Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. – 3-е изд., доп. – Петрозаводск : Скандинавия, 2003. – 240 с.
34. Буш, Г. Я. Стратегия эврилогии / Буш Г. Я. – Рига : Знание, 1986. – 64 с.
35. Zaripov, M. Project on Creation of Knowledge Base on Physical and Technological Effects/ M. Zaripov, I. Petrova, V. Zaripova // Education in Measurements and Instrumentation – Challenges of New Technologies: Pro-

ceedings of TC-1 Symposium – 2002. – Wroclaw : Wroclaw University of Technology, 2002. – С. 171–176. – ISBN 83-7085-647-0.

36. Техническое творчество: теория, методология, практика: энциклопедический словарь-справочник / А. М. Дворянкин [и др.] ; под ред. А. И. Половинкина, В. В. Попова. – М. : Информсистема, 1995. – 410 с.

37. Чус, А. В. Основы технического творчества : учебное пособие / А. В. Чус, В. А. Данченко. – Киев – Донецк : Вища школа, 1983. – 184 с.

38. Быков, В. П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении / Быков В. П. – Л. : Машиностроение, 1989. – 255 с.

39. Андрейчиков, А. В. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения) / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Машиностроение, 1998. – 476 с.

40. Eder, Wolfgang Ernst. Theory of Technical Systems – Educational Tool for Engineering / Wolfgang Ernst Eder // Universal Journal of Educational Research. – 2016. – 4(6). – P. 1395–1405. – DOI: 10.13189/ujer.2016.040617. – Режим доступа: <http://www.hrpub.org/download/20160530/UJER17-19506466.pdf>.

41. Одрин, В. М. Метод морфологического анализа технических систем / Одрин В. М. – М. : ВНИИПИ, 1989. – 312 с.

42. Кузнецов, Ю. М. Теорія технічних систем / Кузнецов Ю. М., Луців І. В., Дубиняк С. А. ; під заг. ред. проф. Ю. М. Кузнецова. – К.–Тернопіль : ТДТУ, 1997. – 310 с.

43. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / Норенков И. П. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с. – ISBN 5-7038-2090-1.

44. Буч, Гради. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ : пер.с англ. / Гради Буч. – 2-е изд. – М. : Бинум ; СПб : Невский диалект, 2001. – 560 с.

45. Вендров, А. М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / Вендров А. М. – М. : Финансы и статистика, 1998. – 176 с.

46. Guide to the Software Engineering. Body of Knowledge. Version 3.0. SWEBOOK®. A project of the IEEE Computer Society / Pierre Bourque, Richard E. (Dick) Fairley, eds. – IEEE, 2014. – 335 p. – ISBN 978-0-7695-5166-1.

47. Petrova, I. Systems of Teaching Engineering Work on Base of Internet Technologies / Irina Petrova, Viktoriya Zaripova // International Journal «Information technologies & knowledge». – Bulgaria, Sofia, 2009. – Vol. 3. – P. 37–43.

48. Юликов, М. И. Проектирование и производство режущего инструмента / М. И. Юликов, Б. И. Горбунов, Н. В. Колесов. – М. : Машиностроение, 1987. – 296 с.

49. Гречишников, В. А. Поиск оптимальной конструкции фасонной фрезы / В. А. Гречишников, А. П. Тарасов // Станки и инструмент. – М., 1989. – № 7. – С. 15–17.

50. Сенькин, Е. Н. Подсистема многокритериальной параметрической оптимизации режущего инструмента / Сенькин Е. Н. // Станки и инструмент. – М., 1989. – № 4. – С. 15–17.

51. Гуляев, Ю. Б. Формирование геометрического образа сборной торцевой фрезы в CAD/CAM/CAE/PDF–системе SolidWorks / Гуляев Ю. Б. // Сборник докладов IX научной конференции МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ «Станкин» – ИММ РАН» по математическому моделированию и информатике. – М. : Янус–К, ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин», 2006. – С. 184–186.

52. Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация / Г. Л. Хаеа [и др.] ; под общ.ред. Г. Л. Хаеа. – Краматорск : ДГМА, 1994. – 370 с.

53. Хаеа, Г. Л. Методология проектирования на основе маркетинга и оптимизации технологических систем с учетом человеческого фактора / Г. Л. Хаеа, А. Л. Еськов, Е. А. Подгора // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск : ДГМА, 1996. – Вып. 6. – С. 5–15.

54. Джексон, Г. Проектирование реляционных баз данных для использования с микроЭВМ : пер. с англ. / Джексон Г. – М. : Мир, 1991. – 252 с.

55. Банк прецедентов механообработки на тяжелых станках / Г. Л. Хаеа [и др.] // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск : ДГМА, 1996. – Вып. 6. – С. 56–62.

56. Мельников, А. Ю. Разработка информационной системы для маркетинговых исследований и анализа надежности / А. Ю. Мельников, В. Л. Аносов, Д. Е. Прекрасный // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2006. – № 1/2. – С. 122–127.

57. Азгальдов, Г. Г. Квалиметрия: первоначальные сведения : справочное пособие с примером для АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов» : учеб. пособ. / Г. Г. Азгальдов, А. В. Костин, В. В. Садовов. – М. : Высш. шк., 2010. – 143 с. – ISBN 978-5-06-002703-7.

58. Гличев, А. В. Основы управления качеством продукции / Гличев А. В. – М. : Стандарты и качество, 2001. – 424 с.

59. Андрейчиков, А. В. Система многокритериального морфологического синтеза / А. В. Андрейчиков, А. С. Киселев // Известия вузов. Машиностроение. – 2001. – № 2–3. – С. 23–28.

60. Asunción, Álvarez. Applications of General Morphological Analysis From Engineering Design to Policy Analysis / Asunción Álvarez and Tom Ritchey // Acta Morphologica Generalis AMG. Swedish Morphological Society. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – 40 p. – ISSN 2001-2241. – URL: <http://www.amg.swemorph.com/pdf/amg-4-1-2015.pdf>.

61. Одрин, В. М. Морфологический синтез систем: постановка задачи, классификация методов, морфологические методы «конструирования» / Одрин В. М. – Киев : Институт кибернетики имени В. М. Глушкова АН УССР, 1986. – 35 с.

62. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 110 с.

63. Марков, А. М. Разработка математических моделей для оценки результатов поискового конструирования технологических систем / А. М. Марков, А. А. Ситников, Е. Ю. Татаркин // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 37–43.

64. Бутенко, Л. Н. Использование инверсии в морфологическом синтезе / Л. Н. Бутенко, Д. В. Бутенко, Д. С. Чугунов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – 2007. – Вып. 1, № 1. – С. 34–36.

65. Кузнецов, Ю. Н. Методы создания технических систем / Кузнецов Ю. Н. – К. : ООО «ЗМОК», Фирма «ГНОЗИС», 1998. – 80 с.

66. Нагорняк, С. Г. Синтез сборных торцовых фрез с упругодемпфирующими элементами / С. Г. Нагорняк, К. В. Зеленский // Известия вузов. Машиностроение. – 1991. – № 10–12. – С. 123–125.

67. Настасенко, В. А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений / Настасенко В. А. – К. : Техніка, 1994. – 44 с.

68. Гузенко, В. С. Направленный морфологический анализ и синтез инструмента для особо тяжелых условий резания / Гузенко В. С. // Надежность режущего инструмента. – Краматорск : КИИ, 1991. – Вып. 4. – С. 83–91.

69. Гузенко, В. С. Морфологический синтез технических объектов с помощью последовательной максимизации на неравномерной решетке / В. С. Гузенко, Г. Г. Коткин, В. Л. Аносов // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск : ДГМА, 1997. – Т. 1. – С. 3–22.

70. Васильева Л. В. Математический анализ целевых функций для многокритериальной оптимизации процесса обработки на средних токарных станках [Электронный ресурс] / Васильева Л. В., Хорошайло В. В. // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии — 2011. — № 2 (8Е). — С. 100–104. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/2\\_8e\\_2011/article/11VLVPM.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/2_8e_2011/article/11VLVPM.pdf)

71. Мироненко, Е. В. Исследование критериев оптимальности процесса обработки на средних токарных станках / Мироненко Е. В. Васильева Л. В., Колесник А. В. / Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 202–208.

72. Васильева Л. В. Підвищення ефективності обробки на середніх токарних верстатах за рахунок оптимізації конструктивних параметрів різців і режимів різання : дис. ... канд. техн. наук. : спец. 05.03.01 / Л. В. Васильева. – Севастополь, 2010. – 157 с.



## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ НАСКРІЗНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРІЇ (НА ПРИКЛАДІ ІМПЛАНТАТІВ З ЛИСТОВОГО ТИТАНУ)

#### 2.1 Актуальність автоматизації процесу проектування імплантів з листового титану і оснащення для їх отримання

Імпланти виготовляють різними способами, у тому числі пластичним деформуванням з листових заготовок [1; 2]. Пов'язано це з тим, що листові конструкції легші й дешевші, хоча в низці випадків – недостатньо жорсткі. Крім того, в об'ємних матеріалах складно отримати потрібні міцнісні властивості. Тому для отримання імплантів застосовують суцільні листові заготовки або сітки з титану ВТ 1-0, з яких пластичним деформуванням отримують вироби зі складною просторовою формою [1].

Найбільш важливими вимогами до систем автоматизованого проектування (САПР) таких виробів є:

- можливість створення варіативності конструкцій;
- параметричне налаштування процесу проектування імплантів і оснащення для їх виготовлення;
- реалізація наскрізного процесу технологічної підготовки виробництва від проектування до виготовлення.

Одним із завдань створення САПР типових деталей є використання базових універсальних промислових програмних продуктів (CAD/CAM/CAE/CAI, PDM та інших систем) для всієї сукупності необхідних функцій. Універсальні системи проектування мають розвинений графічний інтерфейс, що забезпечує інтерактивну роботу користувачів і деякі вбудовані засоби автоматизації діяльності. САПР на основі цих систем дозволяють алгоритмізувати використання їх функцій за рахунок обмеження видів проєктованих виробів.

На етапі освоєння виробів САПР дозволяють замінити математичним моделюванням фізичне моделювання й доведення виробу [2; 3], яке більше вартує і займає багато часу. Така заміна дозволяє скоротити терміни проектування, а також вартість готового виробу. Параметризація дозволяє перевірити різні конструктивні рішення й понизити ризик ухвалення помилкових рішень на основі зміни параметрів або геометричних співвідношень розмірів. Тому важливим є забезпечення інтеграції компонентів САПР, можливість використання зовнішніх баз даних для накопичення конструкторської й технологічної інформації, підтримання параметризації при проектуванні виробів і технології їх отримання [3; 4]. Наприклад, інтелектуальна САПР після розроблення технологічного процесу (ТП) з використанням базової САМ-системи [5] дозволяє залишити тільки необхідні для цього виробу

елементи інтерфейсу, а все зайве видалити. Для технолога це означає, що фіксується певна послідовність операцій оброблення виробу, а параметричне налаштування виконується в процесі відпрацювання технології на верстаті з ЧПК.

Один із напрямів вирішення цієї задачі – керування графічним інтерфейсом користувача для проектування геометричної моделі виробу, оснащення й технологічного процесу їх виготовлення. Варто відмітити, що за рахунок інтеграції САПР може бути зв'язана з експертною системою. Такий підхід є основою для інтелектуального підтримання проектування й створення систем підтримання ухвалення рішень. Для цього необхідно взаємодіяти із зовнішньою базою даних, що забезпечує накопичення й оброблення даних про параметри й результати проектування конструкції або технологічного процесу. У цьому разі САПР стає не лише місцем роботи для конструктора або технолога, але й джерелом інформації для систем ухвалення рішень у процесі проектування й виготовлення виробів. Тому однією з основних вимог, що ставляться до компонент інформаційної системи (САПР, PDM, ERP, СКБД та ін.), є можливість програмного керування набором функціональних засобів, реалізованих у цих компонентах. Для вирішення завдання інтеграції компонентів програмної системи на рівні додатків необхідним є використання інтерфейсу прикладного програмування (API).

Розглянемо методи побудови САПР на основі інтеграції з CAD/CAM-системами для використання їхніх функціональних можливостей при автоматизації проектування й виготовлення пластичним деформуванням листових імплантатів зі складною геометрією.

Виконаємо розроблення інтегрованої САПР для розрахунку й побудови параметризованих об'єктів зі складною геометрією, проектування технології їх виготовлення на верстатах з ЧПК на основі CAD-системи PowerSHAPE і CAM-системи PowerMILL фірми Delcam. Це дозволить підвищити ефективність проектування деталей, зокрема імплантатів і оснащення за рахунок інтеграції з промисловими CAD/CAM-системами і автоматизації процесу розроблення конструкцій і технологій виготовлення виробів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання створення САПР для наскрізного проектування:

1. Аналіз вимог до процесу проектування імплантатів для щелепно-лицьової хірургії, особливостей проектування імплантатів і оснащення для їх виготовлення, функціональних можливостей CAD/CAM-систем і методів інтеграції з ними.

2. Розроблення методики проектування виробів з урахуванням показників якості. Проектування геометричних моделей параметризованого технологічного оснащення, розрахунок і виготовлення моделі імплантату з листової заготовки штампуванням поліуретаном.

3. Розроблення САПР для побудови об'єктів зі складною геометрією і технологічних процесів їх виготовлення на основі інтеграції з PowerSHAPE і PowerMILL. Забезпечення на цій основі варіативності проектування виробів і зниження трудомісткості їх розроблення.

## 2.2 Розроблення методики проектування і виготовлення імплантів для щелепно-лицьової хірургії і технологічного оснащення

Імплантат має бути як функціональним для пацієнта, так і зручним для роботи хірурга при установленні пацієнтові. Крім того, імплантат повинен забезпечувати широкі параметричні можливості в підгонці при протезуванні, забезпечити тривале збереження споживчих властивостей при універсальності матеріалів для його виготовлення. Технологія виробництва імплантів має бути універсальною й забезпечувати геометричну точність виробу.

Як правило, конструктивно імплантат і технологічне оснащення можна розділити на дві складові: загальну універсальну частину й унікальну індивідуальну для кожного пацієнта частину конструкції, тому технологія проектування повинна забезпечувати виготовлення обох частин. У процесі виготовлення імплантів з листових заготовок можуть бути використані інструменти-шаблони, на яких здійснюється пластичне деформування заготовок вручну, штампуванням поліуретаном або комбінованим способом з ручним доведенням.

Шаблон для формозмінення заготовки імплантату пластичним деформуванням складається з основи, яка має уніфіковану форму для встановлення в контейнер з поліуретаном і індивідуальну частину шаблону для кожного пацієнта, яка забезпечує якісне встановлення імплантату на щелепі конкретної людини. Розгортка заготовки повинна розташовуватися в контейнері й таким чином визначає його розміри.

Розглянемо алгоритм і виконаємо розроблення імплантату і САПР для проектування геометричних моделей і технології виготовлення шаблону. Процес проектування геометрії імплантів і оснащення ґрунтується на застосуванні методів оброблення зображень томографії для побудови об'ємних моделей.

Початкову інформацію отримують за допомогою комп'ютерної томографії щелепи пацієнта. Виявлення й аналіз порушень здійснює лікар, який ухвалює рішення про протезування й будує об'ємну модель імплантату в спеціалізованій комп'ютерній системі. Потім у результаті проектування отримують: візуальні моделі імплантату й оснащення (у САД-системі), необхідного для його виготовлення; результати розрахунку напруги й деформації виробу в процесі його використання після встановлення пацієнтові (у САЕ-системі). Ці дані дозволяють гарантувати виготовлення якісного імплантату й позитивні результати процесу протезування.

Етапи проектування імплантів і оснащення для їх отримання наведено на рис. 2.1. Фахівець розпочинає роботу системи з введення знімків, отриманих за допомогою томографа А1 [2; 6]. Знімки потрібні для отримання попередньої моделі щелепи, а лікарські показники – для визначення виду дефектів і підходу при протезуванні. Далі модель пошкодженої щелепи передається в САД-систему для корекції й усунення дефектів моделі.

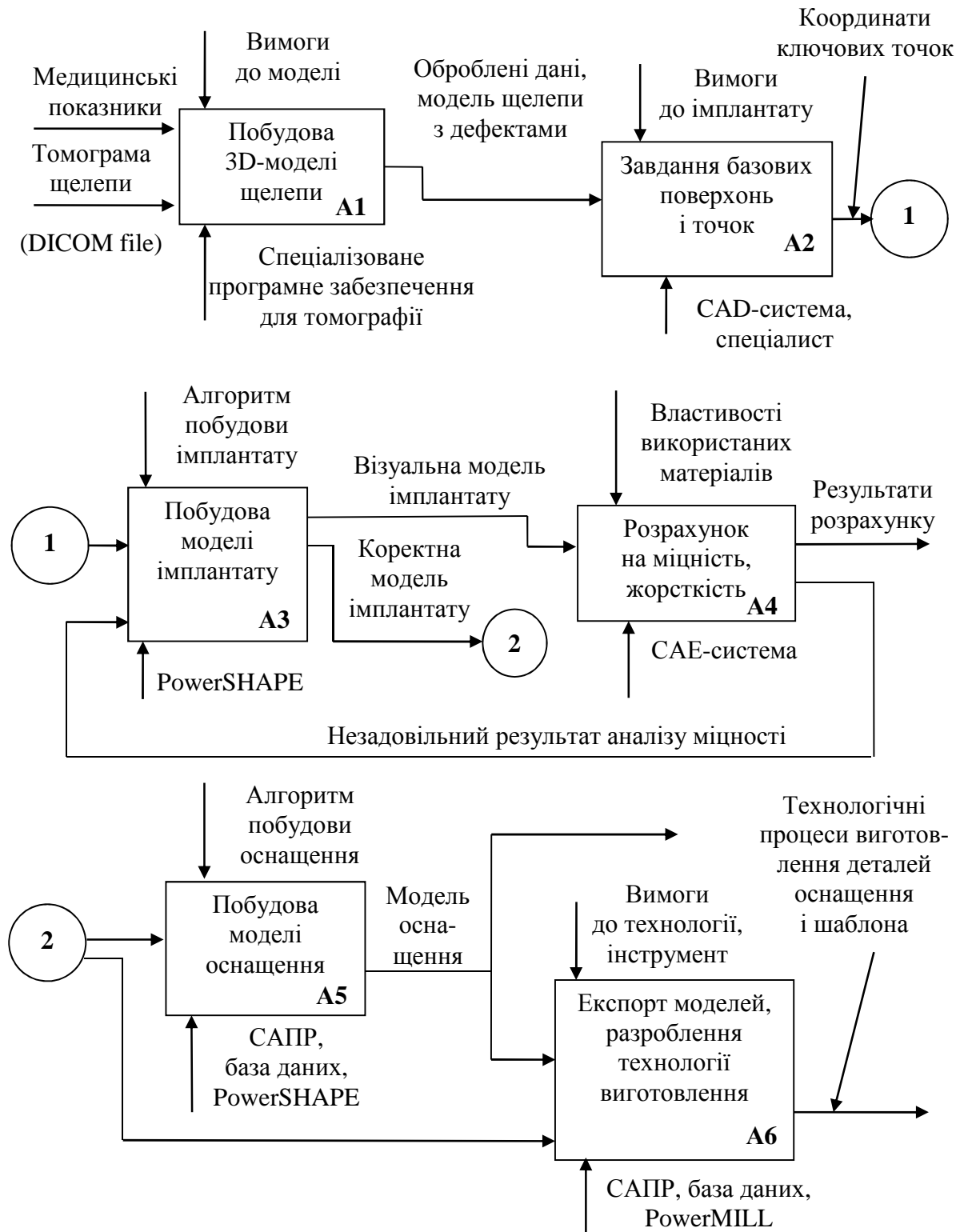


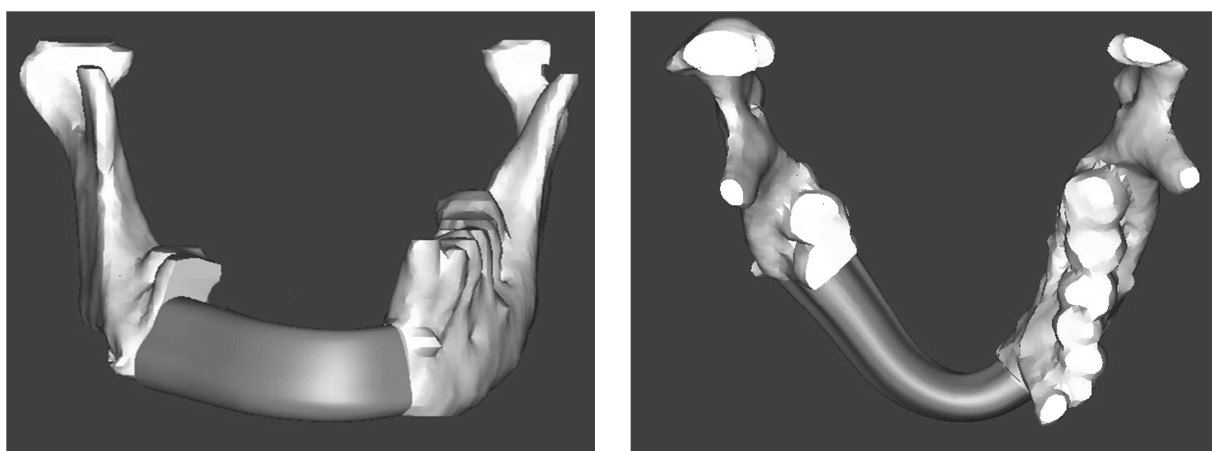
Рисунок 2.1 – Структурно-функціональна діаграма процесу «Проектування імплантату і оснащення»

Передана модель має формат, відмінний від формату PowerSHAPE, через що можливості роботи з нею обмежені. Щоб зробити можливою повноцінну роботу з моделлю побудованих імплантату і оснащення, необхідно виконати її конвертацію на основі використання стандартизованих форматів обміну даними (STEP, IGES ISO, HSF тощо).

Після оброблення моделі щелепи фахівець вказує на ній базові поверхні й точки, необхідні для побудови й установлення імплантату А2. Далі на основі прив'язки імплантату до щелепи виконується його побудова за відповідним алгоритмом А3.

Після побудови геометричної моделі користувачем, вона зберігається й передається для моделювання навантажень і розрахунку міцності виробу А4. Розрахунок міцності виконується із застосуванням САЕ-системи й регламентується схемою навантаження й властивостями вживаного матеріалу. Якщо результати розрахунку міцності задовольняють вимогам, то модель імплантату, що пройшла перевірку на міцність, передається для побудови моделі оснащення А5, необхідного для отримання виробу. Інакше робиться перерахунок і нова побудова моделі імплантату. Побудова моделі оснащення виконується в САПР автоматично після параметричного налаштування й регламентується алгоритмом побудови. Після закінчення процесу проектування моделей деталей оснащення, вони передаються в САПР механооброблення А6 для проектування технологічного процесу виготовлення на верстаті з ЧПК.

Розглянемо процес проектування імплантату на конкретному прикладі. Початкові результати томографії й форма імплантату були надані авторами статті [2] (Донецький національний медичний університет ім. М. Горького). САD-модель імплантату для остеосинтезу в щелепно-лицьовій хірургії наведено на рис. 2.2.



а

б

*а – вид спереду; б – вид зверху*

*Рисунок 2.2 – 3D-модель «складання» фрагментів нижньої щелепи з імплантатом [2]*

Методика побудови поверхні імплантату має бути універсальною і допускати можливість коригування форми. Для цього розробимо узагальнений алгоритм із використанням січних площин, який дозволяє отримати масив перерізів імплантату площинами, перпендикулярними до тієї, що його утворює. Варіація кількості перерізів дозволяє змінювати точність побудови поверхні виробу. Наявність перерізів забезпечує можливість ко-

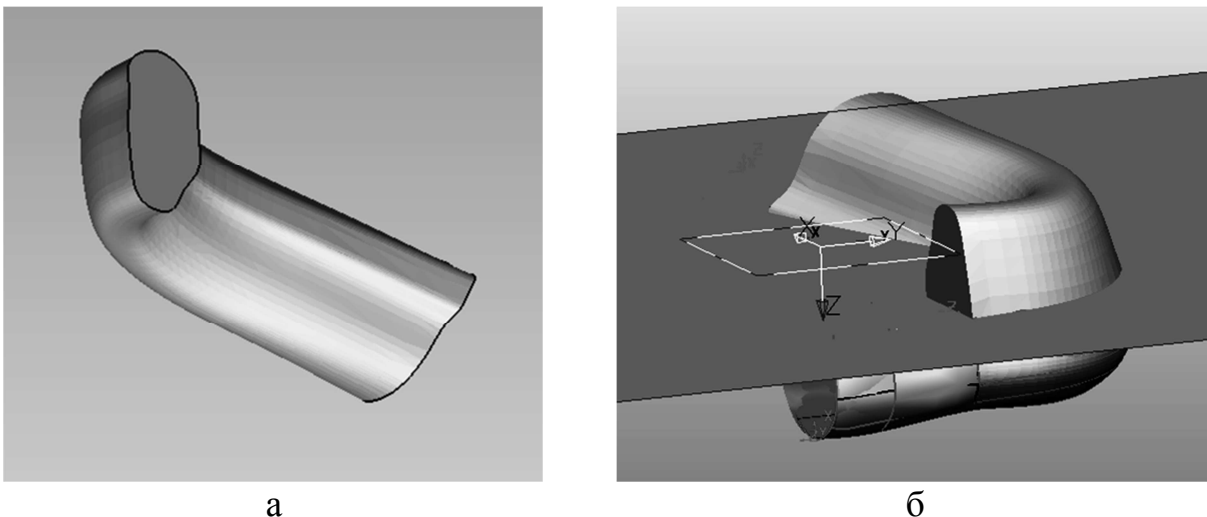
ригування профілю імплантату з подальшою побудовою його поверхонь з урахуванням товщини заготовки і шаблона (пуансона) для його отримання.

Слід також відмітити, що поверхня шаблона відрізняється від імплантату за рахунок того, що в процесі просторового деформування спостерігається пружинення титанової заготовки.

Розглянемо етапи розробленого алгоритму [4].

1. Побудова імплантату розпочинається з імпорту початкової моделі, отриманої в результаті оброблення томограми пацієнта.

Імпортована модель не є тілом PowerSHAPE й можливості роботи з нею обмежені, тому необхідно її перебудувати. Побудову площини перерізу для подовжнього розділення моделі імплантату й отримання поверхні для проектування шаблона показано на рис. 2.3. Нижня частина поверхні виконана подовженою для кріплення імплантату на кістках щелепи (рис. 2.3, б). Для відпрацюванні технології побудови моделі розглядали нижню й верхню частини, хоча реально для імплантату застосовується нижня поверхня щелепи, а висота імплантату складає 0,5...0,7 від висоти кістки. Далі показаний найбільш універсальний варіант побудови однієї з частин.



*Рисунок 2.3 – Вихідна модель (а) і переріз для виготовлення імплантату й шаблона (б, повернуто для більш зручної побудови)*

2. Побудуємо другу площину перерізу перпендикулярно основі так, як показано на рис. 2.4, а. Розміри площини мають бути збільшені по відношенню до розмірів імплантату, щоб гарантовано повністю перетнути його модель.

3. Виконуємо копіювання площин перерізу вздовж усього тіла імплантату. Для цього використовується інструмент «Створити масив» з вкладки загального редагування. У якості напрямної кривої використовується одна з тих, що утворюють основу імплантату. Усі площини будуються перпендикулярно утворюваній через заданий інтервал. Від кількості площин перерізу залежить точність проектування, однак занадто велика їх кількість може привести до втрати продуктивності системи.

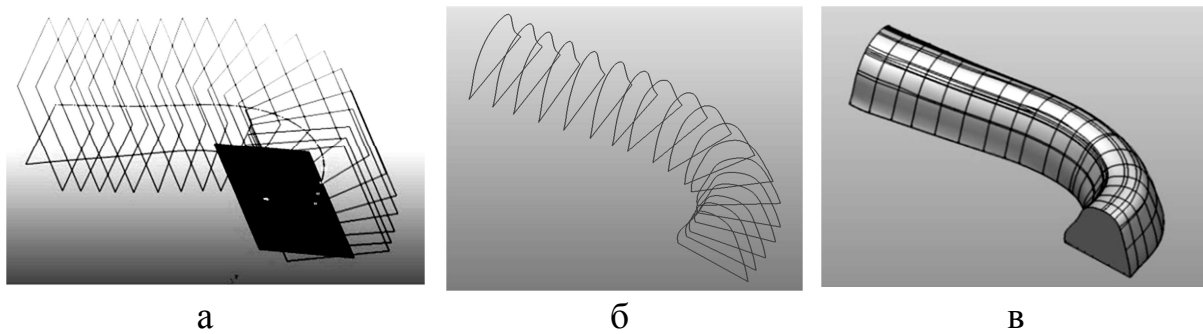


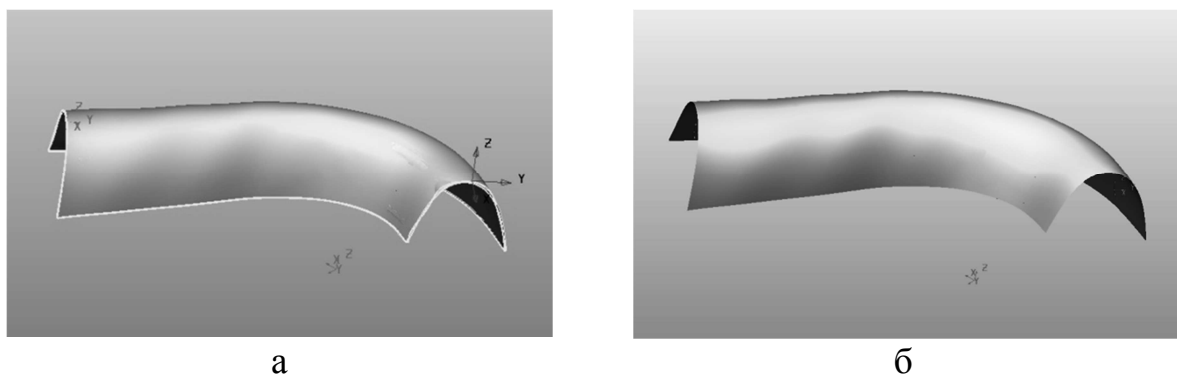
Рисунок 2.4 – Побудова масиву перерізів (а, б) і отримане тіло (в) для формозмінного інструмента (шаблону)

4. Застосувавши до отриманого масиву площин інструмент «Переріз поверхні», отримуємо набір з перерізів початкової моделі імплантату (рис. 2.4, б). Наявність перерізів дозволяє робити коригування форми імплантату й розрахувати розгортку для отримання форми плоскої листової заготовки.

5. Виконуємо побудову імплантату за перерізами (рис. 2.4, в), використовуючи інструмент «Побудувати тіло за перерізами вздовж прямої» з вкладки роботи з тілами. У якості прямої використовується одна з твірних основи імплантата. Отримане в результаті побудови тіло буде перебудованою копією початкової моделі у форматі, який підтримується PowerSHAPE і може бути відредаговано.

За необхідності виконується еквідистантне зміщення поверхні для врахування товщини листа (рис. 2.5, а, б). Аналогічно з використанням коригування масиву перерізів (рис. 2.4, б) виконується врахування пружинення заготовки в процесі деформування.

6. Виконуємо додавання технологічних припусків до обох кінців шаблону і по контуру імплантату. Припуски мають два призначення: перший припуск (конструктивний) забезпечує розміщення імплантату над фрагментами кістки для кріплення шурупами, другий (технологічний на шаблоні), щоб виключити нависання заготовки над торцевими краями шаблону.



а – контроль якості апроксимації вихідної поверхні;  
б – еквідистантне зміщення поверхні для врахування товщини листа  
Рисунок 2.5 – Побудова поверхні для шаблону інструмента (пуансона)

Технологічний припуск по контуру заготовки буде видалений у процесі чистового оброблення виробу. Для їх отримання виконаємо витягування тіл з перерізів кінців імплантату й шаблона перпендикулярно площини перерізу (рис. 2.6, а).

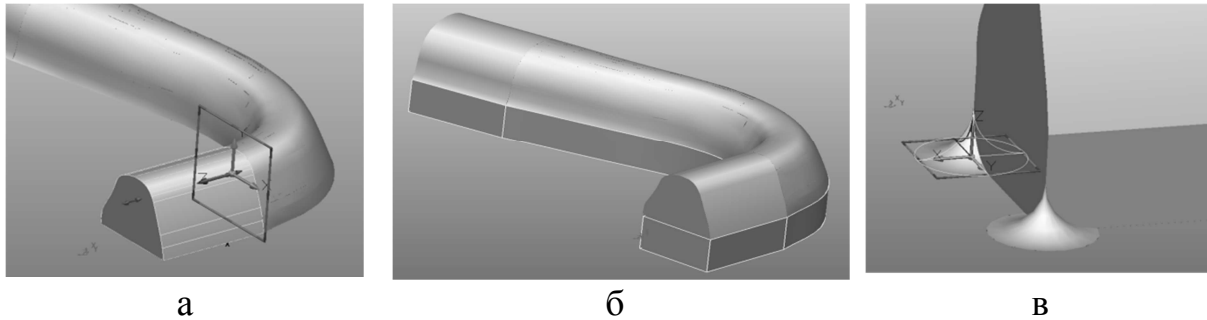


Рисунок 2.6 – Додавання технологічних припусків по краях шаблона (а), тіла спуску до основи шаблона (б) і формування заокруглень в основі шаблона (в)

7. Додавання тіла спуску і його округлення. Спуск забезпечує розміщення припуску по контуру листової заготовки при деформуванні.

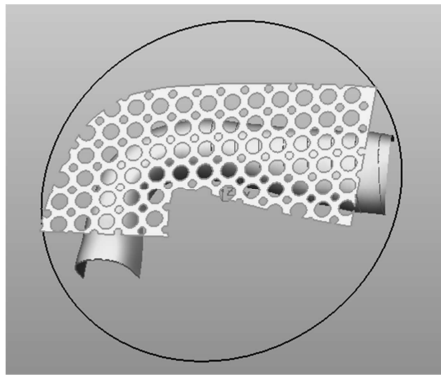
Для отримання тіла спуску виконаємо витягування тіла з перерізів основи імплантату і припусків на його кінцях у перпендикулярному до попереднього напрямку (рис. 2.6, б). Для отримання заокруглення спуску необхідно побудувати його контур, а потім виконати операцію «Створити тіло по перерізу вздовж напрямної». Для заповнення просвітів по кутах побудуємо тіла шляхом обертання перерізу навколо осі й заповнимо ними просвіти, поєднавши осі обертання з бічними гранями спуску імплантату (рис. 2.6, в). Такий підхід забезпечує оптимальне переміщення радіусної фрези по контуру шаблона при його виготовленні.

8. Додавання й обрізування основи. Основа є уніфікованою частиною шаблона, щоб зафіксувати його положення в контейнері. Для проектування моделі основи будуємо поверхню в основі спуску так, щоб шаблон імплантату й листові заготовки були повністю розміщені на поверхні. Потім виконаємо витягування тіла з поверхні на задану величину товщини основи й обрізування основи по діаметру контейнера (рис. 2.7, а), у якому буде проводитися деформування.

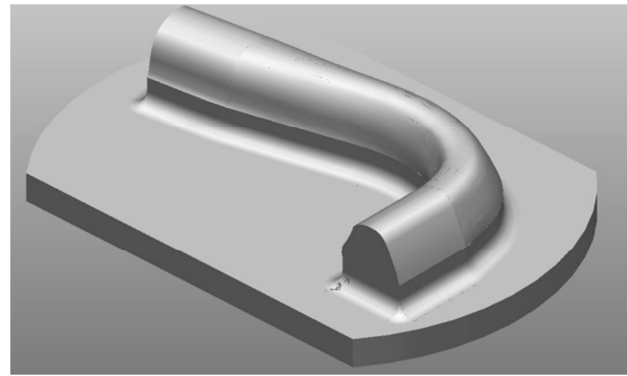
У результаті отримали готовий шаблон (рис. 2.7, б) для виготовлення листового імплантату, де основу спроектовано під універсальний контейнер для формування імплантату поліуретаном.

Для визначення навантажень, що діють на імплантат у процесі експлуатації (при жуванні), він був промодельований у САЕ-системі. Для дискретизації об'єму і розрахунків були використані чотирьохвузлові тетраедральні скінченні елементи. Застосовувалася рівномірна сітка по двадцять елементів вздовж кожної з твірних і по два елементи уздовж товщини пластини (рис. 2.8).



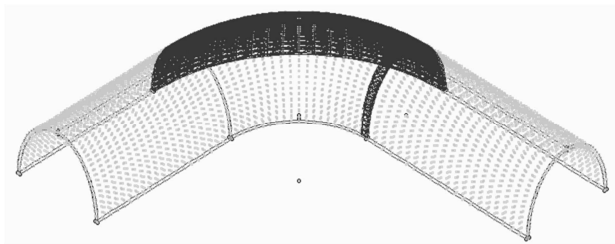


а

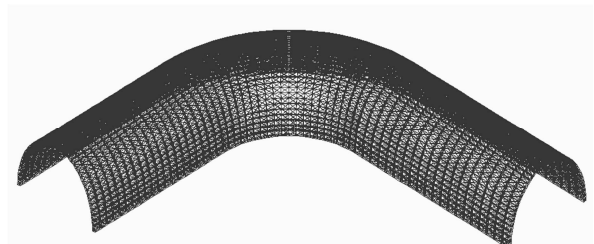


б

*а – розташування моделі поверхні шаблону і заготовки на площині поліуретану в контейнері (нижня частина); б – верхня частина  
Рисунок 2.7 – Модель шаблону для отримання імплантату*



а



б

*а – у процесі розбиття на скінченні елементи; б – після розбиття  
Рисунок 2.8 – Імплантат з нанесеними вузлами (сіткою)*

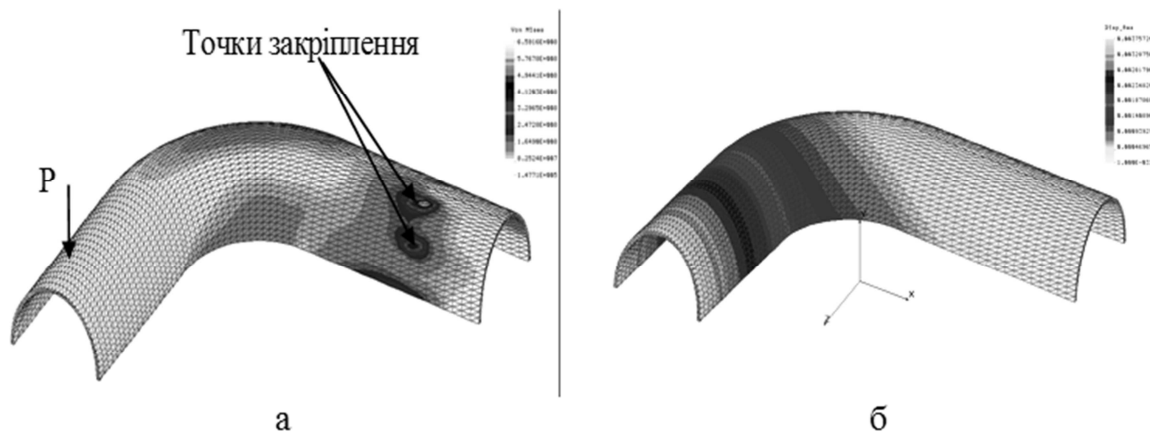
Було розглянуто два варіанти розрахунків (при цьому напрямки навантажень при всіх видах розрахунків змінювалися на протилежні, тому що нижня щелепа рухлива):

1. Закріплений був один з країв на відстані 10 мм від межі з кроком 6 мм. Навантаження прикладене до іншого краю вертикально. Цей розрахунок моделює ситуацію, коли жування відбувається на іншу (непошкоджену) сторону щелепи.

2. Закріплено обидва краї, а навантаження спрямоване вертикально вниз, рівномірно розподілене вздовж верхньої твірної. Другий розрахунок моделює процес жування на протезованому боці щелепи й характеризується більш рівномірним розподілом навантажень.

Результати розрахунків за першим варіантом навантаження наведено на рис. 2.9. Значення сили взято 100 Н як максимальне зусилля при жуванні.

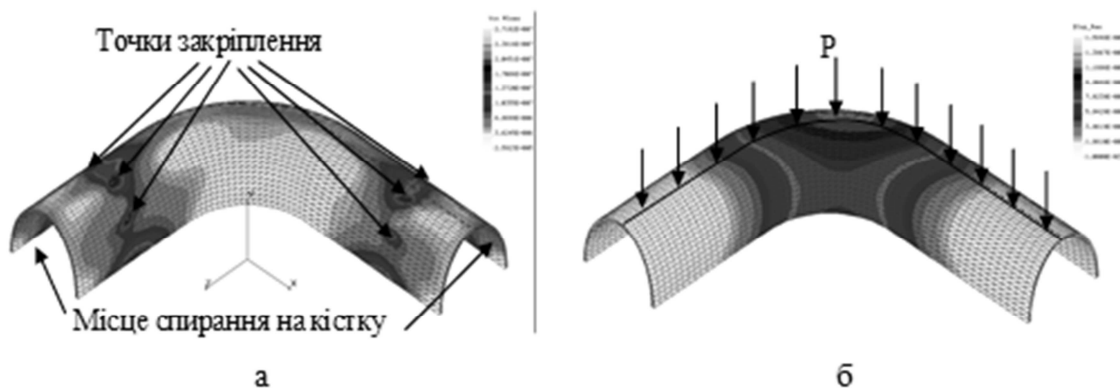
Слід зазначити, що при таких значеннях навантажень величини еквівалентних напружень у місцях закріплення гвинтами імплантату на щелепній кістці досягають 659 МПа, що можна порівняти з межею міцності титанових сплавів. Збільшення товщини титанового листа, з якого виготовлений імплантат, практично не зробить ефекту, тому що найбільший внесок у величини напруги вносить зминання листа в місцях розташування гвинтів.



*а – еквівалентні напруження за Мізесом; б – переміщення  
Рисунок 2.9 – Результати розрахунку (варіант 1 – навантаження,  
прикладене до одного краю, другий закріплений)*

Ефективним у цьому разі є збільшення кількості точок закріплення, наприклад, за рахунок додавання другого ряду гвинтів. Слід зазначити, що найбільші переміщення точок імплантату спостерігаються в місці прикладання навантаження й досягають 3,8 мм, що є неприпустимим і має бути зменшені підбором товщини листа, з якого виготовлений імплантат, і обмеженням навантаження.

Моделювання процесу жування на протезованому боці щелепи показало, що відбувається більш рівномірний розподіл навантажень (рис. 2.10). Це призводить до більш низьких значень напруг і деформацій.



*а – еквівалентні напруження за Мізесом; б – переміщення  
Рисунок 2.10 – Результати розрахунку (варіант 2 – навантаження  
рівномірно розподілене вздовж верхньої твірної, закріплені обидва краї)*

Крім того, слід враховувати, що закріплення тут виконується не тільки гвинтами, але імплантат також спирається своїми краями (10...15 мм) на цілі частини щелепної кістки. Максимальні еквівалентні напруги при такому варіанті навантаження й закріплення знаходяться в місці з'єднання кістки й імплантату, тому що виникають значні напруги стискування, але їх величина (272 МПа) нижча від межі міцності титану й тому ці напруги не є небезпечними для імплантату. Значення максимальних пере-

міщень (0,16 мм) також є допустимими. Однак допустимі напруги природно визначаються міцністю кістки щелепи й вимагають додаткового аналізу.

### 2.3 Розроблення САПР оснащення для отримання імплантатів пластичним деформуванням на основі інтеграції з САД-системою PowerSHAPE

Для побудови оснащення було розроблено САПР Implantat. Додаток інтегровано з САД-системою PowerSHAPE і виконує в ній побудову виробів на основі параметричної моделі деталей штампу. Інтеграція забезпечується за рахунок використання бібліотеки API функцій PowerSolutionDOTNetOLE, розробленої фірмою Delcam. Для автоматизованої побудови виробів використовується додатково розроблена бібліотека функцій, яка є надбудовою над макросами й реалізує роботу з об'єктами в PowerSHAPE. Додаток написано на мові C # .NET.

Параметрична модель оснащення дозволяє довільно змінювати розміри елементів, зберігаючи конфігурацію й цілісність конструкції за рахунок завдання розмірних зв'язків (залежностей) змінюваних параметрів від декількох базових. Значення базових і змінюваних параметрів можуть зберігатися в базі даних або задаватися в процесі побудови користувачем. Таким чином, параметрична модель містить інформацію про вигляд геометричної моделі і зв'язки розмірів цієї моделі, а також таблицю значень розмірів (або коефіцієнтів) за замовчуванням.

Для спрощення процесу проектування виробів у PowerSHAPE за допомогою макросів було створено бібліотеку методів, які згруповані за функціональним призначенням. Класифікація ділить методи на групи, що дозволяє спростити пошук необхідного методу при програмуванні (рис. 2.11).

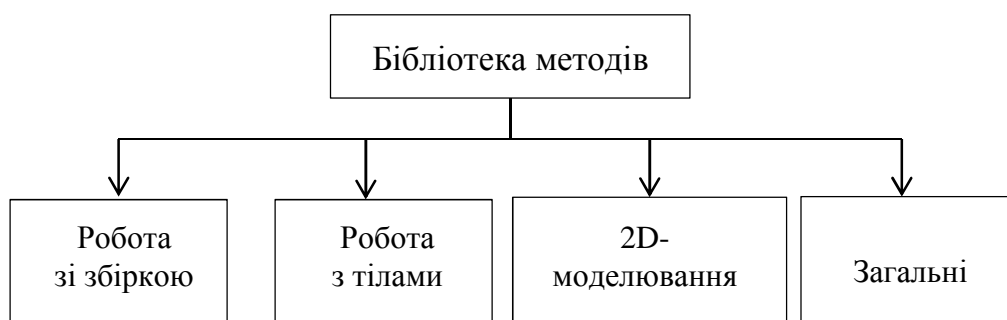


Рисунок 2.11 – Класифікація за функціональним призначенням методів (функцій) побудови виробів

У табл. 2.1 наведено повний список розроблених методів, які містяться в бібліотеці, що підключається динамічно (.dll) і дозволяє оновлювати її при додаванні нових функцій.

Таблиця 2.1 – Список методів побудови виробів

Назва	Передані параметри	Опис
CreateAssembly	assemblyName – ім'я збірки; assemblyDescription – опис збірки; assemblyClass – клас збірки	Метод створює збірку. Якщо збірка успішно створена – true, інакше – false.
AddDetailFromFileToAssembly	assemblyName – ім'я збірки; objectName – ім'я завантаженої деталі; fileName – повний шлях до файлу з деталлю; targetPoint – координати точки, куди вставляється деталь	Метод завантажує шаблон деталі з файлу в збірку. Якщо деталь успішно завантажена – true, інакше – false.
DeleteDetail	assemblyName – ім'я збірки; detailName – ім'я деталі	Метод видаляє деталь зі збірки.
RotateElement	elementName – ім'я елемента; axe – вісь обертання; angle – кут повороту	Обертання елемента збірки.
SetParameter	parametrName – ім'я параметра; parametrValue – нове значення параметра	Завдання параметрів елемента збірки.
CreateCurve	points – масив точок, за якими будується крива; name – ім'я кривої, яке буде встановлено після побудови	Побудова кривої за точками.
CreateSpline	Points – масив точок, за якими будується сплайн; name – ім'я сплайна, яке буде встановлено після побудови	Побудова сплайну; Повертає – true у разі успіху, інакше – false.
CreateArc	Name – ім'я дуги; Center – центр дуги; R – радіус дуги	Побудова дуги.
CreateSolid	Name – ім'я тіла, яке буде побудовано; Length – довжина витягування тіла	Створення тіла витягування.
CreateComponent	Name – ім'я тіла, з якого буде створено однойменний компонент	Перетворення тіла в компонент.
PointToPoint-Relation	assemblyName – ім'я збірки; firstObjectName – точка першого об'єкта; firstObjectPoint – точка першого об'єкта; secondObjectName – ім'я другого об'єкта	Зв'язування двох об'єктів за точками. У разі успіху повертає – true, інакше – false.

Продовження таблиці 2.1

Назва	Передані параметри	Опис
PlaneToPlane-Relation	assemblyName – ім'я збірки; firstObjectName – ім'я першого об'єкта; firstObjectPlane – центр площини першого об'єкта; firstObjectView – положення першої площини в просторі; secondObjectName – ім'я другого об'єкта; secondObjectPlane – центр площини другого об'єкта; secondObjectView – положення другої площини в просторі	Зв'язування двох об'єктів по поверхні. У разі успіху повертає – true, інакше – false.
LineToLine-Relation	assemblyName – ім'я збірки; firstObjectName – ім'я першого об'єкта; firstObjectFirstPoint – перша точка першого об'єкта; firstObjectSecondPoint – друга точка першого об'єкта; secondObjectName – ім'я першого об'єкта; secondObjectFirstPoint – перша точка другого об'єкта; secondObjectSecondPoint – друга точка другого об'єкта	Зв'язування двох об'єктів по лініях. У разі успіху повертає – true, інакше – false.
ChangeView	View – вид, який буде встановлений.	Установлення заданого виду в CAD-системі.

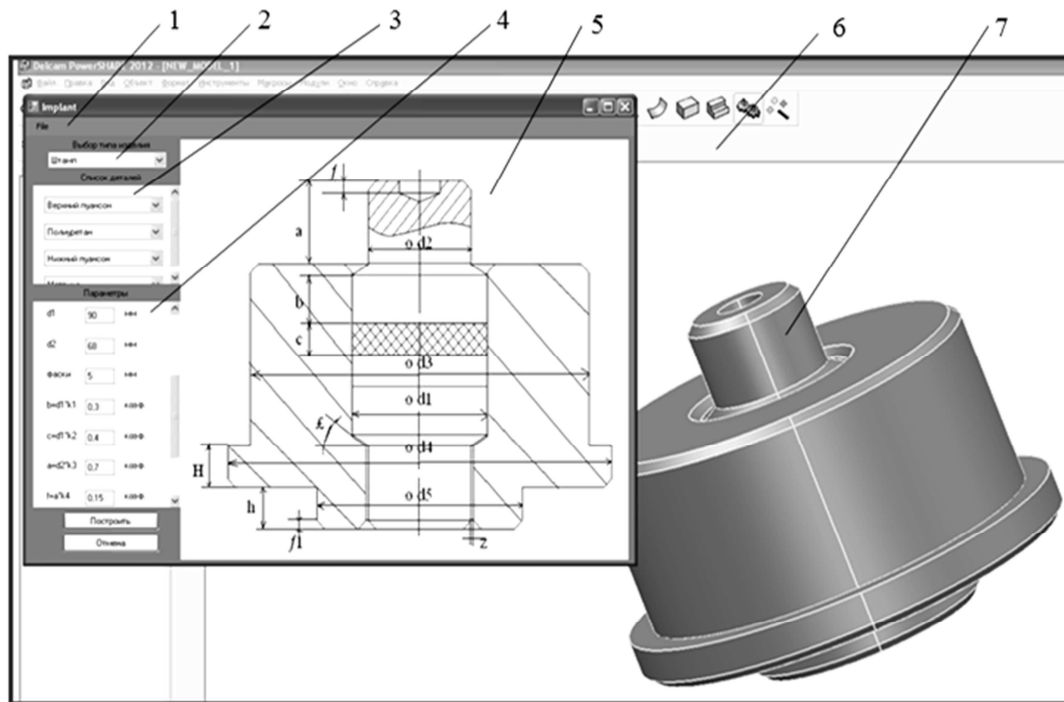
Для передання макросу в PowerSHAPE використовується бібліотека PowerSolutionDOTNetOLE: створюється об'єкт класу clsPowerSHAPEOLE і передається команда методом clsPowerSHAPEOLE.Execute(""). Після отримання команди CAD-система виконує її так само, як просто запустити на виконання макрос з графічного меню.

Для отримання інформації про об'єкт використовується команда clsPowerSHAPEOLE.Evaluate ("SELECTION.NUMBER").

Додаток повинен мати можливість побудувати виріб, причому розміри виробів повинні змінюватися. Тому параметри елементів оснащення параметризовані й основна маса розмірів розраховується вже в процесі проектування. Розмір діаметра контейнера, отриманий при проектуванні шаблону й розгортки заготовки імплантату, є базовим. На рис. 2.12 наведено головну форму розробленого програмного продукту.

Моделі вісесиметричних деталей можна отримати з контуру перетину. Для побудови кожної деталі виконується розрахунок масиву точок для контуру перетину (див. рис. 2.12). Далі виконується виклик функції для побудови контуру за точками. У функцію передаються масив розрахо-

ваних точок і ім'я, яке буде присвоєно побудованому контуру. Потім виконується отримання тіла з контуру. При виклику методу задаються параметри моделі, за якими будується тіло в PowerSHAPE (див. табл. 2.1).



1 – інтерфейс САПР Implantat; 2 – вікно вибору елемента;  
 3 – меню налаштування; 4 – вікно введення параметрів; 5 – кресленик деталі; 6 – інтерфейс PowerSHAPE; 7 – об'ємна модель деталі  
 Рисунок 2.12 – Головне вікно САПР оснащення після завантаження параметрів з бази даних і побудови в PowerSHAPE

Для початку роботи з додатком необхідно вибрати тип виробу, який ми хочемо спроектувати. Особливістю програми є те, що інтерфейс користувача формується динамічно в залежності від типу виробу. Параметри деталей виробів зберігаються в базі даних MicrosoftAccess. Список виробів знаходиться в випадному списку «Вибір типу виробу» (див. рис. 2.12, п. 2). Значення типів виробів завантажуються в список з бази даних автоматично при запуску програми.

Як тільки тип виробу обраний, для нього буде показаний кресленик внутрішньої порожнини контейнера 5, а також складені списки деталей 3 і параметрів 4. Їх значення, як і список виробів, завантажуються з бази даних. Як видно з рис. 2.12, поля деталей для вибраного виробу і їх параметрів заповнюються значеннями «за умовчанням».

Як зазначалося, більшість розмірів виробів є параметризованими й розраховуються додатком на основі заданих. В інтерфейсі наведено формули параметричної моделі для розрахунку параметрів геометрії деталей оснащення на основі встановлення основних параметрів виробу. Для штамп – це діаметр внутрішньої порожнини, пов'язаний з розміром заготовки та шаблона. Базові значення коефіцієнтів для розрахунку параметрів збері-

гаються в базі даних, але можуть бути змінені в інтерфейсі САПР. Також можна задати в базі даних кілька варіантів для кожної деталі у виробі.

Результати проектування наведено на рис. 2.13.

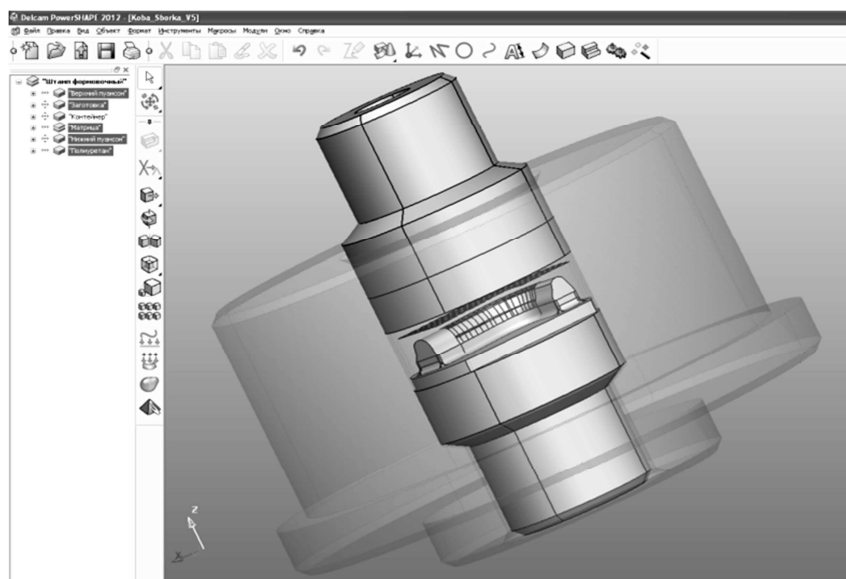
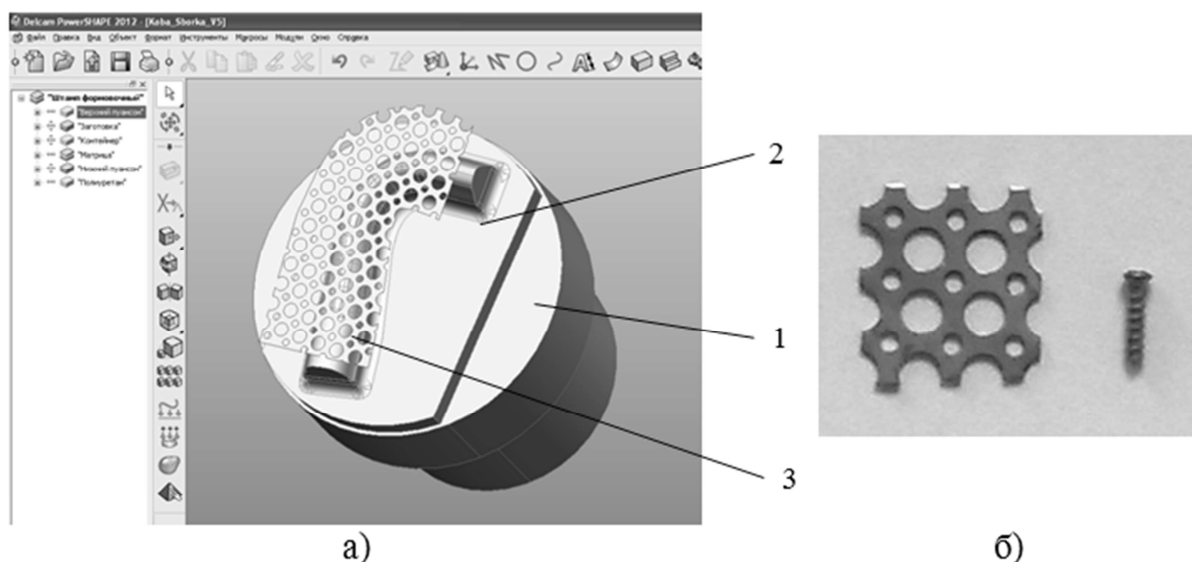


Рисунок 2.13 – Результат проектування штампового оснащення в САПР Implantat

Після задавання всіх необхідних параметрів і натискання кнопки «Побудувати» запускається алгоритм розрахунку й додаток виконує побудову виробу в середовищі PowerSHAPE в автоматичному режимі. Кнопка «Скасування» дозволяє скинути значення всіх полів і почати процес проектування знову. Шаблон і заготовка встановлені з використанням інтерфейсу PowerSHAPE (рис. 2.14).



1 – пуансон; 2 – шаблон; 3 – сітчаста листовая заготовка з титану  
Рисунок 2.14 – Результат проектування (а), вигляд сітки і шурупа для її кріплення з ВТ1-0 ГОСТ 19807- 91 (б) [1]

Таким чином, розроблена методика побудови імплантатів з листових заготовок і САПР на основі параметричної моделі технологічного оснащення для отримання імплантатів такого типу пластичним деформуванням поліуретану.

## 2.4 Розроблення САПР процесів оброблення на верстатах з ЧПК на основі інтеграції з САМ-системою PowerMILL

Для проектування технологічних процесів оброблення на верстатах з ЧПК було розроблено САПР іSAPR на основі інтеграції з САМ-системою PowerMILL, а також з використанням зовнішньої бази даних. Розроблено також структуру бази даних САПР технологічних процесів механічного оброблення. Застосування САПР розглянемо на прикладі виготовлення шаблону (деформівного інструмента штампового оснащення) для отримання імплантатів.

Процес проектування технології оброблення виробу в САМ-системі заснований на використанні універсального візуального інтерфейсу й макросів. Суть цієї роботи полягає в тому, щоб спростити взаємодію технолога з САМ-системою, заощадити його час при виконанні однотипної роботи за рахунок створення спеціалізованого візуального інтерфейсу безпосередньо для цього типу деталей. Схему взаємодії технолога з PowerMILL наведено на рис. 2.15.

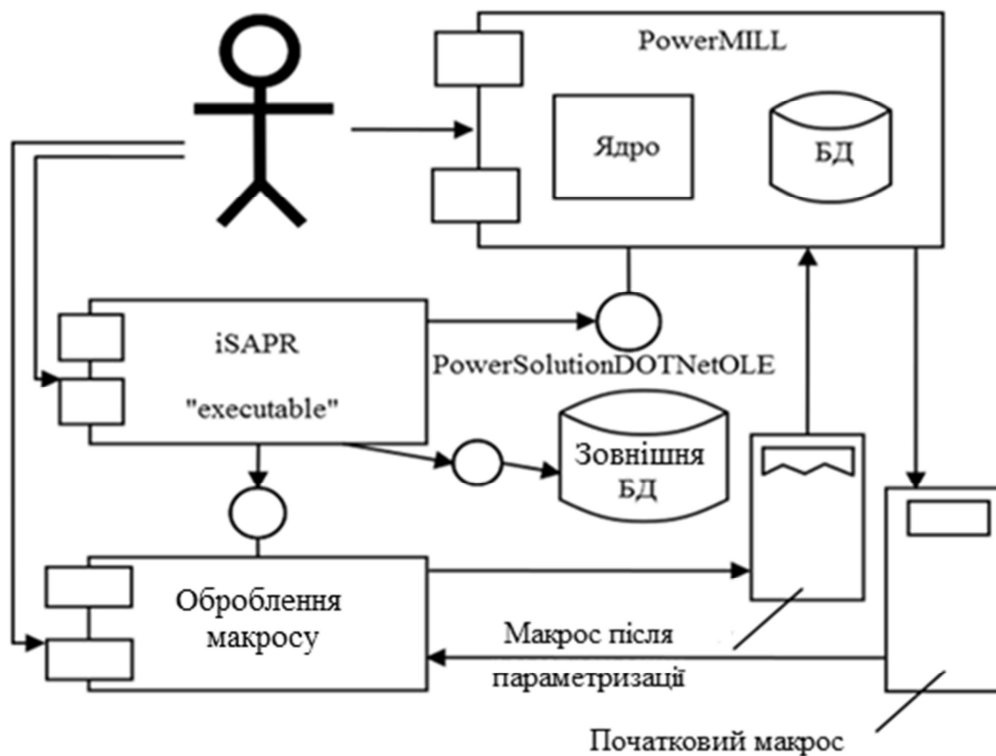


Рисунок 2.15 – Взаємодія користувача з САМ-системою з використанням розробленої інтегрованої САПР



На основі аналізу можливих варіантів інтеграції з PowerMILL розроблено САПР, яка може звертатися безпосередньо до API-інтерфейсу САМ-системи PowerMILL і далі за допомогою макросів виконувати необхідну роботу з проектування техпроцесу.

Перевагою системи є можливість передавати у зовнішню базу технологічні дані, зокрема параметри інструменту, дані про траєкторії, заготовки, поверхні й проходи інструменту. При такому підході САПР може стати частиною PDM-системи на підприємстві, до її склад можна включити і експертну систему, яка на основі взаємодії із зовнішньою базою даних буде підтримувати процес проектування за рахунок аналізу накопиченого досвіду оброблення різних деталей.

За рахунок контролю над інтерфейсом забезпечується налагодження процесу проектування під виготовлення конкретних деталей з поділом функцій проектування: досвідчений провідний технолог розробляє послідовність операцій оброблення, а інші мають можливість параметричного налагодження технологічного процесу, що знижує загальну трудомісткість проектування і підвищує гнучкість процесу виготовлення деталей у цілому.

Таким чином, САПР за рахунок інтеграції та передавання інформації до зовнішньої бази даних стає не тільки місцем роботи для технологів, а й аналітиків, і інших співробітників, пов'язаних із загальною системою керування підприємством.

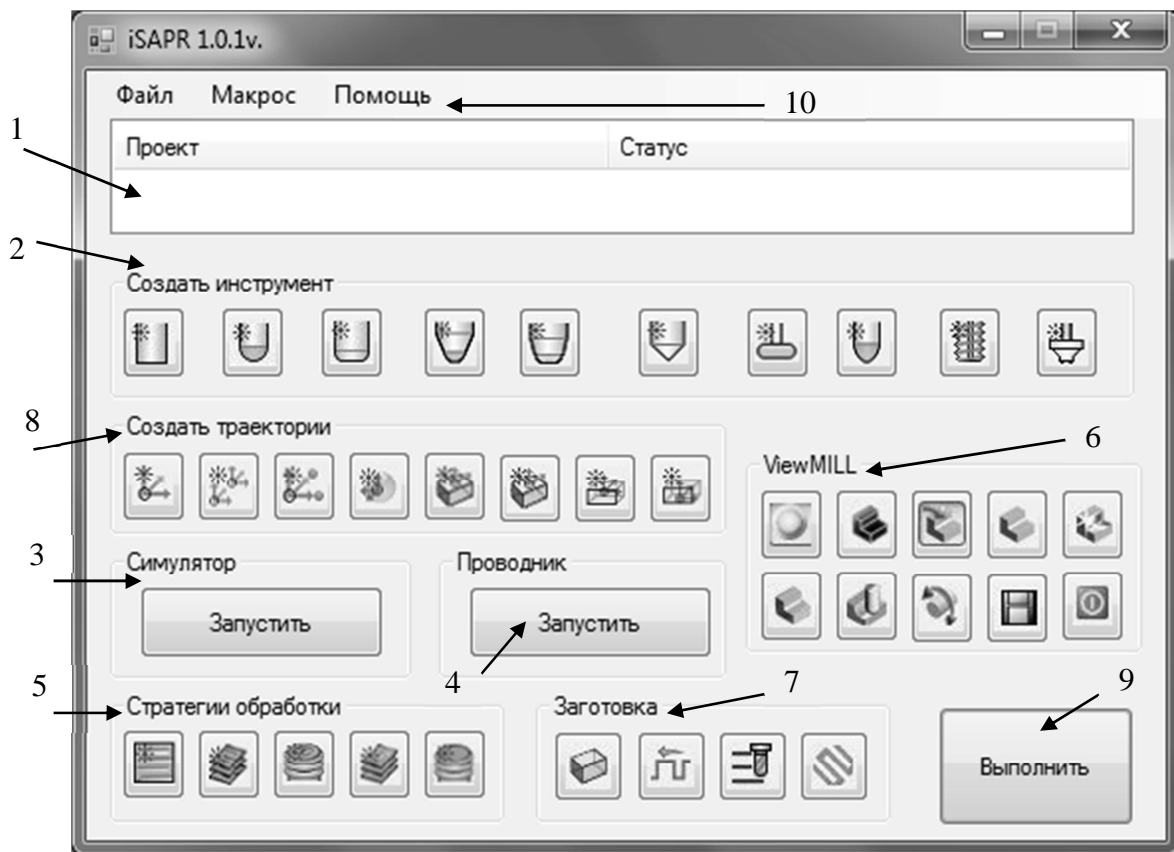
Інтеграція з САМ-системою PowerMILL реалізовано за допомогою dll-бібліотеки PowerSolutionDOTNetOLE. Для виконання функцій PowerMILL, а також діалогових вікон PowerMILL застосовано макроси. Розроблено й частково реалізовано структуру зовнішньої бази даних для зберігання технологічної інформації. Додаток написано на мові VB.NET. Для того щоб збільшити гнучкість взаємодії з САМ-системою PowerMILL, розроблено модифікований інтерфейс для САПР (рис. 2.16), який у значній мірі повторює інтерфейс PowerMILL, що дозволяє скоротити час на його освоєння.

Розглянемо функції основних елементів програмної системи для проектування процесів оброблення на верстатах з ЧПК:

1. Поле проекту, в якому відображаються всі проекти, завантажено технологом у робочий час. Це поле містить два стовпці: «Проект» – відображає повний шлях до проекту у вигляді ... \ ProjectFolder \ project.pmlprj; «Статус» – статус виконання цього проекту. У цьому полі додаються відкриті проекти для швидкого вибору.

2. Створити інструмент. У цій групі розташовані кнопки, які відповідають за створення нового інструменту. Кнопки на згрупованій частини дозволяють створювати інструмент різної форми і з різними параметрами або завантажувати інструмент із зовнішньої бази даних.

3. Симулятор – кнопка запуску симулятора. Служить для керування візуалізацією оброблення заготовки, дозволяє запуснути візуалізацію, змінювати інструменти і типи оброблення, регулювати швидкість оброблення.



1 – поле проекту; 2 – створити інструмент; 3 – симулятор; 4 – провідник; 5 – стратегії оброблення; 6 – ViewMILL; 7 – заготовка; 8 – створити траєкторію; 9 – виконати; 10 – контекстне меню

Рисунок 2.16 – Базове вікно САПР iSAPR

4. Провідник – кнопка запуску провідника. Відображає дерево з повним переліком інструментів і заготовок, а також траєкторій проходу інструменту для кращої візуальної демонстрації того, що відбувається.

5. Стратегії оброблення. Дозволяє додавати нові стратегії оброблення виробу в існуючий технологічний процес, щоб розширити його можливості або скорегувати технологічний процес в разі змін на підприємстві.

6. ViewMILL. Дає можливість побачити заготовку безпосередньо в тому вигляді, у якому вона буде подана на верстаті. Дозволяє прибрати траєкторії оброблення й залишити тільки візуальне відображення проходів.

7. Заготовка. Також дозволяє коригувати технологічний процес у разі змін на підприємстві. Наприклад, якщо змінилися заготовки, що поставляються на підприємство, то слід змінити технологічний процес і переналаштувати обладнання під новий вид заготовок.

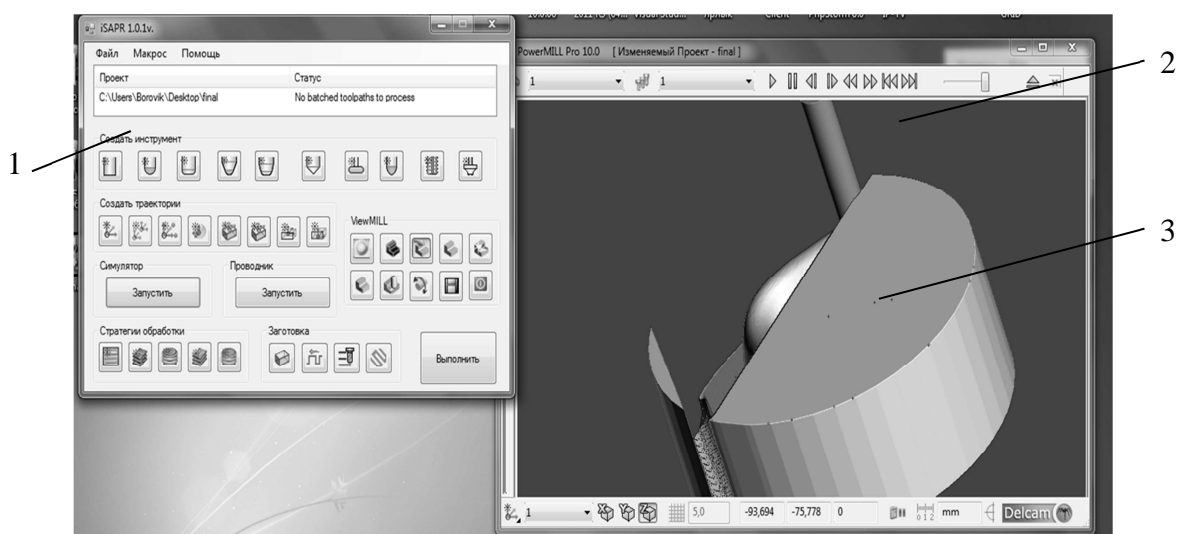
8. Створити траєкторії. Меню реалізує можливість створення нових систем координат для правильного установлення інструмента, а також для правильної вказівки підходу інструмента до заготовки.

9. Виконати. Кнопка запускає процес оброблення обраної заготовки в разі, якщо не потрібно вносити зміни в технологічний процес.

10. Контекстне меню. Призначене для спрощення інтерфейсу.

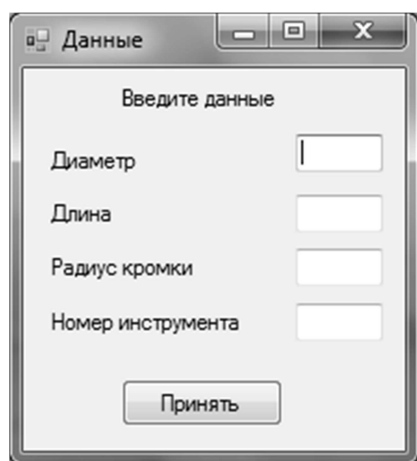
За необхідності внесення правок у разі структурного коригування технологічного процесу можна перейти до роботи в PowerMILL, тому що структура файлу проекту загальна.

Відразу при запуску САПР і SAPR автоматично завантажується PowerMILL. На рис. 2.17 показано загальне візуальне відображення вікон.

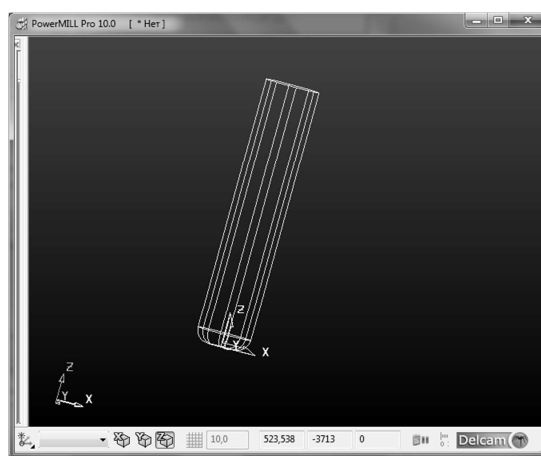


1 – інтерфейс САПР; 2 – інтерфейс PowerMILL; 3 – візуалізація оброблення шаблону для отримання листового імплантату  
Рисунок 2.17 – Головне вікно програми після завантаження САПР iSAPR на основі PowerMILL

На рис. 2.18 показано одне з діалогових вікон роботи із зовнішньою базою даних для задавання параметрів або вибору інструмента з відображенням його моделі в PowerMILL.



а



б

Рисунок 2.18 – Задавання параметрів або вибір інструмента із зовнішньої бази даних (а) з побудовою моделі в PowerMILL (б)

Наприклад, користувач натискає на необхідну кнопку (функція реалізована для інструмента «Кінцева фреза»). Після цього йому виводиться

діалогове вікно, у якому він може вказати номер нового інструмента, а також нові розміри. Після натискання на кнопку підтвердження параметризований макрос буде автоматично змінений, перезаписаний і запущений на виконання, при цьому в середовищі PowerMILL буде побудований новий інструмент із заданими параметрами.

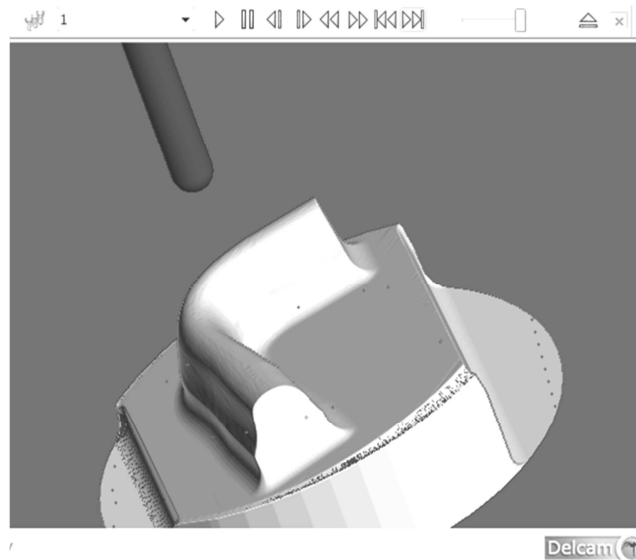
Такий підхід дозволяє користувачеві, що не володіє навичками ручного коректування макросів, легко коригувати й створювати нові інструменти, а САПР дозволяє додати інструмент із зовнішньої бази даних без застосування інтерфейсу PowerMILL. Як зазначалося, динамічна зміна виконуваного макросу дозволяє забезпечити параметричне коригування технологічного процесу.

Розглянемо алгоритм роботи з САПР iSAPR оброблення деталі.

1. Для початку роботи в створеній системі необхідно ввести початкові дані. Вкладка «Файл» дає користувачеві можливість «Відкрити проект», «Видалити проект» і «Закрити додаток». Вихідними є геометричні моделі виробів, попередньо вишикувані в САД-системі.

2. На цьому етапі необхідна перевірка формату файлів і за необхідності імпорт даних, щоб САМ-система PowerMILL сприймала інформацію.

3. Перевірені дані надають можливість відобразити візуальні обриси майбутньої деталі. На цьому етапі можна створювати й застосовувати траєкторії проходів інструментів, підбирати і конфігурувати інструменти. Також на цьому етапі підбираються оптимальні розміри заготовки, після чого запускається процес візуалізації оброблення (рис. 2.19).



*Рисунок 2.19 – Перегляд обробленої моделі в режимі 3D*

4. На цьому етапі отримуємо готовий технологічний процес, який у подальшому буде застосовуватися для виробництва таких самих деталей і, у разі необхідності, може бути відредагований технологом і запущений у виробництво. Також на цьому етапі ми отримуємо керівну програму для верстата з ЧПК.

5. Після того як сформований технологічний процес і записаний для технолога у файл проекту, керівна програма може бути передана на виконання на верстат з ЧПК. На цьому етапі ми отримуємо готову деталь.

Виготовлення розроблених у САПР деталей штампового оснащення (рис. 2.20) 1–4 і шаблона інструмента 5 було виконано на ЗАТ «НКМЗ» у цеху спеціального інструменту.



*1 – контейнер; 2, 3 – пуансони; 4 – матриця; 5 – шаблон*

*Рисунок 2.20 – Зовнішній вигляд виготовлених елементів універсального штампового оснащення для отримання імплантатів з листових заготовок пластичним деформуванням поліуретаном, побудованих у САПР на базі PowerSHAPE, і робочий інструмент-шаблон, технологію виготовлення якого розроблено в САПР на базі PowerMILL*

1. Спочатку було проведено грубе оброблення контурів заготовки кінцевою фрезою діаметром 40 мм, потім – більш точно кінцевою фрезою діаметром 16 мм.

2. Кінцевою фрезою діаметром 10 мм виконане чорнове оброблення, яке надало заготовці форму готового виробу.

3. Кінцевою фрезою діаметром 6 мм з повним радіусом здійснено чистове оброблення деталі до потрібних розмірів.

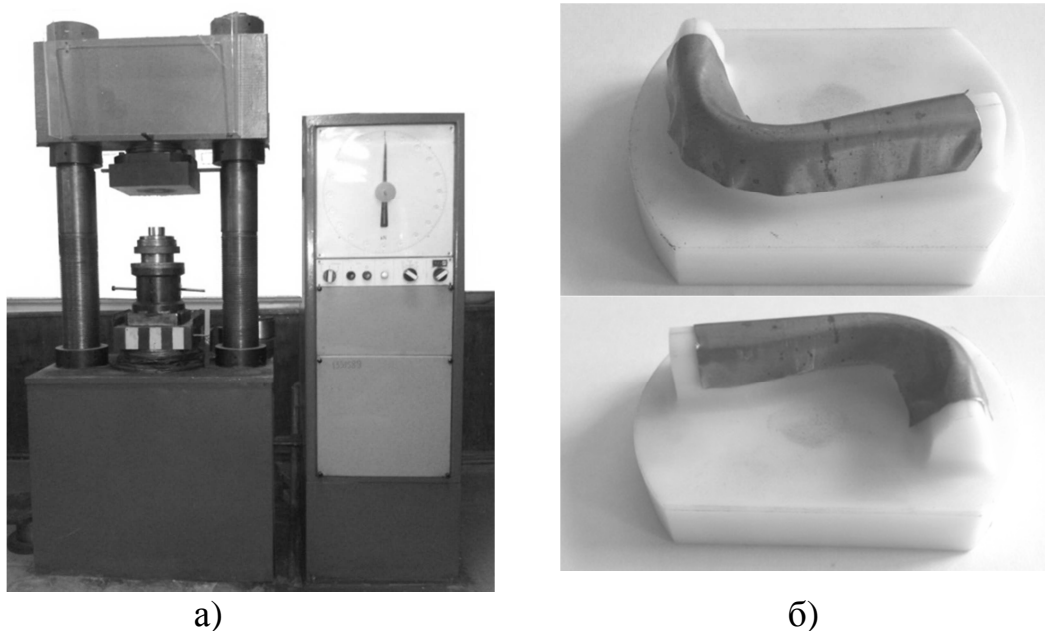
Швидкість різання на всіх етапах оброблення становила 1,7 м/с.

Виготовлене універсальне штампове оснащення для отримання імплантатів з листових заготовок пластичним деформуванням поліуретаном встановлювалося на гідравлічному пресі зусиллям 20 МН (рис. 2.21, а).

У контейнері містився нижній пуансон, поліуретанова матриця, на яку встановлювалася заготовка, вирізана по контуру, зверху розміщувався шаблон і верхній пуансон. Потім верхній пуансон навантажувався технологічним зусиллям і деформував заготовку поліуретаном на шаблоні.

Оскільки шаблон був виконаний з фторопласту, то для зниження робочих навантажень при відпрацюванні технології отримання моделі імплантату використовували заготовки з листової міді М1 завтовшки 0,2 мм,

а в якості пружної матриці – спінений поліуретан. Отримані зразки наведено на рис. 2.21, б. Експерименти показали, що внутрішня поверхня імплантату повністю відповідає шаблону, а зовнішня вимагає ручного доведення або коригування схеми деформування. У цілому ця технологія може бути використана для отримання листових імплантатів зі складною просторовою формою.



*Рисунок 2.21 – Установлення оснащення на пресі 20 МН і отримані зразки моделі імплантату (зразки з листової міді М1)*

Таким чином, у цій роботі розроблено методику і системи автоматизованого проектування імплантатів з листових заготовок і оснащення, а також ТП виготовлення їх на основі інтеграції з САД-системою PowerSHAPE і САМ-системою PowerMILL. Можливості інтеграції забезпечуються на основі використання DLL бібліотеки PowerSolution-DOTNetOLE фірми Delcam, у якій використано технологію OLE для зв'язку, передавання й отримання інформації.

## **Висновки за розділом 2**

1. Аналіз процесу конструювання й виготовлення імплантатів для щелепно-лицьової хірургії дозволив здійснити формалізацію процесу проектування просторових імплантатів з листових заготовок і універсального технологічного оснащення для отримання їх на основі даних томографії, виділити етапи й алгоритм проектування.

2. Розроблена методика побудови та числового розрахунку імплантатів дозволила виконати побудову об'ємних моделей імплантату і шаблону оснащення, необхідних для отримання імплантатів пластичним деформу-

ванням з листових заготовок. Розрахунки в САЕ-системі дозволили визначити напруги й деформації у виробі після установаження пацієнтові, що підвищує якість ухвалюваних конструктивних рішень.

3. Розроблено параметричну модель побудови штампового оснащення, що дозволяє виконати розрахунок і побудову виробів, визначити вимоги до програмного комплексу. Для автоматизації проектування оснащення розроблено параметричну геометричну модель і спеціалізовану САПР Implantat на основі інтеграції з PowerSHAPE.

4. Розроблено САПР для автоматизації проектування процесів оброблення на верстатах з ЧПК на основі інтеграції з PowerMILL. Її застосування дозволяє спростити роботу технологів, розділити функції й знизити ризики від внесення змін до технологічного процесу при його відпрацюванні на основі керування інтерфейсом користувача. Реалізовано інтеграцію розробленої САПР із зовнішньої базою даних для запису і подальшого оброблення даних про технологічний процес оброблення шаблонів на верстатах з ЧПК, що важливо для накопичення досвіду технологів і подальшого його використання для підвищення інтелектуальності САПР.

### Список використаних джерел

1. Конмет. Черепно-челюстно-лицевая хирургия. Каталог продукции. – М. : 2013. – 93 с. – URL: [www.conmet.ru](http://www.conmet.ru).

2. Чуйко, А. Н. Реконструкция посттравматического дефекта нижней челюсти с использованием современных компьютерных технологий (Подготовительный этап) / А. Н. Чуйко, Д. К. Калиновский // Современная стоматология. – 2013. – № 1. – С. 76–81.

3. Кульга, К. С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством : монография / К. С. Кульга, И. А. Кривошеев. – М. : Машиностроение, 2011. – 377 с.

4 Вермель, В. Применение PowerMILL в комплексной системе автоматизации «проектирование – производство» / В. Вермель, Е. Калитин, А. Шустов // САПР и графика. – 2000. – № 1 – С. 24–29.

5 Программное обеспечение токарно-фрезерных станков от компании DELCAM PLc // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. – 2008. – № 4. – С. 102–105.

6 Чуйко, А. Н. Биомеханика в стоматологии : монография / Чуйко А. Н., Шинчуковский И. А. – Х. : Форт, 2010. – 516 с.

7 Коба, Д. В. Автоматизированное проектирование и изготовление имплантатов с использованием САД/САМ-систем компании Delcam / Коба Д. В., Красько З. А. ; под руководством Тарасова А. Ф., Деньщикова А. Ю.) // САПР и графика. – 2014. – № 2. – С. 98–101.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБЛЕННЯ САПР ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ БРЕКЕТ-СИСТЕМ НА ОСНОВІ POWERSHAPE

### 3.1 Проблеми проектування виробів складної геометрії в галузі стоматологічної ортодонції

Огляд пацієнта дозволяє лікарю визначити необхідність ортодонтичного лікування, проте потім необхідно провести діагностичні дослідження, які включають отримання контрольних гіпсових моделей, фотографії особи в фас і профіль, внутрішньоротові фотографії, рентгенологічну діагностику – ортопантограму, застосувати телерентгенографію, сканування або томографію. При лікуванні за допомогою брекет-системи пацієнтові роблять фотографії з посмішкою. Оцінювання стану посмішки пацієнта також важливе, тому що одна з основних задач ортодонта – отримання оптимального результату лікування. Засоби діагностики дозволяють оцінити справжнє розташування зубів і коренів, положення зубів мудрості (третьох молярів), розташування щелеп по відношенню до основи черепа, кути нахилу зубів, дає можливість оцінити профіль пацієнта тощо [1–3].

Брекети приклеюються по одному безпосередньо на зуб і встановлюються в центрі зуба так, щоб їх пази були перпендикулярні до вертикальної осі зуба. При правильному установленні брекетів можна переміщати зуби в трьох площинах і розгортати навколо оісі.

Щелепи, зуби людини – індивідуальні і мають складну просторову форму. Тому для підвищення якості лікування потрібні засоби моделювання для зниження ризиків прийняття оптимального плану лікування в залежності від цілей і клінічної ситуації. У процесі лікування за допомогою брекет-системи пацієнт повинен приходити на корекції і контрольні огляди приблизно раз на місяць, при цьому, як правило, лікар-ортодонт змінює лігатури, дуги й інші елементи, стежить за динамікою зміщення зубів у процесі лікування.

Такий підхід пов'язаний з тим, що лікар у більшості випадків оцінює ситуацію візуально, а точність позиціонування брекетів визначається лікарем також візуально або за допомогою спеціальних інструментів. Однак попередня робота із загальної моделлю брекет-системи, як правило, не проводиться. Відсутні також засоби моделювання процесу впливу брекетів на зуби, отже, лікар повинен частіше контролювати й коригувати процес лікування. Розміри брекетів невеликі, що створює додаткові труднощі при визначенні просторового положення паза для дротяної дуги, напрямку і швидкості зсуву зубів.

Вирішити проблему моделювання установлення брекетів і дуг можна за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке інтегровано з САД-системою. Основною метою моделювання є визначення раціональ-



них параметрів взаємного позиціонування (установки) брекетів і зубів пацієнта і навантажень на зуби при установленні дротяної дуги брекет-системи, що дозволить більш точно прогнозувати поведінку всієї системи в цілому.

Вибір методів моделювання елементів брекет-системи визначається їх геометрією і поставленням задачі моделювання. Для цього розглянемо будову і принцип роботи брекет-системи.

Сучасні ортодонтичні апарати поділяються за принципом і способом дії, видом опори, місцем розташування, способом фіксування й виглядом конструкції. Брекет-системи різних видів відносять до незнімних апаратів.

Основним елементом у брекет-системі є брекет (bracket), який передає активне силове навантаження від дротяної дуги на зуб для його переміщення. Дужки-брекети фіксуються на поверхні зубів за допомогою спеціального клею. Напрямок переміщення зуба залежить від зусилля переданого зубу від дротяної дуги при допомозі брекета, а значить і будова та положення брекета безпосередньо залежить від того, у який бік і з яким зусиллям необхідно направити зуб. Профіль, перетин і сила натягу дротяної дуги також безпосередньо залежать від тієї мети, яку ставить перед собою лікар-ортодонт. Дуга фіксується на опорі, в якості якої виступають, як правило, кутні зуби щелепи.

Силкові дуги бувають різних перетину й діаметра, застосовуються дровові металеві дуги різних сплавів, які мають спеціальні властивості. Силова дуга, як правило, створюється з нікель-титанового сплаву, який має здатність пам'ятати форму і завдяки цьому в порожнині рота дуга прагне повернутися до початкової форми й переміщує за собою зуби незалежно від вихідної деформації.

Силова дуга передає через брекет певне зусилля на зуб пропорційно зміщенню від нейтрального положення. При цьому чим більше відхилення зуба від «ідеального» положення, тим і зусилля буде більшим. Однак поступово сила тиску на зуб зменшується, оскільки він повертається й приймає необхідне положення. У процесі лікування дуги кілька разів змінюють. На фінальних стадіях звичайно використовуються більш жорсткі дуги, часто квадратного перетину.

Найбільш сучасними, фізіологічними й ефективними вважають системи брекетів, які забезпечують ковзання брекетів щодо дуги. У них не потрібно долати силу тертя в кріпленні брекета до дуги, що дозволяє автоматично перерозподіляти сили в процесі зсуву зубів, створювати малі неперервні сили для впливу на переміщувані зуби. Це дозволяє збільшити термін між оглядами й корекціями приблизно у 2 рази.

Моделювання брекет-систем із використанням САПР є перспективним напрямком, оскільки дозволяє скоротити терміни проектування моделі й підвищити точність створюваного об'єкта з урахуванням індивідуальних особливостей кожного пацієнта. Для реалізації САПР брекет-систем необхідно вирішити такі завдання:

- 1) моделювання геометрії зубів людини 1 позиціонування їх один відносно одного;
- 2) установлення брекетів на зуби для вивчення й коригування їх просторового розташування;
- 3) установлення дротяної дуги для з'єднання брекетів у єдину систему;
- 4) розрахунок навантажень на зуби з метою аналізу й вибору раціонального розміщення брекетів на об'ємній моделі щелепи (зубів) пацієнта.

## **3.2 Розроблення процесу автоматизованого проектування брекет-систем**

### **3.2.1 Поставлення задачі проектування брекет-систем**

Виділення завдань і меж процесу моделювання дозволяє визначити зовнішній інтерфейс автоматизованої системи проектування й задокументувати зовнішній і внутрішній документообіг системи. Формалізуємо входи і виходи бізнес-процесу. Опис послідовності процесу автоматизованого проектування під час роботи програмного продукту наведено у формі SADT-діаграми (рис. 3.1).

На вході програмної системи з боку зовнішніх клієнтів (пацієнта стоматологічної клініки і лікаря-стоматолога) подаються дані про пацієнта, отримані при первинному огляді лікарем, а також дані 3D-моделі щелепи, виконаної стоматологом за результатами рентгенографії, сканування або томографії. У ролі проектувальника виступає лікар-стоматолог. На виході процесу проектування отримують готову модель виробу, а також розраховані за допомогою МСЕ характеристики навантажень на зуби, що необхідно для вибору правильного установлення брекет-системи пацієнтові. Виконання розрахунку дозволяє проаналізувати і, за необхідності, обмежити навантаження на зуби на етапі моделювання. Такий підхід забезпечує вибір найкращої схеми установлення брекетів з урахуванням їх спільної роботи й індивідуальних особливостей будови щелепи пацієнта.

Обмеженням є норматив тиску на зуб ортодонтичним апаратом, який необхідно контролювати, тому що при недостатньому зусиллі не буде спостерігатися терапевтичний ефект, а при перевищенні навантажень підвищується ризик передавлювання періодонта між зубом і кісткою щелепи та його некрозу [1; 2].

Діаграма включає такі дії.

1. Імпорт даних сканування або іншого методу отримання інформації про геометрію щелепи.

2. Побудова моделей зубів у PowerSHAPE на основі вимірів і відомих методів, що застосовуються в стоматології. Цей метод використовувався в цій роботі.

3. Побудова об'ємної моделі зубів у щелепах, контроль якості моделі.

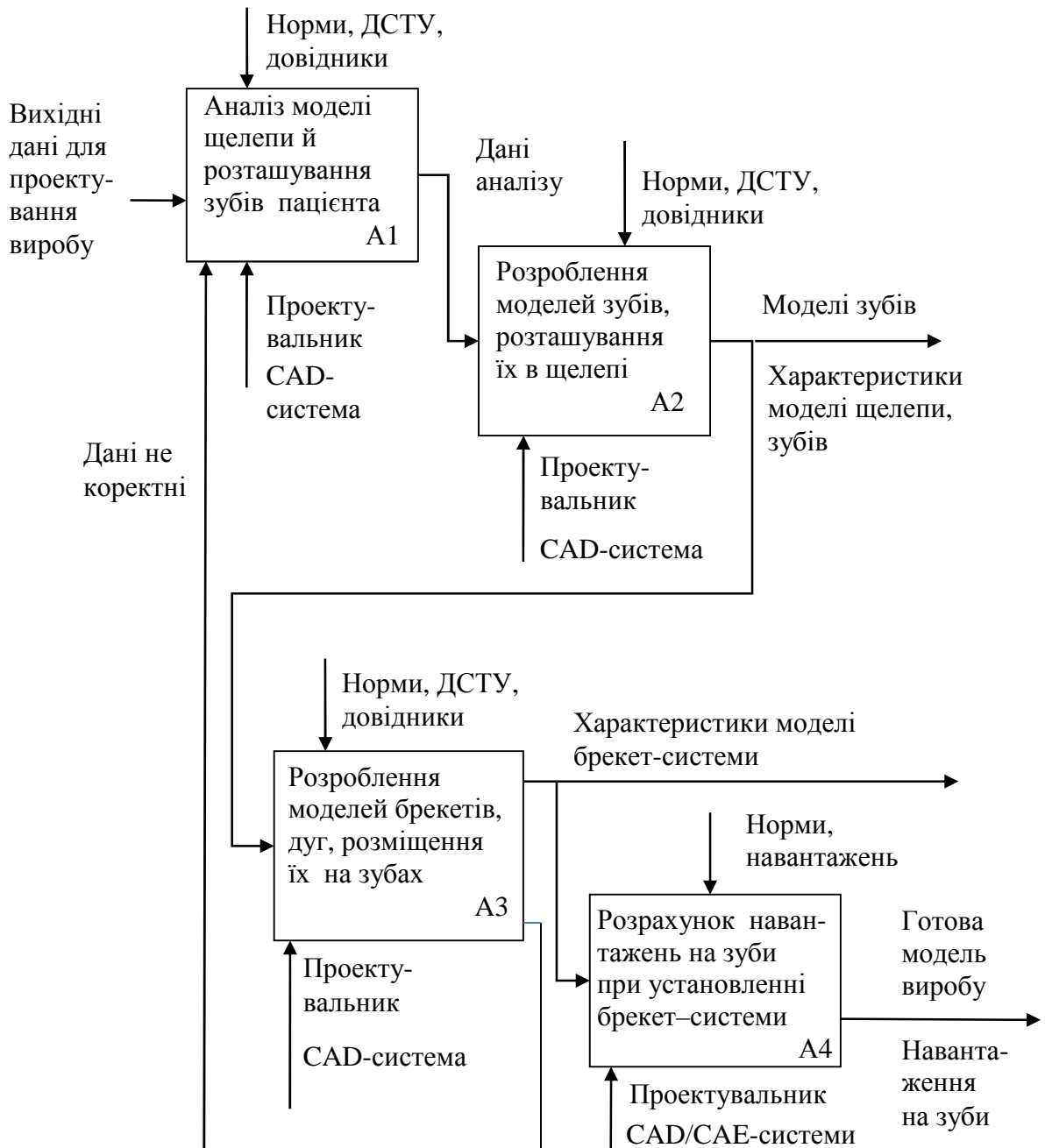


Рисунок 3.1 – Структурно-функціональна діаграма процесу автоматизованого проектування брекет-системи

4. Візуальне розміщення точок установки брекетів на зуби в CAD-системі PowerSHAPE.

5. Контроль систем координат для побудови брекетів, локальних систем координат, за необхідності – їх поворот щодо нормалі до поверхні зуба для правильного позиціонування паза відносно дуги.

6. Автоматизована побудова моделей брекетів на зубах (на кожному зубі).

7. Контроль правильності установлення брекетів на зубах, за необхідності – коригування положення брекетів на поверхні зубів.

8. Формування файлу з геометричними параметрами точок установлення брекетів для подальшого розрахунку.

9. Числовий розрахунок навантажень на зуби при такій схемі установлення брекетів і параметрів пружної дуги, використовуваної для їх зв'язку. Виходячи з цих даних, може бути здійснений вибір матеріалу і перерізу дуги. На цьому етапі також здійснюється перевірка коректності розрахованих даних, виходячи з нормативів на виробництво такого роду виробів. За наявності некоректних даних необхідно повторити попередні етапи аналізу.

За необхідності процес розрахунку параметрів моделей повторюється, при цьому програмна система звертається до CAD-системи засобами API-інтерфейсу, передає в неї розрахункові дані й команди для побудови моделі брекет-системи.

Методи геометричного опису об'єктів, що моделюються, можна класифікувати на три основні види: каркасне моделювання, поверхневе і твердотільне моделювання [5].

Побудову моделей людських зубів виконаємо з використанням поверхневого моделювання, бо вони мають складну геометричну форму. Для проектування брекета використаємо методи конструктивної блокової геометрії, які є у моделюванні твердих тіл у тривимірній графіці і САПР. Вона дозволяє створити складний об'єкт за допомогою булевих операцій для комбінування декількох простих тіл і забезпечує можливість параметризації. Для побудови моделі осі дрютяної дуги, що з'єднує брекети в єдину систему, оптимальним рішенням є використання NURBS-кривих (неоднорідного раціонального B-сплайну) завдяки тому, що вони завжди мають гладку форму.

Відповідно до завдань розробимо методики моделювання компонентів цієї системи.

### ***3.2.2 Методика побудови моделі людського зуба з використанням PowerSHAPE (на прикладі другого моляра верхньої щелепи)***

На зубі розрізняють вестибулярну, лінгвальну, медіальну й жувальну поверхні, які визначають форму зуба й використовуються при протезуванні [3]. Виходячи з габаритних розмірів необхідного зуба [6] (табл. 3.1, рис. 3.2, а, б), будуємо приблизний макет, який дозволить визначити межі контуру.

За допомогою інструмента «Створити сплайн» у межах цього контуру малюємо контур верхньої частини зуба (рис. 3.2, в), а також контури борозенок і горбків (рис. 3.2, г) за методикою, яка застосовується при протезуванні. Верхні точки відзначаємо за допомогою інструмента «Створити точку».

Для створення профілю жувальної поверхні піднімаємо характерні точки й точки кривих над поверхнею побудови контуру (рис. 3.2, д).

Таблиця 3.1 – Розміри зуба (другого моляра верхньої щелепи) [6]

Параметр	Висота (Hcor)	Довжина (MDcor)	Ширина (VLcor)
У мм	4,9	10,1	11,3
У долях	1,0	2,1	2,3

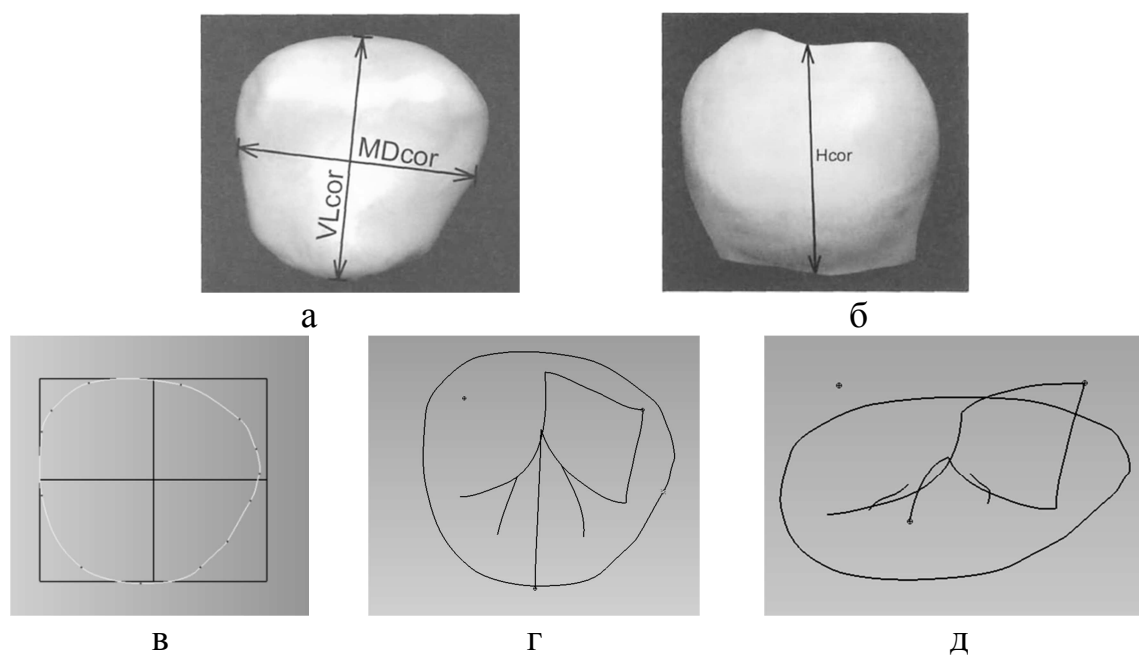


Рисунок 3.2 – Створення профілю жувальної поверхні зуба [6]

За отриманими кривим і базовим контуром будуємо поверхню за допомогою інструмента PowerSHAPE «Розумний моделювальник поверхонь» (рис. 3.3, а).

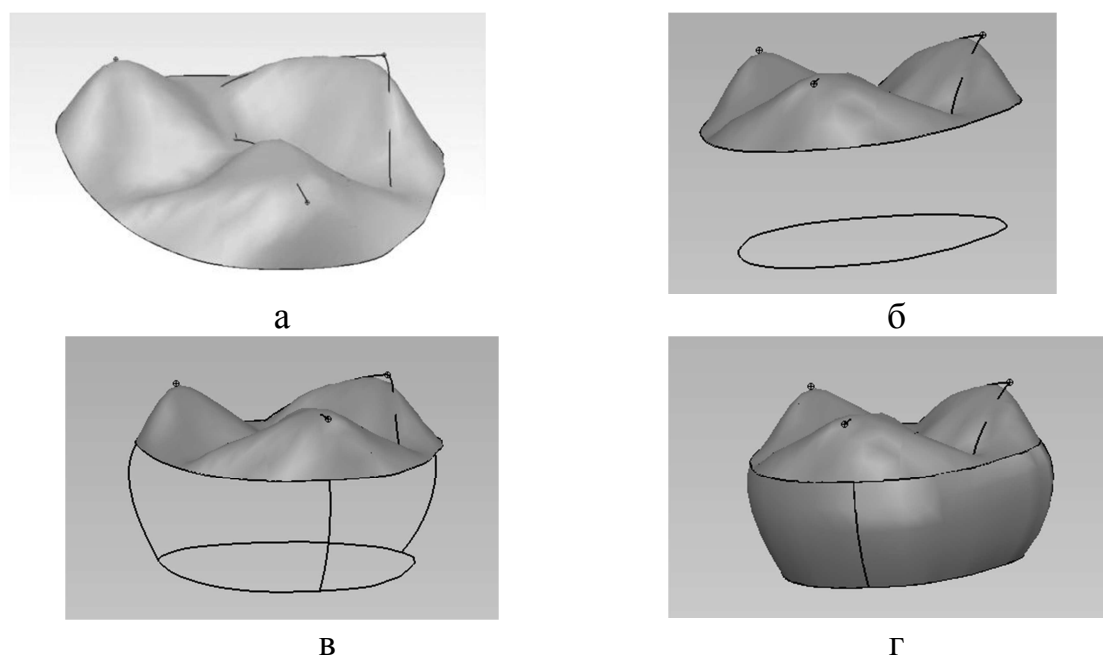


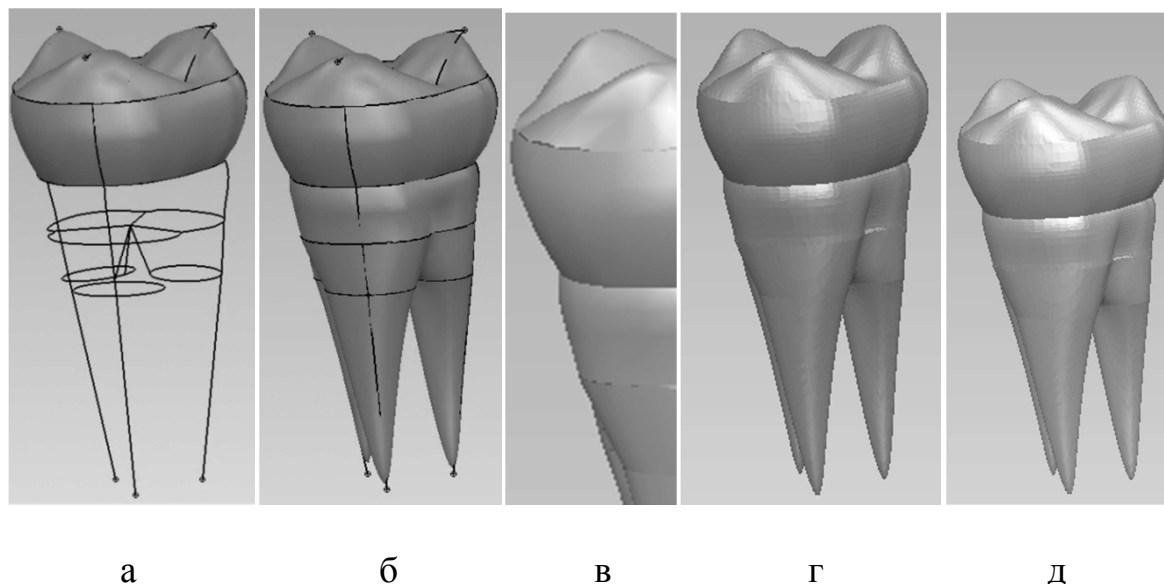
Рисунок 3.3 – Побудова жувальної й бічних поверхонь верхньої частини зуба

Для побудови бічних поверхонь верхньої частини зуба контур верхньої поверхні копіюємо, пропорційно зменшуємо за допомогою інструмента «Змінити масштаб об'єкта» і зміщуємо вниз на відстань висоти зуба H<sub>сог</sub> з урахуванням висоти побудованої поверхні (рис. 3.3, б).

Побудуємо напрямні для бічної поверхні зуба. Для цього використовуємо форму поздовжніх зрізів зуба, зокрема, вестибуло-лінгвальний зріз. За отриманими контурами (рис. 3.3, в) будуємо поверхню (рис. 3.3, г).

Відомо, що середня довжина зуба – 21 мм (19–23). Як правило, такий зуб має 3 кореня і 3 канали (65 %), 3 кореня і 4 канали (35 %). Будову коренів зуба наведено в спеціальній літературі.

З достатньою для подальшого розрахунку точністю будуємо контури різних зрізів зубів і переміщуємо їх пропорційно уздовж осі зуба відповідно до його загальної довжини (рис. 3.4, а). Будуємо поверхні за контурами (рис. 3.4, б) і перетворюємо зуб у твердотільне подання.

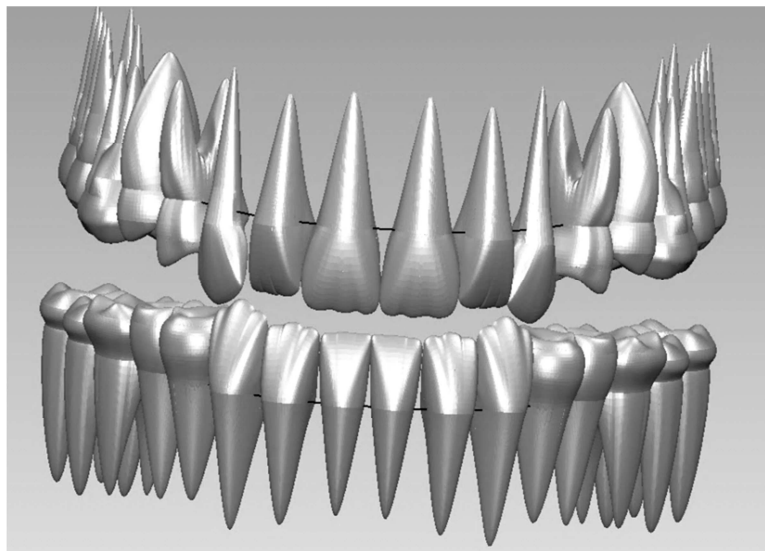


*Рисунок 3.4 – Побудова бічної поверхні зуба*

Для усунення дефектів побудови отримане тіло конвертуємо в stl-формат і зшиваємо сітки за допомогою інструмента «Зшити сітку». Отримане тіло конвертуємо назад у твердотільний об'єкт без дефектів.

Аналогічно будуємо поверхні для інших зубів верхньої і нижньої щелеп (по 8 зубів). Для спрощення побудови моделі інші зуби копіювали й розміщували на попередньо побудованих кривих форми щелепи симетрично (ліва і права частини щелепи).

Побудовану модель зубів з позиціонуванням у щелепах наведено на рис. 3.5.



*Рисунок 3.5 – Результат побудови і позиціонування моделей зубів у щелепах*

### ***3.2.3 Розроблення моделі брекета в PowerSHAPE***

Розглянемо побудову моделі брекету, який є однією з перспективних конструкцій, що забезпечує вільне зміщення дрютяної дуги в пазу брекета [1; 2]. Основними діями, які виконуються користувачем, є робота з отримання «карти висот» для поверхні і введення початкових даних.

На рис. 3.6 наведено діаграму класів логічної моделі модуля САПР інтеграції із CAD-системою PowerSHAPE. На діаграмі показано застосування шаблонів проектування «Будівельник» (для формування складних об'єктів з окремих частин) і «Адаптер» (для уніфікації інтеграції з різними CAD системами).

Розглянемо послідовність дій для процесу проектування деталей (див. рис. 3.6). Користувач вибирає пункт меню «Побудова брекет-системи», вводить необхідні дані й натискає кнопку «Побудувати брекет-систему». Далі «Визначений будівельник» виконує побудову брекет-системи з відповідними параметрами. Він створює об'єкт «Брекет-система», у реалізації якого вбудований макрос побудови брекетів. Побудова проходить у циклі, бо виконуються однакові дії для кожного брекета. Побудова одного брекета становила близько 20 с. Установлення брекета на зуб виконується в інтерактивному режимі роботи, щоб забезпечити правильне позиціонування брекетів на зубах. Після побудови всіх брекетів будується дуга, яка проходить через кожен брекет. Перетин дуги користувач задає при введенні даних перед початком побудови. У кінці побудови в системі PowerSHAPE будуть показані всі брекети з проведеною дугою, що з'єднує їх один з одним.

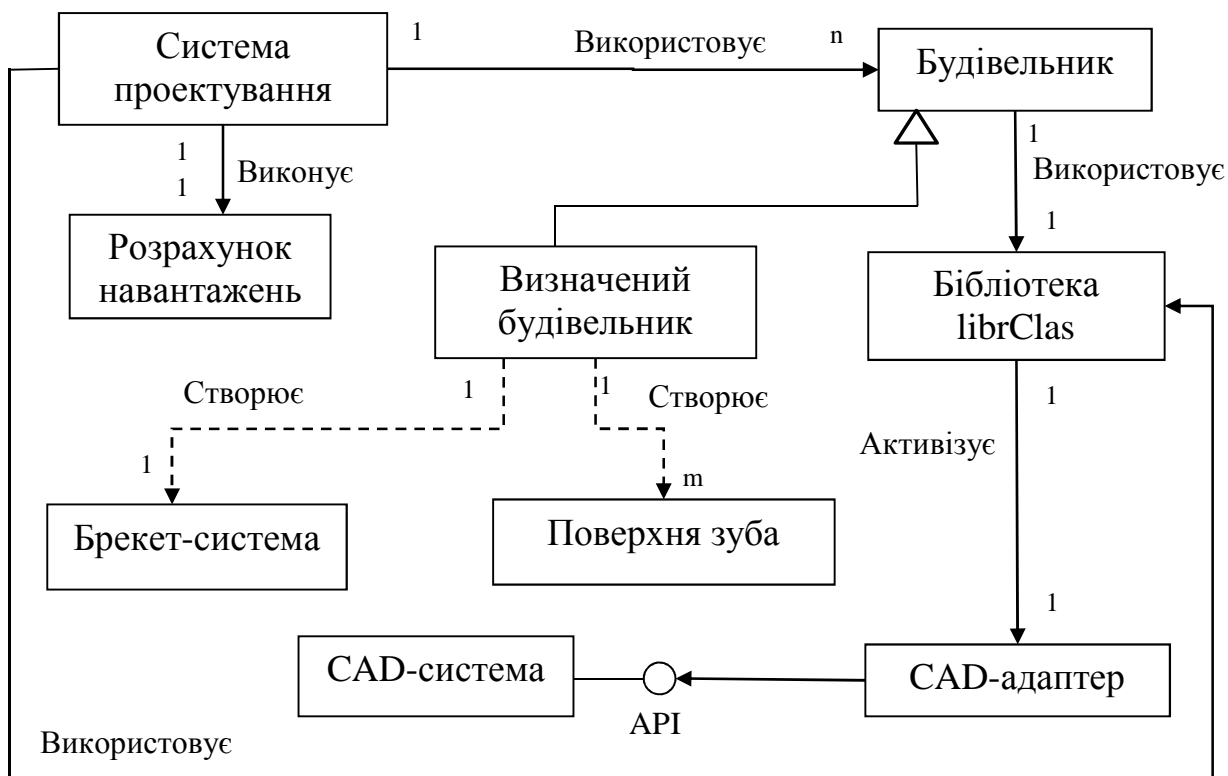


Рисунок 3.6 – Діаграма класів модуля САПР брекет-систем і поверхонь зі складною геометрією, інтегрованою з CAD-системою (із застосуванням шаблонів проектування)

Інтеграція з CAD-системою PowerSHAPE реалізована за допомогою бібліотеки PowerSolutionDOTNetOLE, а для виклику елементів і діалогових вікон PowerShare застосовано макроси. Розширення функціональності розробленої САПР виконано за рахунок отримання даних з PowerSHAPE про геометрію дуги й подальшого використання їх значень для розрахунку навантажень, створюваних брекет-системою на зуби.

### 3.2.4 Методика використання макросів і бібліотеки PowerSolution DOTNetOLE для інтеграції з CAD-системою PowerSHAPE

Для передання макросу в PowerSHAPE використовується бібліотека PowerSolutionDOTNetOLE, створюється об'єкт класу clsPowerSHAPEOLE і передається команда clsPowerSHAPEOLE.Execute (""). Після отримання команди CAD-система виконує команду так само, як якщо ми просто запустили б макрос з графічного меню.

Для отримання інформації про об'єкт використовується команда clsPowerSHAPEOLE.Evaluate ("SELECTION.NUMBER").

При створенні твердотільного блоку необхідно вказати точку розташування основи блоку, його висоту, ширину і довжину. Після створення його можна перейменувати або змінювати. Можна змінювати його параме-



три вже після побудови, використовуючи команду «Змінити». Викликається вікно параметрів «Змінити», після чого проводиться перебудова об'єкта за необхідними параметрами. Для створення об'єкта твердого тіла виду «Блок» був розроблений метод (рис. 3.7).

```
// Создание Solid типа Block
public bool CreateSolidBlock(string NameSolid, clsPoint3D Point, double
Length, double Width, double Height)
{
    //Выполняем макрокоманды создания блока
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Create Solid Block");
    clsPowerSHAPEOLE.Execute(Point.SerialisedString(true));
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Modify");
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Name " + Convert.ToString(NameSolid));
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Length "+Convert.ToString(Length));
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Width " + Convert.ToString(Width));
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Height " + Convert.ToString(Height));
    clsPowerSHAPEOLE.Execute("Accept");
    //Делаем небольшую задержку
    System.Threading.Thread.Sleep(1000);
    return true;}

```

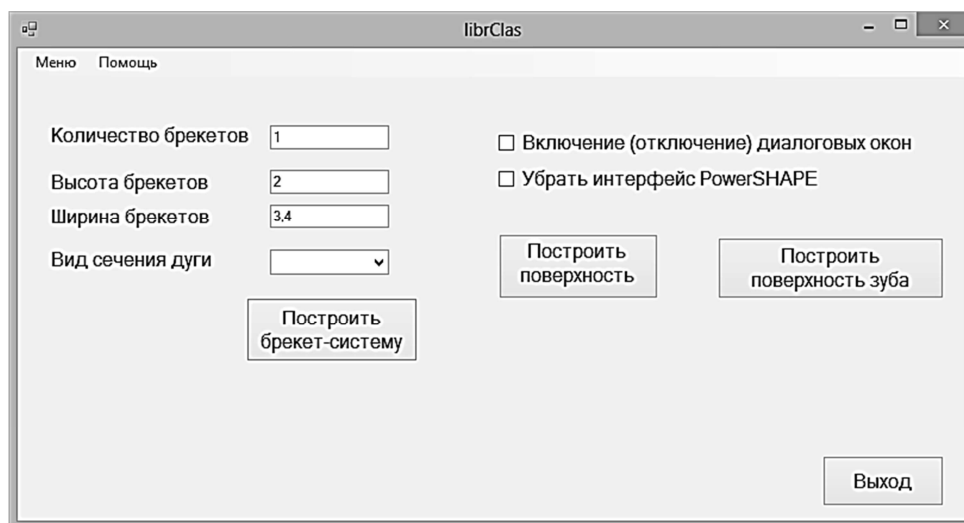
*Рисунок 3.7 – Метод побудови твердотільного блоку*

Подібним методом будуються тіла й інших типів. Для їх будування потрібно вказати ряд параметрів. Зокрема, для побудови твердотільного об'єкта можна накреслити його контур, а потім витягнути з нього тіло. Для цього використовується команда, код якої наведено на рис. 3.8.

```
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE SOLID");
```

*Рисунок 3.8 – Функція витягування тіла з його 2D-проекції*

На рис. 3.9 показано головне вікно програми librClas, у якому здійснюється основна робота користувача.



*Рисунок 3.9 – Головне меню програми побудови брекет-систем*

У цьому вікні вводяться вихідні дані для побудови брекети-системи, а також параметри поверхонь зі складною геометрією. Інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий і не вимагає спеціального навчання користувача для роботи з ним.

Для побудови брекети використовуємо бібліотеку, в якій реалізовано метод побудови брекети за заданими параметрами (рис. 3.10).

```

clsPowerSHAPEOLE.Connect();
clearAll();
clsPowerSHAPEOLE.Execute("VIEW EDIT FRONT");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", this.pickPointY + " " +
this.pickPointZ + " " + this.pickPointX, 11 * this.wUnit + " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (11 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + this.pickPointX, "0 0 " + 9 * this.hUnit,
"SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (12 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 10 * this.hUnit), this.wUnit
+ " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (15 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 8 * this.hUnit), this.wUnit
+ " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
"SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (3 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 18 * this.hUnit), (9 *
this.wUnit) + " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (-3 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 6 * this.hUnit), "0 0 " + (6
* this.hUnit), "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (-3 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 12 * this.hUnit), (-4 *
this.wUnit) + " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (-7 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 12 * this.hUnit), "0 0 " + (4
* this.hUnit), "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (-17 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 13 * this.hUnit), "0 0 " + (-
4 * this.hUnit), "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (-16 * this.wUnit +
this.pickPointY) + " " + this.pickPointZ + " " + (this.pickPointX + 8 * this.hUnit), this.wUnit
+ " 0 0", "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));

```

*Рисунок 3.10 – Побудова 2D-виду брекети*

На рис. 3.11 і 3.12 наведено методи побудови ескізу брекета. Після того, як був побудований ескіз брекета, ми його витягуємо в об'ємну модель, отримуємо тверде тіло й починаємо додатково обробляти.

```

clsPowerSHAPEOLE.Execute("SELECT CLEARLIST");
selectLinesArcs(lineNames, "ADD LINE");
selectLinesArcs(arcNames, "ADD ARC");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CONVERT COMPCURVE");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE SOLID EXTRUSION");
solidNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("MODIFY");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("LENGTH " + ((bracketWidth / 2) - 3 * this.wUnit));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("EQUAL ON", "ACCEPT", "SELECT");
clearNames();
clsPowerSHAPEOLE.Execute("VIEW EDIT TOP");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (17 * this.wUnit +
this.pickPointZ) + " " + (-7 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit +
this.pickPointX), (-1 * this.pickPointZ) + " " + (14 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " +
this.pickPointX, "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (17 * this.wUnit +
this.pickPointZ) + " " + (7 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX),
(-2 * this.wUnit + this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + this.pickPointX, "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (13 * this.wUnit +
this.pickPointZ) + " " + (5 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit +
this.pickPointX), (-1 * this.pickPointZ) + " " + (-10 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " +
this.pickPointX, "SELECT");

```

*Рисунок 3.11 – Побудова контуру брекета*

```

lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (15 * this.wUnit + this.pickPointZ)
+ " " + (-7 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX), (2 *
this.wUnit + this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + this.pickPointX, "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE ARC SWEPT", (15 * this.wUnit + this.pickPointZ)
+ " " + (5 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX), (-2 *
this.hUnit) + " 0 0", "CLOCKWISE", (2 * this.hUnit) + " " + (2 * this.hUnit) + " 0");
arcNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE ARC SWEPT", (15 * this.wUnit + this.pickPointZ)
+ " " + (-5 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX), "0 " + (-2 *
this.hUnit) + " 0", "CLOCKWISE", (-2 * this.hUnit) + " " + (2 * this.hUnit) + " 0");
arcNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("SELECT CLEARLIST");
selectLinesArcs(lineNames, "ADD LINE");
selectLinesArcs(arcNames, "ADD ARC");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CONVERT COMPCURVE");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE SOLID EXTRUSION");
solidNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("SELECT CLEARLIST");

```

*Рисунок 3.12 – Замикання контуру брекета*

```

clsPowerSHAPEOLE.Execute("ADD SOLID " + solidNames[0] + "");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("MODIFY ACTIVATE ACCEPT");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("ADD SOLID " + solidNames[1] + "");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE FEATURE SUBTRACTION");
solidNames.Clear();
solidNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (9 * this.wUnit + this.pickPointZ)
+ " " + (12 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (12 * this.wUnit + this.pickPointX), (-6 *
this.wUnit + this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + this.pickPointX, "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (7 * this.wUnit + this.pickPointZ)
+ " " + (3 * this.wUnit + this.pickPointY) + " " + (12 * this.wUnit + this.pickPointX), (1 *
this.wUnit + this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + this.pickPointX, "SELECT");
lineNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (4 * this.wUnit +
this.pickPointZ)
arcNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("SELECT CLEARLIST");
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CREATE LINE SINGLE", (4 * this.wUnit + this.pickPointZ)
arcNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
selectLinesArcs(lineNames, "ADD LINE");
selectLinesArcs(arcNames, "ADD ARC");
mirrorCurveNames.Clear();
clsPowerSHAPEOLE.Execute("CONVERT COMPCURVE");
mirrorCurveNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));
clsPowerSHAPEOLE.Execute("EDIT MIRROR", "POINTS ", (-3 * this.wUnit +
this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX), (-10 * this.wUnit
+ this.pickPointZ) + " " + this.pickPointY + " " + (8 * this.wUnit + this.pickPointX), "APPLY");
mirrorCurveNames.Add(clsPowerSHAPEOLE.Evaluate("SELECTION.NAME[0]"));

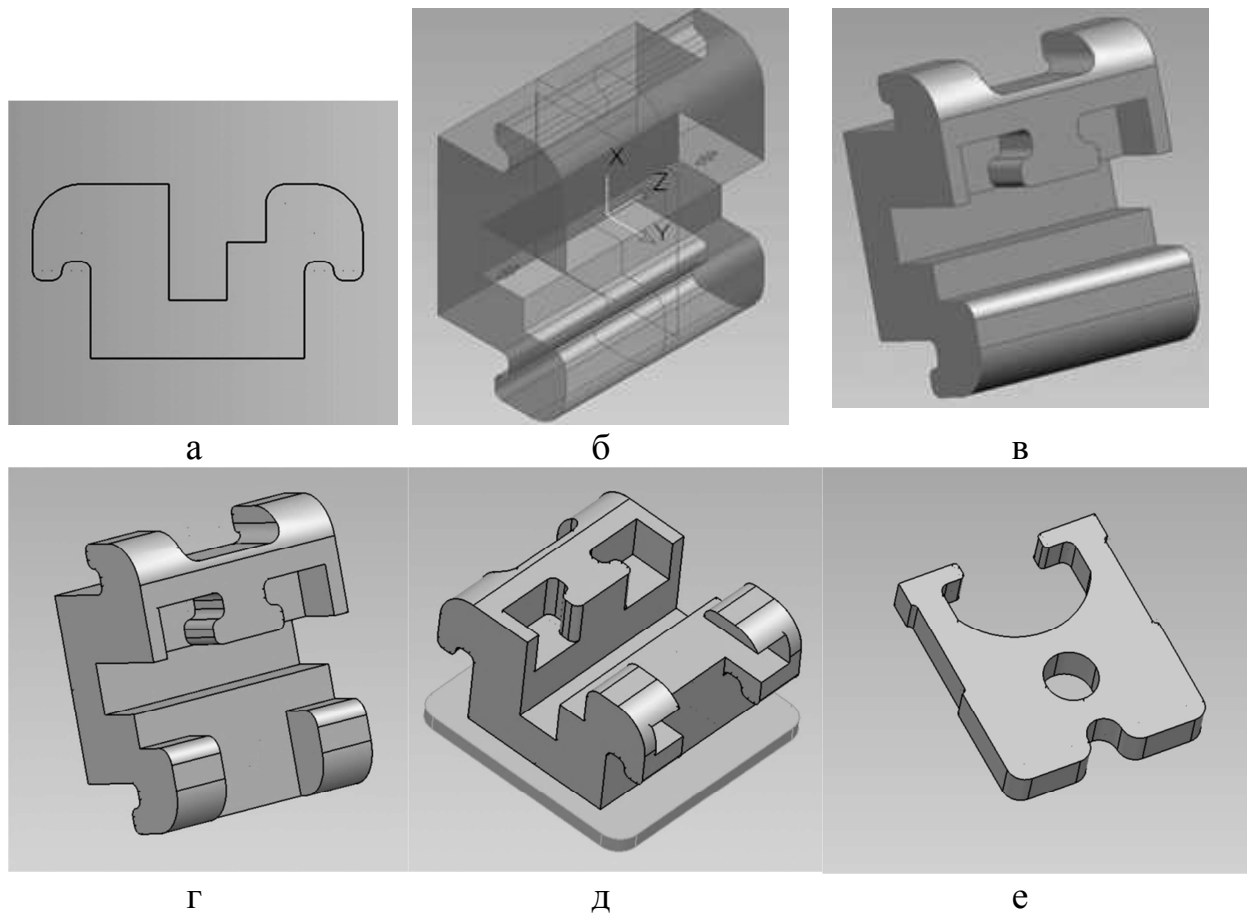
```

*Рисунок 3.12, аркуш 2*

На рис. 3.13 зображено побудова контуру брекета з ліній і дуг. Основою побудови є параметричний профіль перерізу залежно від 2 параметрів: ширини і висоти (а). Після побудови профілю проводиться видавлювання тіла брекета (рис. 3.13, б) з обмеженням по довжині фігури.

Потім формуються пази в тілі брекета для установлення фіксатора дротяної дуги (рис. 3.13, а–г). Після додавання основи (рис. 3.13, д) модель корпусу готова. Моделюється геометрія фіксатора дротяної дуги (рис. 3.13, е), який встановлюється в паз корпусу.

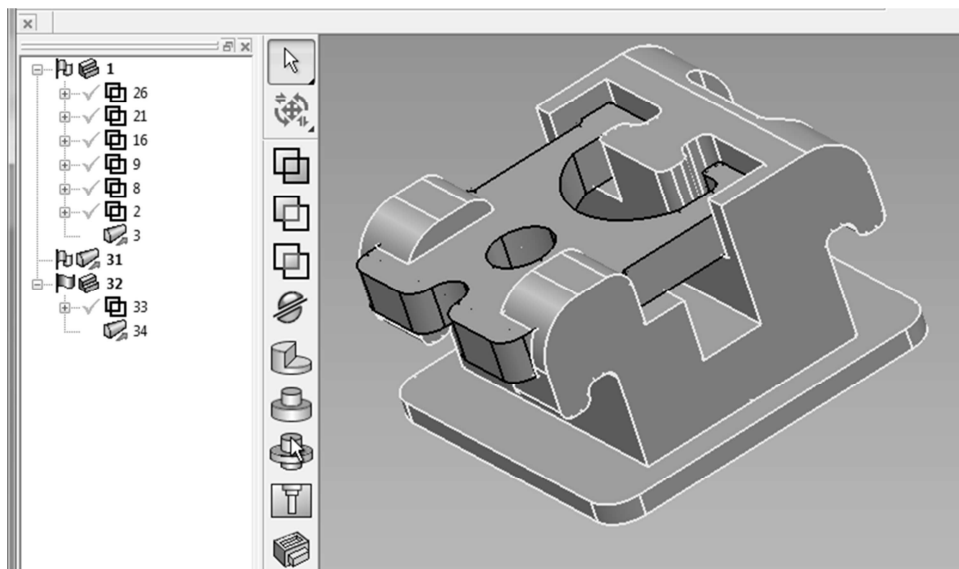
Для побудови дуги брекети-системи використовується подібний метод. Під час побудови брекети-будуємо допоміжні плоскі фігури (кола й інші фігури за виглядом перетинів дуги), вписані в розмір  $0,6 \times 0,6$  мм на краях отворів для дуги. Після чого з'єднуємо їх за допомогою B-сплайна і методом «Напрямна» створюємо поверхню потрібного нам перетину й довжини (рис. 3.14). Модель брекети в зборі з фіксатором дротяної дуги наведено на рисунку 3.15. Кінцевий результат побудови готової моделі брекети-системи з дугою, проведеною через всі брекети, показано на рис. 3.16.



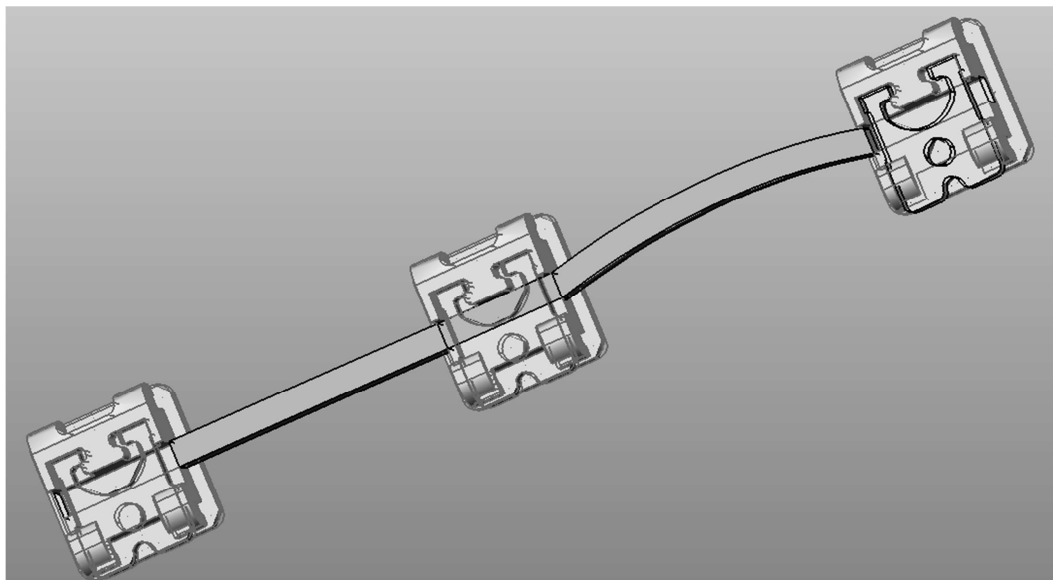
*Рисунок 3.13 – Етапи побудови твердотільної моделі брекета в PowerSHAPE*

```
clsPowerSHAPEOLE.Execute("Create surface AutoSurf");
clsPowerSHAPEOLE.Execute ("Method Drive")
```

*Рисунок 3.14 – Побудова поверхні за методом «Напрямна»*



*Рисунок 3.15 – Результат побудови моделі брекета в зборі з фіксатором дротяної дуги*



*Рисунок 3.16 – Дуга, проведена через брекет-систему*

### **3.2.5 Проектування поверхонь на основі карти висот**

Карти висот – це двовимірні карти, які використовуються для зберігання висот ландшафту. Кожна точка зображення зберігає висоту ландшафту у відповідній позиції (зазвичай як 8-розрядні зображення з градаціями сірого).

При натисканні на кнопку «Створити поверхню» з'являється діалог вибору файлу для карти висот. На рис. 3.17 показано, як завантажується карта висот у програмі.

```
openFileDialog1.ShowDialog();
string heightmapFileName = openFileDialog1.FileName;
FileStream fileStream = File.OpenRead(heightmapFileName);
```

*Рисунок 3.17 – Завантаження карти висот*

Після завантаження карти висот інформація з файлу зчитується і байти записуються в масив. Ці дані будуть висотами вершин. На рис. 3.18 показано заповнення масиву координатами висот поверхні.

```
byte[,] heightmap = new byte[MapSize,MapSize];
for (int i = 0; i < MapSize - 1; i++)
{
for (int j = 0; j < MapSize - 1; j++)
{
if(k<128*128)
heightmap[i,j] = kk[k];
k++;}}}
```

*Рисунок 3.18 – Заповнення масиву координатами висот поверхні*

Для побудови каркаса для поверхні необхідно побудувати полігони. Якщо знати всі вершини, не складає особливих труднощів побудувати відрізки прямих за цими координатами. Потім перетворимо отримані ламані лінії в контури. На рис. 3.19 показаний метод задавання точок.

```

for (int i = 0; i < MapSize - 1; i++)
{
for (int j = 0; j < MapSize - 1; j++)
{
x = i;
z = j;
clsPoint3D point1 = new clsPoint3D(x, heightmap[i, j], z);
clsPoint3D point2 = new clsPoint3D(x + 1, heightmap[i + 1, j + 1], z + 1);
clsPoint3D point3 = new clsPoint3D(x + 1, heightmap[i + 1, j], z);
clsPoint3D point4 = new clsPoint3D(x, heightmap[i, j], z);
lines[0] = point1;
lines[1] = point2;
lines[2] = point3;
lines[3] = point4;
}
}

```

*Рисунок 3.19 – Завдання вершин карти висот*

Створення полігонів реалізовано методом побудови ліній, кожна з яких будують окремо. Три лінії утворюють трикутник, відповідно два трикутники утворюють паралелограм, побудований на одній загальній стороні трикутників. Оскільки у двох трикутників різняться лише одна з вершин, то дві інші будуються симетрично (рис. 3.20, 3.21). У цьому методі реалізовано послідовну побудову ліній. По черзі задаються координати точок X, Y, Z.

```

public bool Createline(clsPoint3D[] points, String name)
{
//Проверяем есть ли соединение с PowerSHAPE
if (!pshapp.IsPSConnected())
{
pshapp.Connect();
//Если не переподсоединились – пишем в лог-файл
if (!clsPowerSHAPEOLE.IsPSConnected())
{
//CLog.Write("Невозможно установить соединение с
//PowerSHAPE");
return false;
}
}
}
if ((points == null) || (points.Length < 2)) {
return false; }
//Добавляем все точки
pshapp.Execute("create line CONTINUOUS");
pshapp.Execute("Position");
for (int i = 0; i < points.Length; ++i) {

```

*Рисунок 3.20 – Побудова полігонів для карти висот*

```

if (points[i] != null) {
    pshapp.Execute("Workspace Глобальная");
    pshapp.Execute("X " + points[i].X);
    pshapp.Execute("Y " + points[i].Y);
    pshapp.Execute("Z " + points[i].Z);
    pshapp.Execute("APPLY");} }
//Завершаем построение кривой
pshapp.Execute("ACCEPT ");
pshapp.Execute("create curve COMPCURVE");
pshapp.Execute(points[0].SerialisedString());
pshapp.Execute("SAVE");
pshapp.Execute("QUIT");
if (!name.Equals(""))
{
    pshapp.Execute("RENAME");
    pshapp.Execute("NAME " + name);
    pshapp.Execute("ACCEPT");
}
pshapp.Execute("DISPLAY BLANKSELECTED");
return true;
}

```

*Рисунок 3.20, аркуш 2*

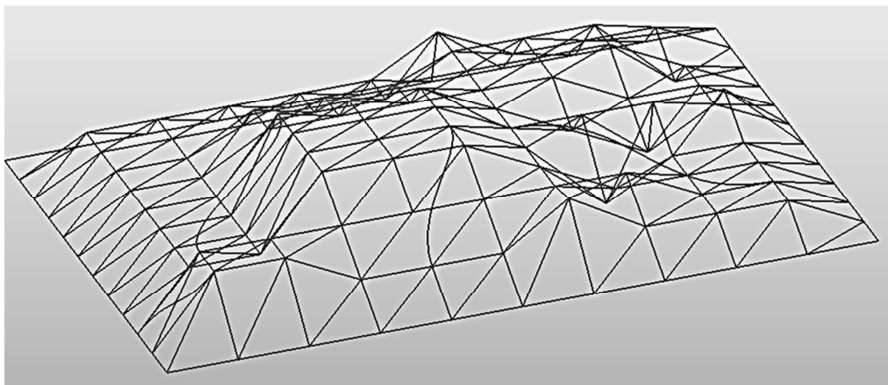
```

pshapp.Execute("create surface");
pshapp.Execute("AutoSurf");
pshapp.Execute("ACCEPT");
pshapp.Execute("Delete");
pshapp.Execute("SelectAll");
pshapp.Execute("NAME "+name+1);
pshapp.Execute("ACCEPT");

```

*Рисунок 3.21 – Побудова поверхонь з полігонів для карти висот*

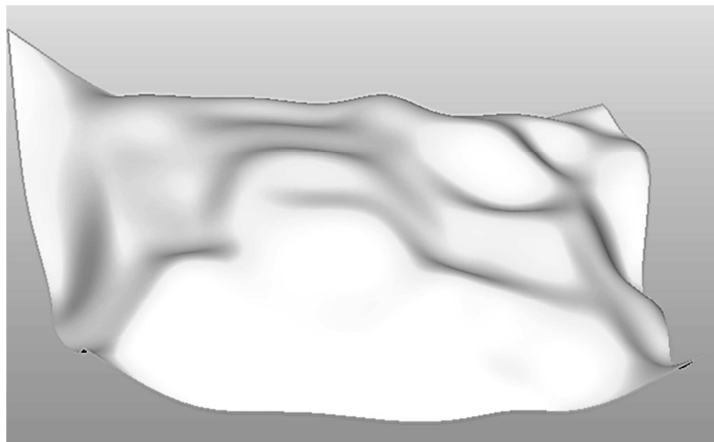
На рис. 3.22 зображений результат побудови полігонів на поверхні в заданому контурі. У межах кожного полігону створюється поверхня за допомогою замкнутих контурів. Поверхні створюються окремо одна від одної, тому кути між ними гострі або тупі, а переходи – не плавні.



*Рисунок 3.22 – Контур для поверхні*



Після побудови всіх полігонів у межах контуру необхідно побудувати по ним поверхню. Для цього ми проходимо кожну лінію заново для додавання в масив контурів. Потім вибираємо необхідний метод створення поверхні й будуємо його. Після виконання всіх дій видаляємо контури, й залишається поверхня, показана на рис. 3.23.



*Рисунок 3.23 – Поверхня, побудована по полігонах у межах заданого контуру*

### **3.3 Розроблення програмної системи для автоматизованого проектування брекет-системи**

#### **3.3.1 Логічна модель програмної системи**

Програмна система може застосовуватися в галузі стоматології. Призначена вона для моделювання стану зубів щелепи з подальшим розрахунком її навантаження і проектуванням брекет-системи. САПР забезпечує підвищення точності проектування за індивідуальними параметрами пацієнта й дозволяє автоматизувати розроблення брекет-систем, підвищити продуктивність, а також знизити вплив людського чинника на якість лікування.

На рис. 3.24 наведено діаграму прецедентів використання САПР для створення тривимірної моделі ортодонтичного апарата, який представляє собою опис послідовності дій, включаючи альтернативні й помилкові, які система, підсистема або клас можуть здійснювати, взаємодіючи із зовнішніми сутностями («акторами»). Вона дозволяє визначити межі системи і функції, які вона надає [7; 8].

Робота користувача з проектування брекет-системи з використанням САПР DentMCAD здійснюється так: користувач завантажує модель щелепи, яка отримана шляхом сканування тривимірним сканером або за допомогою томограми, а потім сконвертовано в stl-формат. Потім програма пропонує користувачеві розставити точки прикріплення брекетів до зубів. Після введення точок прикріплення користувачем програма виконує побудову набору брекетів.

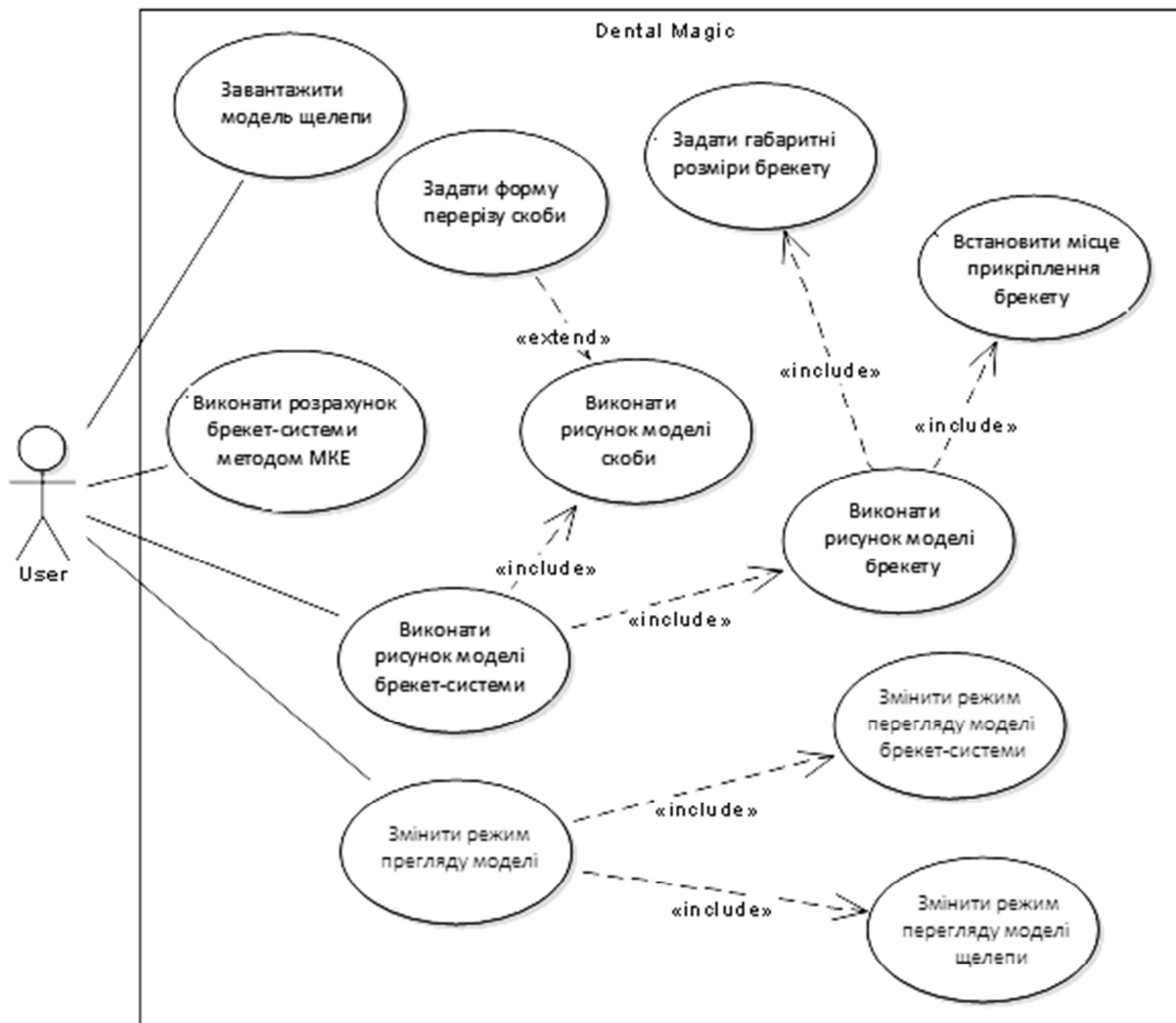


Рисунок 3.24 – Діаграма прецедентів програмної системи проектування брекет-систем у PowerSHAPE

Користувач вибирає форму перетину дуги (скоби) і за введеними координатами точок прикріплення програма виконує побудову брекет-скоби системи. Після виконання побудови користувач може зберегти модель брекет-системи в файл.

Потім програма виконує розрахунок навантажень на зуби від встановленої брекет-системи за допомогою МСЕ [9–12]. Програма зчитує дані з файлу, який містить координати зсуву моделей зубів від лінії зігнутої дуги брекет-системи. Після цього програмна система проводить розрахунок навантажень на зуби й відображення результатів у вікні програми.

Користувач може вивести дані розрахунку МСЕ на друк або зберегти їх, а також змінити режим видимості моделей брекет-системи або щелепи, щоб проконтролювати коректність побудови візуально.

Структура програмної системи (рис. 3.25) включає в себе програмний компонент, який містить у собі реалізацію класів (пакет додатків), компонент (пакет) інтерфейсу для користувача, який відповідає за відображення графічної оболонки програми та DLL для роботи з програмним

комплексом PowerSHAPE. САПР розроблений з використанням мови програмування C #, яка є кросплатформною.

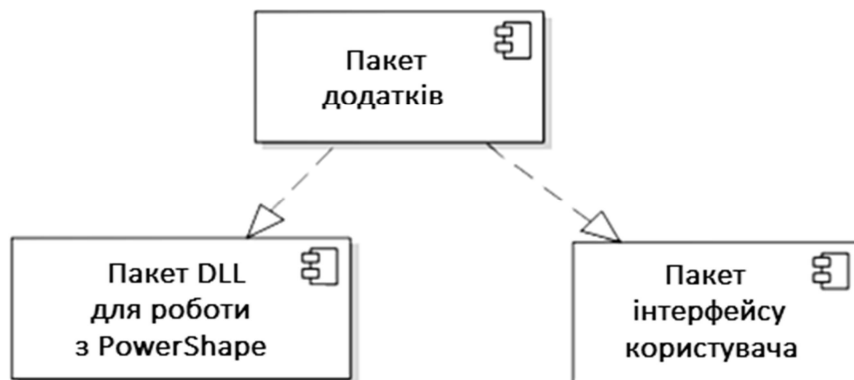


Рисунок 3.25 – Діаграма компонентів САПР для моделювання виробів складної геометрії

### 3.3.2 Етапи роботи програмної системи

Інтерфейс програми наведено на рис. 3.26. Перед запуском програми на виконання необхідно попередньо відкрити підготовлену модель зубів для щелепи у PowerSHAPE.

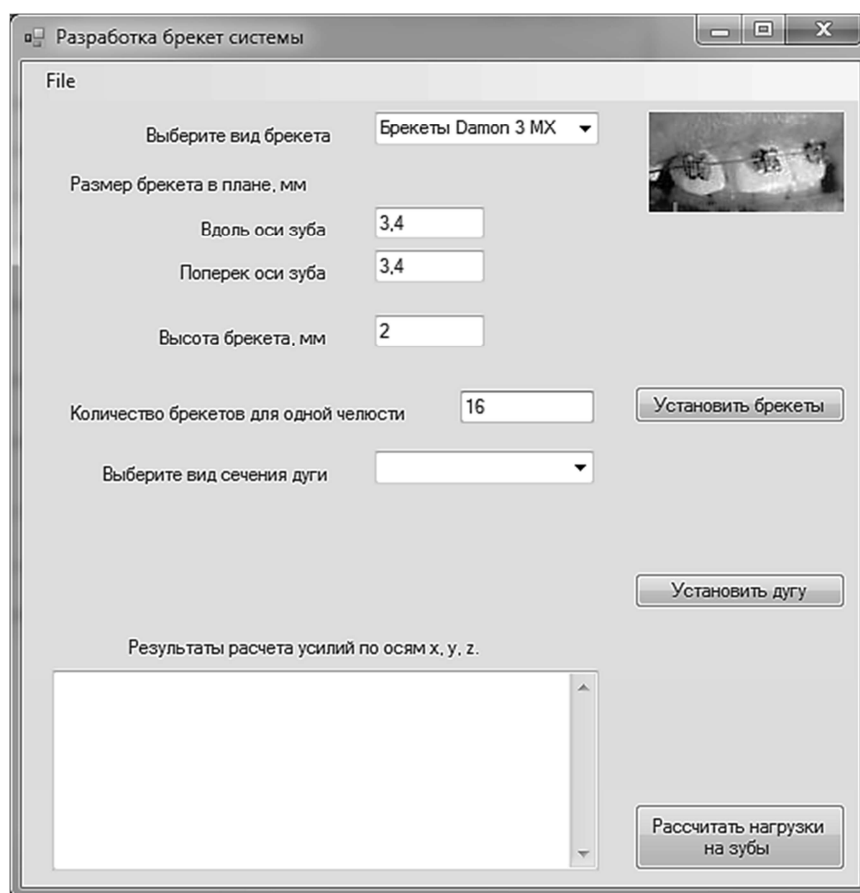
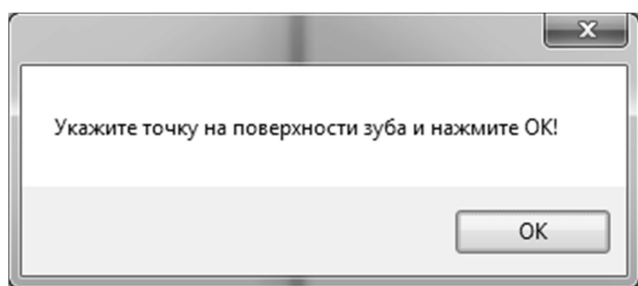
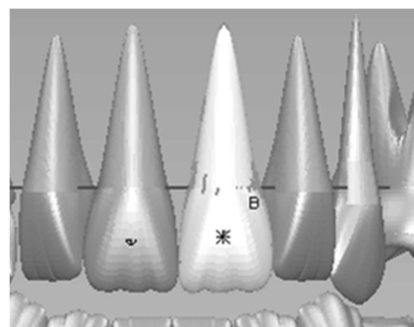


Рисунок 3.26 – Інтерфейс програмної системи

Потім вказується кількість брекетів, які потрібно розмістити на зубах і починається їх установка (рис. 3.27). Для цього на поверхні зубів послідовно з підтвердженням для кожного зуба (рис. 3.27, а) вказуються точки установки брекетів (рис. 3.27, б).



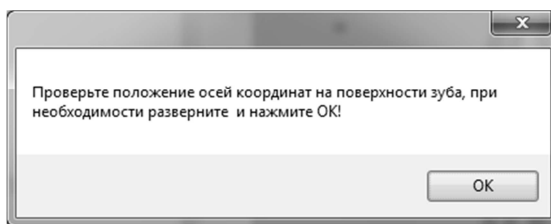
а



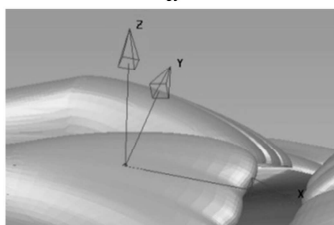
б

Рисунок 3.27 – Формування масиву точок установлення брекетів на зубах

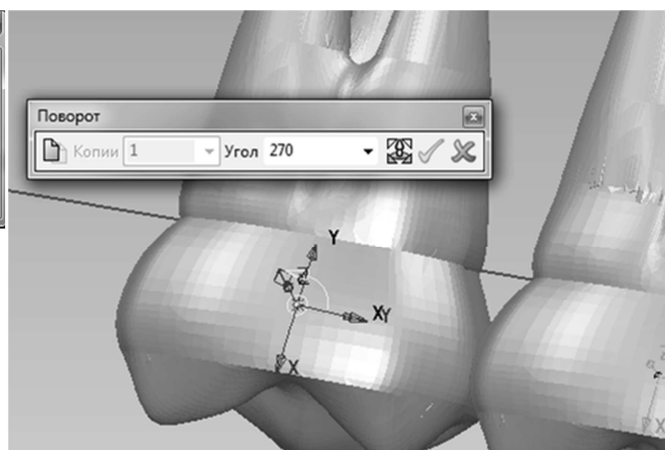
Потім у зазначених точках автоматично, перпендикулярно до поверхні зубів встановлюються локальні системи координат, щодо яких потім здійснюється відрисовування брекетів (рис. 3.28).



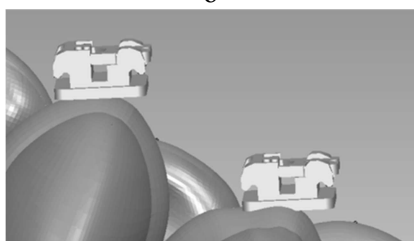
а



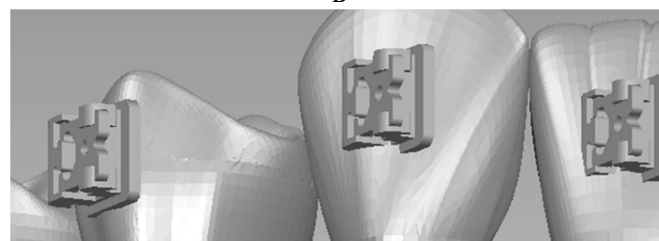
б



в



г



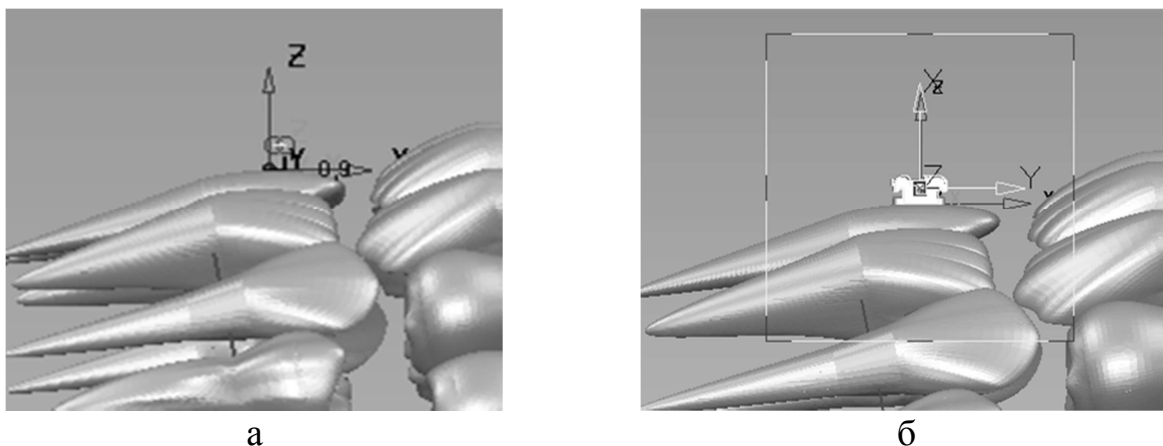
д

Рисунок 3.28 – Візуальний контроль положення і поворот (у разі необхідності) осей координат на кожному зубі

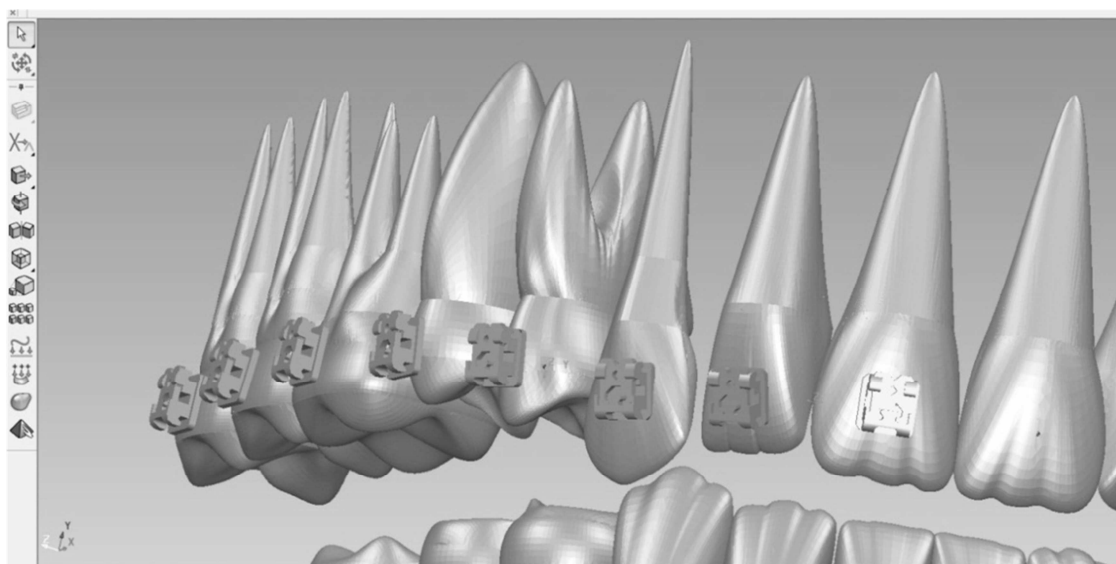
Оскільки зуби мають дефекти поверхні, то неможливо заздалегідь передбачити випадки кутового зміщення брекетів щодо поверхні або перетин граней брекета з поверхнею зуба (рис. 3.28, г, д) у точці установлення. Тому в циклі проводиться послідовний візуальний контроль положення

осей координат на кожному зубі (рис. 3.28, б). У разі необхідності можна змінити положення осей координат засобами PowerSHAPE (рис. 3.28, в) із підтвердженням коригування за допомогою діалогового вікна (рис. 3.28, а).

Функція побудови брекета на зубі винесена в окремий клас, що дозволяє використовувати різні брекети без порушення загального алгоритму роботи програми. Побудова брекетів на зубах проводиться автоматично програмною системою на основі використання інтерфейсу PowerSolution DOTNetOLE (рис. 3.29). Результати побудови й позиціонування моделей брекетів на зубах верхньої щелепи наведено на рис. 3.30 (дротова дуга не відображена).



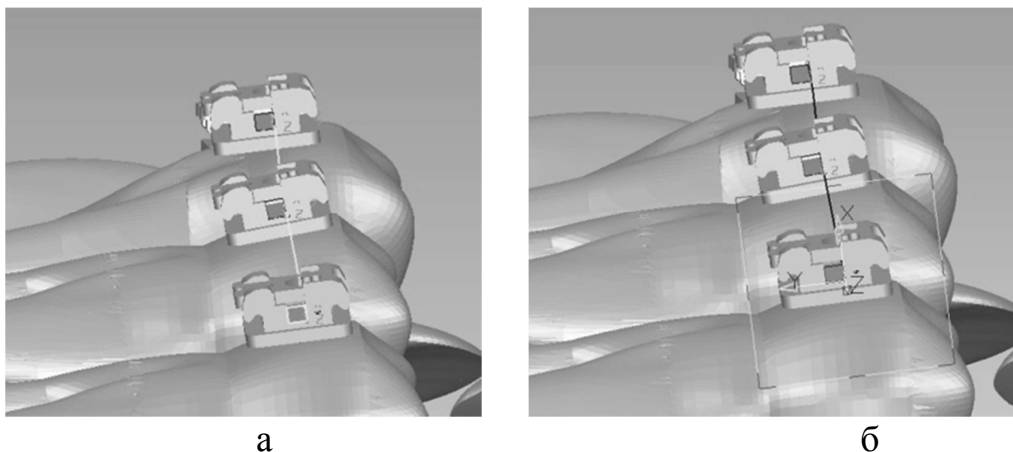
*Рисунок 3.29 – Послідовність автоматизованої побудови брекетів у заданих точках поверхні моделей зубів*



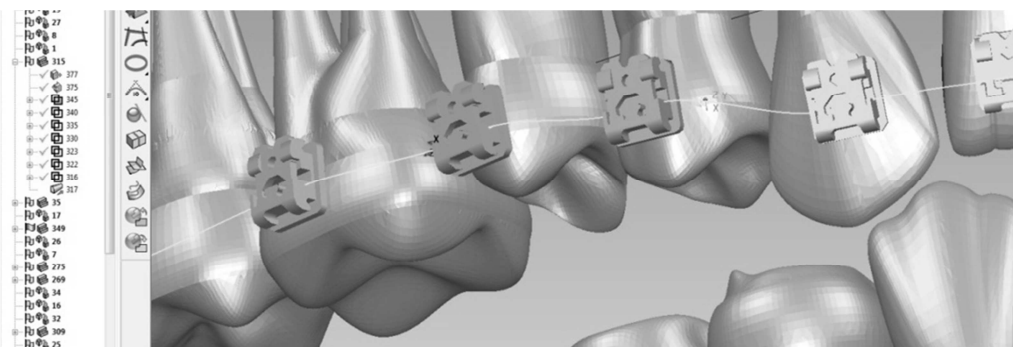
*Рисунок 3.30 – Результат автоматизованої побудови й позиціонування моделей брекетів на зубах верхньої щелепи*

Для візуального контролю форми дротяної дуги на торці крайнього брекета формується система координат (рис. 3.31, а) і контур дуги (рис. 3.31, б). У цьому разі зазор щодо фіксатора дротяної дуги складає 0,1 мм. Потім між брекетами створюється G2-сплайн, який фіксується

у двох точках тіла кожного брекета, щоб забезпечити відсутність перетину моделі дуги з тілами брекетів (рис. 3.32).

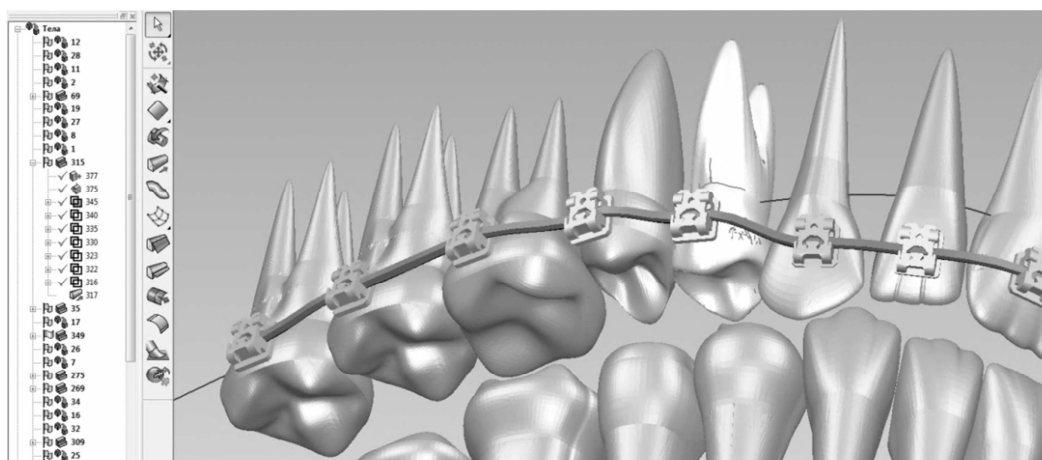


*Рисунок 3.31 – Побудова контуру перетину і кривої – напрямної дротяної дуги*



*Рисунок 3.32 – Побудова напрямної дротяної дуги у вигляді G2-сплайна*

По контуру перетину дротяної дуги і кривої-напрямної створюється об'ємна модель дуги. Остаточний вигляд брекет-системи наведено на рис. 3.33.



*Рисунок 3.33 – Побудована модель брекет-системи із встановленою дротяною дугою*

Результати моделювання устанавлення брекет-системи на зуби пацієнта записуються у файл як вихідні дані для подальшого розрахунку навантажень на зуби методом скінченних елементів.

### ***3.3.3 Розроблення математичної моделі числового розрахунку методом скінченних елементів задачі проектування виробів складної геометрії***

Геометрична модель дозволяє оцінити конструкцію брекет-системи в цілому і конфігурацію дуги, щоб виконати візуальний аналіз напрямку навантажень на зуби і моментів, які при цьому виникають. Однак відсутність кількісних характеристик навантажень на зуби знижує можливості аналізу якості устанавлення і роботи брекет-системи.

Дані устанавки дрютяної дуги в брекетах побудованої моделі системи записуються у файл для розбиття дуги на окремі скінченні елементи. Потім за командою «Розрахувати» виконується розрахунок навантажень від дуги на зуби.

Виконаємо поставлення задачі розрахунку зусиль від брекетів на зуби і напруг, які виникають у зубах при їх взаємодії з дугою з використанням методу скінченних елементів. МСЕ є ефективним числовим методом розв'язання інженерних і фізичних задач. Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-який безперервний параметр, такий як температура, тиск або переміщення, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі кусково-неперервних функцій [9–12]. У загальному випадку безперервний параметр заздалегідь відомий і потрібно визначити значення цього безперервного параметра в деяких внутрішніх точках області. Дискретну модель легко побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цього параметра в кожній внутрішній області відомі. Після цього можна перейти до загального випадку. Отже, при побудові дискретної моделі безперервного параметра послідовність дій така:

1. В області фіксується скінченна кількість точок, які називаються вузловими точками або вузлами.

2. Значення безперервного параметра в кожній точці вважається змінним і повинно бути визначено.

3. Область визначення безперервного параметра розбивається на скінченну кількість областей, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області.

4. Безперервний параметр апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цього параметра. Для кожного виду елемента визначається свій поліном (функція елемента), при цьому поліноми добираються так, щоб збереглася безперервність параметра уздовж меж елемента. Від вибору форми елемента і функцій для конкретних завдань залежить точність наближеного рішення [12].

Будь-яке завдання МСЕ в кінцевому підсумку зводиться до системи рівнянь

$$|K|\{\delta\} = \{R\}, \quad (3.1)$$

де  $|K|$  – матриця жорсткості конструкції в цілому, вона являє собою ансамбль матриць жорсткості скінченних елементів, з яких складається конструкція;

$\{\delta\}$  – вектор переміщення всіх вузлів;

$\{R\}$  – вектор вузлових навантажень.

Порядок системи (3.1) дорівнює добутку кількості вузлів на кількість ступенів свободи вузла.

У розглянутій задачі проектування брекет-систем найбільш гостро стоїть питання знаходження навантажень, які діють на дротяну дугу при її закріпленні в брекетах. Знаючи навантаження, можна визначити значення сил і моментів, що діють на зуби, за якими, у свою чергу, можна обчислити внутрішні напруги в зубах, реакції закріплення зуба в щелепі тощо. Також слід враховувати, що якщо спочатку зуби мають зазори між собою і сприймають навантаження незалежно, то в процесі лікування вони під впливом брекет-системи починають зміщуватися і контактувати між собою. Тому в розрахунку також необхідно враховувати сили контакту.

Таким чином, завдання числового моделювання складається з трьох основних етапів:

1. Дротяна дуга розглядається як вигнута кусково-лінійна балка, для якої відомі переміщення вузлових точок і необхідно визначити значення вузлових сил, що викликають ці переміщення.

2. Моделювання й розрахунок скінченно-елементної моделі найбільш навантажених зубів у САЕ-системі. При цьому навантаження, що діють на зуби, чисельно рівні і протилежні за напрямком навантажень на дротяну дугу.

3. Створення моделі зубів, які контактують між собою, і визначення навантажень від сумарного впливу сил, що виникають від деформації дротяної дуги і сил контакту зубів один з одним.

На першому етапі, керуючись формулою (3.1), визначаються значення сил, що діють у дузі брекет-системи, за відомими значеннями відхилень зубів від необхідного положення (табл. 3.2). При цьому вважаємо, що позитивне значення відхилення відповідає зсуву зуба всередину ротової порожнини.

Таблиця 3.2 – Задані відхилення зубів

Номер зуба	1	2	3	4	5	6	7	8
Відхилення, мм	-0,5	-1,0	-0,5	0	0,5	-1,0	0,5	0
Номер зуба	9	10	11	12	13	14	15	16
Відхилення, мм	0	0	0,5	-1,0	1,5	1,0	0,5	0



Дротову дугу було змодельовано у вигляді зігнутої балки, що складається зі скінченних елементів, вид яких наведено на рис. 3.34. Вузли скінченно-елементної моделі – місця прикріплення брекєтів до зубів.

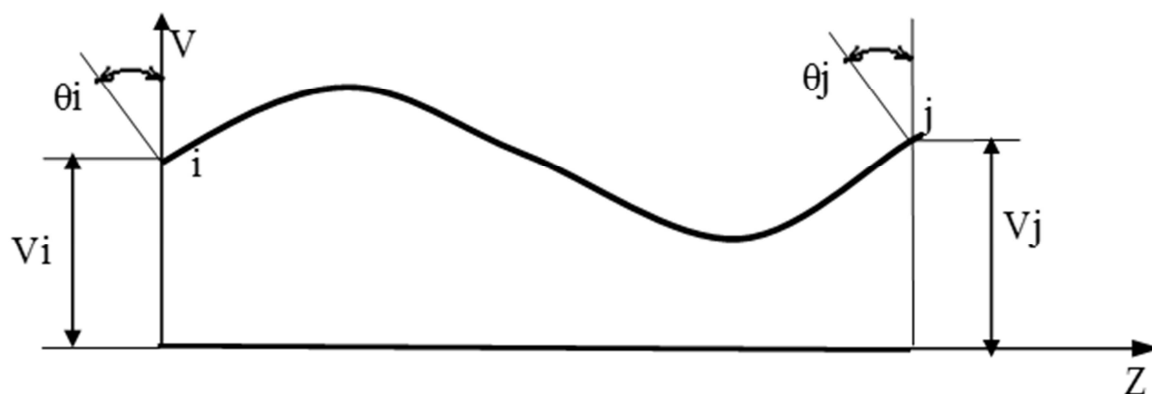


Рисунок 3.34 – Скінченний елемент для моделі дуги після деформування

За типом це завдання відноситься до зворотної задачі теорії пружності й зазвичай не вирішується за допомогою САЕ-пакетів, тому було розроблено власну програму, що дозволяє виконати цей розрахунок.

Керуючись [12], було визначено функцію переміщень скінченного елемента:

$$V = \begin{vmatrix} 1 - 3\frac{z^2}{l^2} + 2\frac{z^3}{l^3}; & z - 2\frac{z^2}{l} + \frac{z^3}{l^2}; & 3\frac{z^2}{l^2} - 2\frac{z^3}{l^3}; & -\frac{z^2}{l} + \frac{z^3}{l^2} \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} V_i \\ \theta_i \\ V_j \\ \theta_j \end{Bmatrix}. \quad (3.2)$$

Тоді матрицю [B] знаходимо за допомогою такої залежності:

$$|B| = y \cdot \begin{vmatrix} -\frac{6}{l^2} + \frac{6z}{l^3}; & -\frac{4}{l} + \frac{6z}{l^2}; & \frac{6}{l^2} - \frac{6z}{l^3}; & -\frac{2}{l} + \frac{6z}{l^2} \end{vmatrix}. \quad (3.3)$$

З огляду на те, що матриця пружності [D] для балочного елемента має розмірність 1×1 і чисельно дорівнює модулю Юнга, отримуємо матрицю жорсткості у вигляді:

$$|K|^e = \int_V |B|^T |D| |B| dV = EI_x \begin{vmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ -\frac{6}{l^2} & -\frac{2}{l} & \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} \end{vmatrix}. \quad (3.4)$$

Проведений за допомогою залежностей (3.1) – (3.4) розрахунок дозволив знайти значення сил і згинальних моментів, які викликають задані відхилення (табл. 3.3). Тут вісь ОУ спрямована від передніх зубів всередину порожнини рота, а вісь ОХ їй перпендикулярна.

Таблиця 3.3 – Значення сил, що діють на дротяну дугу і зуби

Номер зуба	$P_x, \text{Н}$	$P_y, \text{Н}$	$M_{xy}, \text{Нм}$
1	0,0288	0,00193	$2,15 \cdot 10^{-4}$
2	-0,07	-0,0076	0
3	0,0097	0,0017	$-5,01 \cdot 10^{-4}$
4	0,00304	0,00895	$-4,71 \cdot 10^{-4}$
5	-0,018	-0,01	$-5,76 \cdot 10^{-4}$
6	-0,13	-0,119	$2,27 \cdot 10^{-4}$
7	-0,0185	0,028	$1,01 \cdot 10^{-3}$
8	-0,0184	-0,085	$4,49 \cdot 10^{-4}$
9	0	0	0
10	0,066	-0,101	$-5,6 \cdot 10^{-4}$
11	-0,122	0,112	$-2,93 \cdot 10^{-4}$
12	0,123	-0,069	$-4,134 \cdot 10^{-4}$
13	-0,123	0,0036	$-4,52 \cdot 10^{-4}$
14	$-9,7 \cdot 10^{-3}$	$-1,69 \cdot 10^{-3}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$
15	0,0124	$-1,35 \cdot 10^{-3}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$
16	0,0029	$-1,93 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$

У цьому разі отримані значення навантажень не перевищують допустимі значення (0,5–1,5 Н), а тиск для сприятливих умов переміщення становить 0,35–2,0 кПа [13]. Слід зазначити, що розраховані в програмі значення сил і моментів знаходять для випадку відхилень у площині ОХУ, різниця установки брекетів на зубах по висоті не враховувалася.

Отримані значення сил і моментів, наведені в табл. 3.3, за допомогою програми-інтерпретатора були передані в САЕ-систему, де проводилися подальші розрахунки. Спочатку були побудовані базові точки, на основі яких створювали опорні поверхні (рис. 3.35, а). Об'ємні моделі зубів отримували витягуванням опорних поверхонь уздовж осей зубів на задану висоту без урахування зміни перетинів по висоті (рис. 3.35, б).

Далі виконували розбиття зубів на 4-вузлові тетраедні скінченні елементи, при цьому на кожному зубі було розташовано по 4 елементи уздовж кожної з твірних. Після побудови скінченно-елементної моделі (рис. 3.36) були задані умови закріплення зубів у вигляді жорстких закладень вздовж нижньої поверхні кожного зуба. Слід зазначити, що реально зуби з'єднуються зі щелепою через в'язко-пружне середовище (пародонт) і повинні закріплюватися на опорах із заданим коефіцієнтом піддатливості. Тому розрахунок дає верхню оцінку виниклої напруги від дії дуги. Значення отриманих у результаті розрахунків еквівалентних напружень у зубах наведено на рис. 3.37.

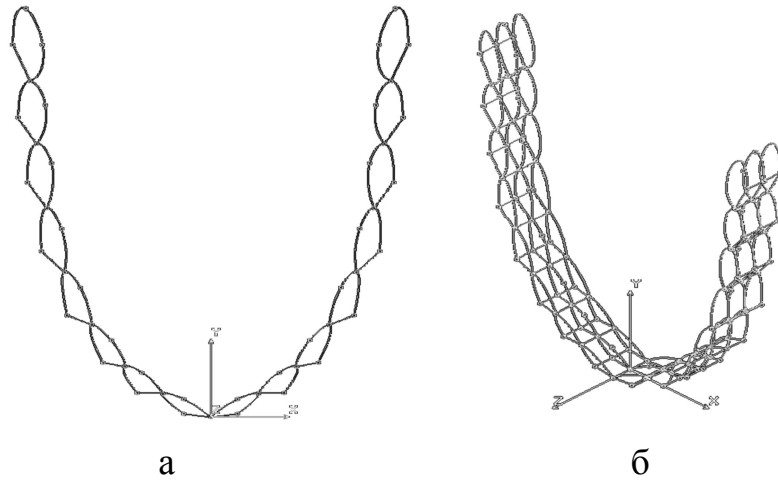


Рисунок 3.35 – Побудова геометрії зубів

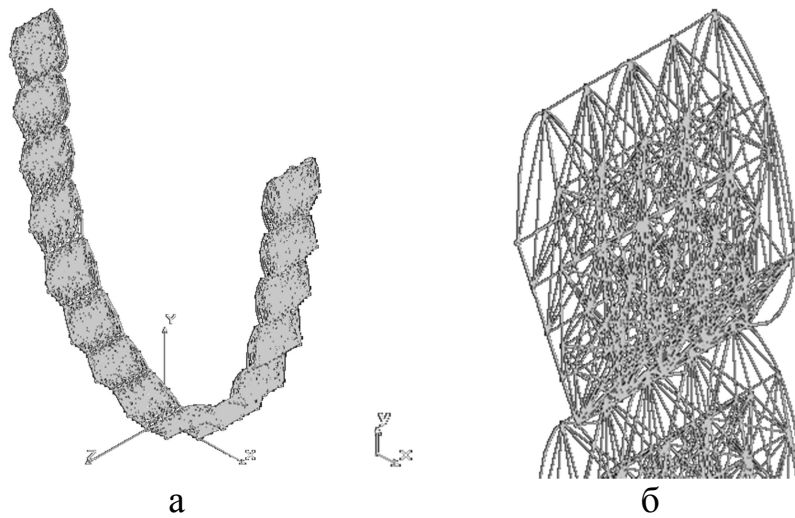


Рисунок 3.36 – Скінченно-елементна модель зубів, що контактують між собою, у процесі навантаження дротяною дугою брекет-системи



Рисунок 3.37 – Значення еквівалентних напружень

Максимальні значення напруг отримані більш високими, ніж допустимі при відносно низьких силах на зуби. Це пов'язано з тим, що необхідно

уточнювати умови закріплення зубів у пародонті. Отримані значення напруг значно нижчі від межі міцності матеріалу зубів, таким чином, установа брекети не призводить ні до руйнування зубів, ні до пошкодження зубної емалі.

### **Висновки за розділом 3**

1. Виконано формалізацію основних процесів проектування виробів складної геометрії, які дозволяють сформулювати модель брекет-системи за даними сканування й визначення просторового положення зубів щелепи людини.

2. Розроблено методику побудови анатомічних моделей зубів і брекет-систем з отриманням у САД-системі геометричної моделі, переданням інформації про точки установа брекети із PowerSHAPE у зовнішній програмний продукт для розрахунку навантажень на зуби методом скінченних елементів. Дані про навантаження можна використовувати для прогнозування керованих деформацій зубів у процесі лікування.

3. Виконано розроблення й реалізацію САПР брекет-систем за заданими параметрами, проте розроблена програмна система є прототипом і не претендує на повноту професійного опису проблем ортодонції.

4. Отримано основне рівняння МСЕ, яке може бути застосовано до розрахунку навантаження зубів від дії дуги брекет-системи. Виконано розрахунок для конкретного прикладу установа брекети, який показав, що розроблена програмна система спільно з PowerSHAPE забезпечує проектування брекет-систем.

### **Список використаних джерел**

1. Смирнов, Б. А. Зуботехническое дело в стоматологии : учебно-методическое пособие / Смирнов Б. А. – М. : АНМИ, 2002. – 460 с.
2. Трезубов, В. Н. Ортопедическая стоматология. Технология лечебных и профилактических аппаратов / Трезубов В. Н. – СПб : Спецлит, 2003. – 367 с.
3. Щербаков, А. С. Ортопедическая стоматология / Щербаков А. С. – СПб : Фолиант, 1998. – 576 с.
4. Штегер, Э. Анатомическая форма жевательной поверхности зуба : атлас и практическое руководство / Штегер Э. – СПб : Питер, 1996. – 102 с.
5. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / Норенков И. П. – М. : Изд-во МГУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
6. Gonza'lez, J. E. G. Study of the corrosion behavior of titanium and some of its alloys for biomedical and dental implant applications / J. E. G. Gonza'lez, J. C. Mirza-Rosca // Journal of Electroanalytical Chemistry.

7. Буч, Г. Язык UML : руководство пользователя : пер. с англ. / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон. – М. : ДМК, 2000. – 432 с.
8. Орлов, С. Технологии разработки программного обеспечения : учебник / Орлов С. – СПб : Питер, 2002. – 464 с.
9. Сабоннадьер, Ж. К. Метод конечных элементов и САПР : пер. с фр. / Сабоннадьер Ж. К. – М. : Мир, 1989. – 190 с.
10. Присин, В. Л. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел / Присин В. Л. – 2010. – 238 с.
11. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / Зенкевич О. – М. : Мир, 1975. – 347 с.
12. Овчаренко, В. А. Основи методу скінченних елементів і його застосування в інженерних розрахунках : навчальний посібник / В. А. Овчаренко, С. В. Подлесний, С. М. Зінченко – Краматорськ : ДДМА, 2007. – 344 с.
13. Трезубов, В. Н. Ортодонтия / В. Н. Трезубов, А. С. Щербаков, Р. А. Фадеев. – Нижний Новгород : Медицинская книга, 2001. – 148 с. – ISBN 5-86093-078-X.

## РОЗДІЛ 4

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ

#### 4.1 Вдосконалення конструкцій штампового оснащення, засобів автоматизації та пресового обладнання для реалізації процесу гвинтової екструзії

У автомобіле- і авіабудуванні, енергетиці, при виробництві виробів для медицини, електроніки та інших галузях часто виникає потреба в матеріалах з унікальними властивостями. Задовольнити її можна двома шляхами: 1) створенням нових сплавів і композиційних матеріалів; 2) виявленням нових можливостей відомих матеріалів шляхом спеціального їх оброблення. Перший шлях пов'язаний з варіюванням хімічного складу матеріалів, другий – зі зміною їх структур, текстур і фаз.

В останні 20 років багато лабораторій світу йдуть другим шляхом, використовуючи при цьому методи впливу на матеріали, об'єднані загальною назвою – інтенсивне пластичне деформування (ІПД) [1]. Поки що немає загальноприйнятого визначення ІПД, але вже можна відзначити її загальні риси. Перш за все, у результаті ІПД у металах і сплавах формується сильно розорієнтована, фрагментована, субмікрокристалічна структура деформаційного походження. Як правило, це відбувається при низьких гомологічних температурах, деформації Мізеса не менше 3–5 і рівні гідростатичного тиску не менше від межі плинності деформованого матеріалу. Найбільш ефективні процеси ІПД засновані на схемі простого зсуву.

Сьогодні відомий цілий ряд методів ІПД, серед яких найбільшого поширення набули: кручення під високим тиском [1; 2], рівноканальне кутове пресування (РККП) [1–3], 3D-кування (CCDF) [4], акумулювальне вальцювання [5], гвинтова екструзія (ГЕ) [6; 7]. Підхід до систематизації процесів ІПД подано в роботі [8].

Сприятливий вплив процесів ІПД на сплави обумовлено, у першу чергу, дуже сильним подрібненням зерен (у середньому, їх розмір зменшується в 1000 разів, від 100 мкм до 0,1 мкм) і формуванням спеціальних міжзеренних кордонів. Останні підвищують міцність матеріалу й забезпечують його високу пластичність завдяки тому, що допускають міжзеренне прослизання. Оскільки зазначені кордони визначають властивості матеріалів і при цьому мають товщину близько 1 нм, то отримані матеріали належать до класу наноструктурних [2]. ІПД може посилювати дію таких відомих механізмів зміни структури і властивостей, як твердорозчинне зміцнення, а також зміцнення, викликане дисперсними виділеннями різних фаз.

Зазначені вище ефекти дають такі переваги наноструктурним сплавам у порівнянні з традиційними:

- вища статична міцність (від 20 до 200 %, залежно від конкретних умов), у поєднанні з підвищеною пластичністю;
- вища втомна міцність (від 10 до 50 %, залежно від конкретних умов);
- підвищена ерозійна стійкість;
- висока однорідність структури на мікронних масштабах, що гарантує малий розкид властивостей при заданій технології оброблення сплаву;
- практично повна відсутність текстури та анізотропії;
- підвищена технологічність сплавів при обробленні різанням, що забезпечує можливість виготовлення прецизійних вузлів і деталей;
- зниження температури надпластичності, що забезпечує значне скорочення енерговитрат і збільшення виходу придатного металу при штампуванні в цьому режимі.

У процесах ІПД відбувається зміцнення матеріалу, крім того, деформування проводять в умовах істотного гідростатичного стиснення, що в цілому збільшує питомі зусилля деформування. Можливості підвищення температури для зниження навантажень при ІПД обмежені тим, що в матеріалі не повинні відбуватися рекристалізаційні процеси. Ці обмеження призводять до того, що деталі штампового оснащення при реалізації процесів ІПД працюють на межі своїх можливостей. Це підтверджують як експериментальні дослідження [1; 2; 6], так і розрахунки [11]. Значні питомі навантаження вимагають врахування комплексного впливу технологічного процесу й конструкції штамп на деформацію елементів штампового блоку і робочого інструмента [12]. Така ситуація проводиться, з одного боку, до обмеження технологічних можливостей самого процесу ІПД і переліку оброблюваних матеріалів, з іншого – перешкоджає його ширшому впровадженню в промислове виробництво.

При реалізації процесів ІПД використовують, як правило, два типи обладнання: універсальні гідравлічні преси з модернізацією системи поршня і Т-подібні преси, що забезпечують реверсивне деформування заготовки, можливість створення активних сил тертя, автоматизацію вилучення заготовки з каналу після деформування та інше. Крім того, обладнання відрізняється горизонтальним або вертикальним розташуванням силових циліндрів.

Промислове освоєння технологічного процесу ГЕ вимагає вдосконалення як універсального обладнання з метою його спеціалізації, так і засобів технологічного оснащення процесу [15].

Для вибору параметрів і забезпечення якості й надійності всієї технологічної системи потрібний також розгляд питань, пов'язаних із застосуванням систем автоматизованого проектування і моделювання процесів ІПД, штампового оснащення і устаткування [11; 16; 17].

Метою роботи є вдосконалення конструкцій обладнання, технологічної оснастки і засобів автоматизації для реалізації гвинтової екструзії. У рамках спільних робіт ДДМА і ДонФТІ НАН України виконано проектування, виготовлення та впровадження на базі ДонФТІ спеціалізованої

установки ГЕ зусиллям 4 МН, призначеної для оброблення сплавів титану. При проектуванні прийнято такі технічні характеристики пристрою протитиску до пресу 4 МН: максимальне зусилля протитиску – 630 кН, при поверненні – 240 кН; тиск у гідросистемі – 32 МПа; робочий хід – 500 мм. Система нагрівання штампового оснащення забезпечує температуру робочого інструмента до 400 °С, швидкість видавлювання заготовки – до 10 мм / с. Установа дозволяє отримувати зразки з титану з граничними розмірами 30 × 40 × 140 мм.

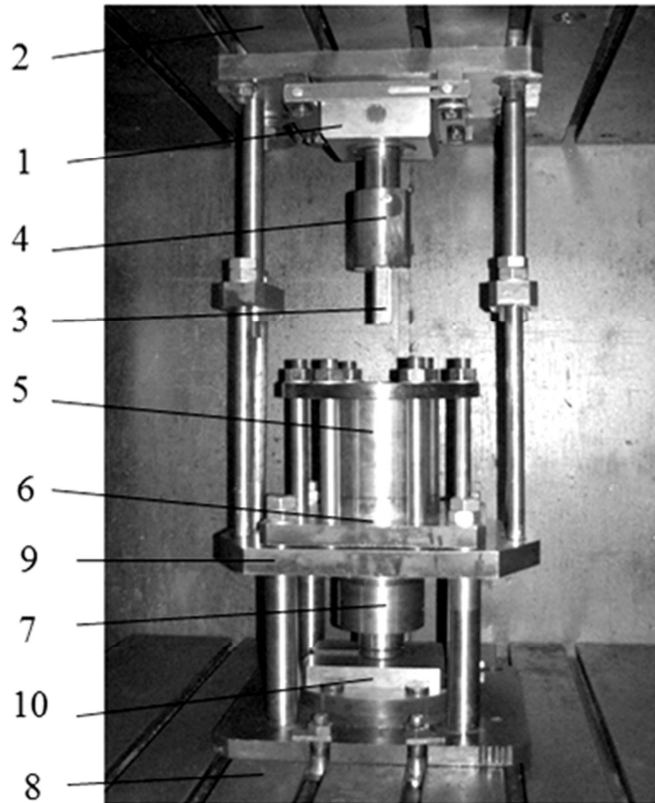
Пристроєм протитиску є гідравлічний циліндр подвійної дії поршневого типу. Виконавчий циліндр встановлений на окремій плиті під столом пресу між двома поздовжніми ребрами станини. Зверху кріплення циліндра здійснюється розрізним кільцем, встановленим у кільцевій проточці концентричного корпусу. Півкільця фіксуються опорним і додатковим фланцями, які передають робоче навантаження на станину, утримують елементи вузла в зборі і спрощують установа циліндра на пресі. Знизу циліндр кріпиться гайкою, яка закручується на корпусі циліндра до упору в поздовжні ребра станини преса. Приєднання нижнього пуансона штампового оснащення до штоку здійснюється через проставлення накидними гайками.

Поршнева й штокова порожнини виконавчого циліндра підключені до гідросистеми преса трубопроводами високого тиску. Керування циліндром здійснюється за допомогою додаткової гідропанелі, яка забезпечує плавне регулювання тиску в циліндрі й запобігання від мультиплікації високого тиску при роботі основного циліндра установки. Регулювання протитиску при ГЕ дозволяє отримувати якісні заготовки з титанових сплавів та інших матеріалів [3]. Застосування САД-системи при проектуванні дозволило перевірити кінематику зміщення елементів конструкції при роботі, виконати проектування гвинтового каналу матриці для подальшого виготовлення [18]. Застосування САЕ-системи забезпечило розрахунок елементів штампового оснащення, що працюють при високих питомих навантаженнях (до 1700 МПа) [13].

Розглянемо основні технологічні особливості конструкції та кінематики розробленого пресового устаткування й штампового оснащення для ГЕ. Особливістю штампового блоку є ряд нових технічних рішень для підвищення його ефективності та спрощення обслуговування. Конструктивно установка ГЕ (рис. 4.1) складається з декількох відносно незалежних вузлів. Вузол верхнього пуансона 1 кріпиться на верхній рухомій поперечині преса 2. При установа пуансона 3 в корпус закладають опори (сферична п'ята і підп'ятник), потім корпус з опорами пуансона кріплять на верхній плиті. Для підтримання й додаткового спрямування пуансона 3 передбачена напрямна втулка 4, зафіксована на пуансоні двома штифтами.

На нижній плиті встановлено такі блоки: основний контейнер 5, матричний вузол 6, приймальний контейнер 7. Основний контейнер і матричний вузол виконані двобандажними.





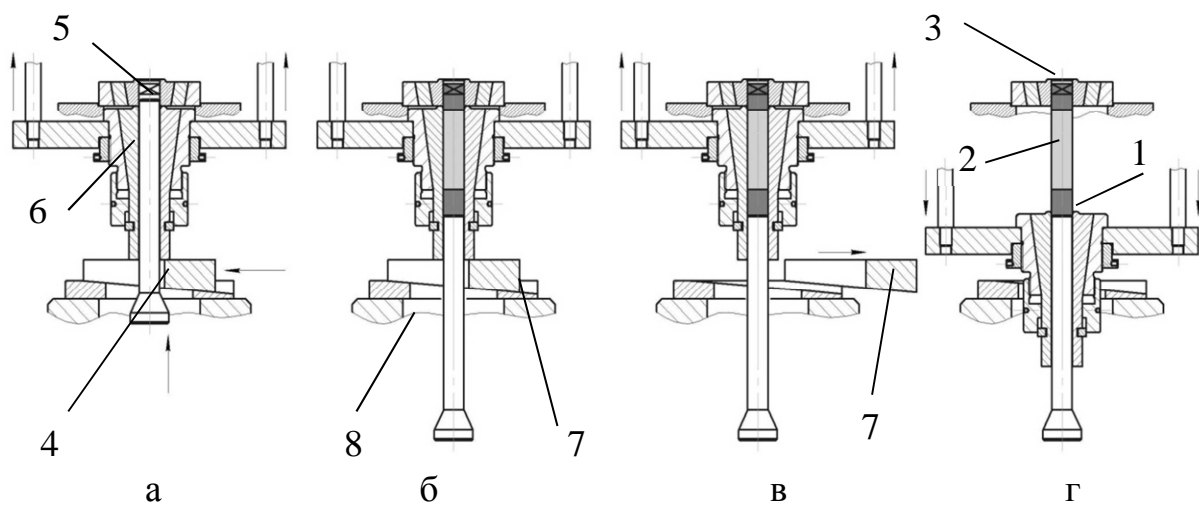
*Рисунок 4.1 – Штампи для гвинтової екструзії на пресі зусиллям 4 МН*

Кріплення матриці й основного контейнера між собою, а також до нижньої поперечини преса 8, здійснюється системою проміжних плит і шпильок 9. Для переміщення деталей блоку приймального контейнера передбачено пересувні плита і тяги, що кріпляться на верхній рухомій поперечині преса 1.

Для спрощення оброблення робочого каналу заданої форми приймальний контейнер виконаний роз'ємним з двох полуматриць. Останні розміщені в бандажі, який забезпечує силове замикання, розкриття й утримання полуматриць. Така конструкція дозволяє поліпшити доступ до каналу й опорної поверхні полуматриць для змащення, а також спростити видалення деталі без розбирання штампа. На нижній базовій плиті встановлено клин 10, який притискає приймальний контейнер до нижнього торця матриці й замикає зусилля пресування на нижній базовій плиті штампа і преса 8.

Для наочності роботи запропонованої конструкції приймального контейнера на рис. 4.2 показано цикл його роботи. У процесі ГЕ в контейнер (не показаний) встановлюють фальшзаготовку 1, потім заготовку 2 і знову фальшзаготовку 3. Нижній пуансон 4 підіймають за допомогою циліндра протитиску в верхнє положення, торець нижнього пуансона розташовується під гвинтовою матрицею 5 (див. рис. 4.2, а). Для обмеження верхнього положення пуансона 4 на штоку циліндра протитиску встановлений упор, який упирається знизу в стіл преса 8. При цьому кріплення нижньої плити штампа розвантажено від зусилля циліндра пристрою протитиску. Після цього верхню поперечину з пуансоном опускають і продавлюють фальшза-

готовки 1, 3 і заготовку 2 через матрицю 5 у приймальний контейнер 6 (див. рис. 4.2, б), який спирається на клин 7 з пазом для розміщення нижнього пуансона. Через клин зусилля передається на нижню плиту преса 8. У процесі пресування пуансон 4 відходить у нижнє положення, створюючи зусилля протидії тиску на основну заготовку 2 через фальшзаготовку 1. Після пресування верхню поперечину підіймають у крайнє верхнє положення, забезпечуючи зняття навантаження з клина 7, що фіксує приймальний контейнер, і витягають клин (див. рис. 4.2, в). Далі з ходом верхньої поперечини вниз виконують переміщення приймального контейнера 6, при цьому відбувається звільнення обробленої заготовки 2 (див. рис. 4.2, г) і її витягують разом з нижньою фальшзаготовкою 1. Верхня фальшзаготовка 3 не витягується і залишається в матриці 5. Після вилучення й огляду заготовки й елементів оснащення поперечина пресу підіймається вгору, оснащення закривається і, за необхідності, цикл роботи повторюється.



*Рисунок 4.2 – Цикл роботи матриці й приймального контейнера спеціалізованої установки гвинтової екструзії 4 МН*

У процесі експериментів відпрацьовано технологію отримання заготовок наноструктурованого титану ВТ1-0 ГОСТ 26492-85 (хімічний склад – ГОСТ19807-91) з розмірами 30 × 40 × 140 мм.

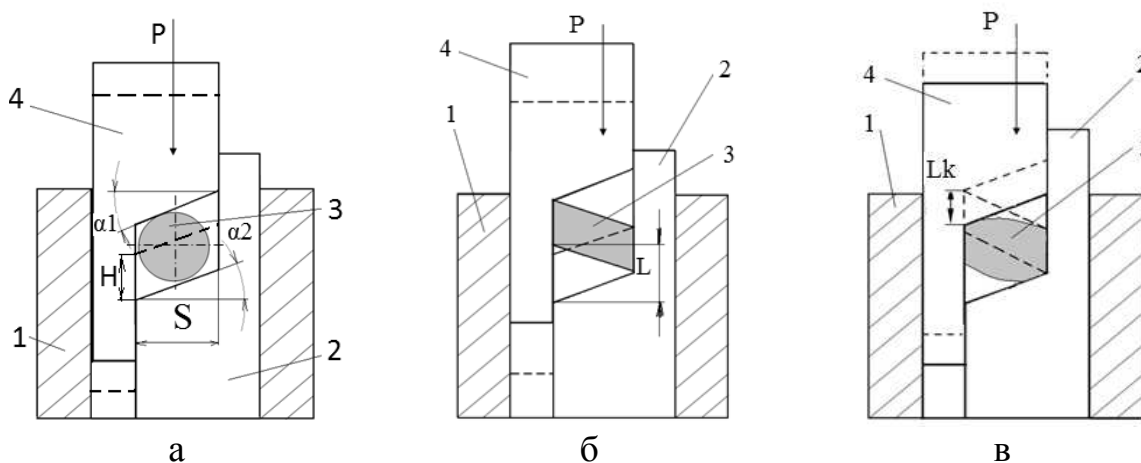
Перспективними напрямками для подальшого вдосконалення процесу ГЕ і обладнання є: розроблення нових схем деформування з інтенсифікацією зсувів з метою підвищення виходу придатного оброблюваного матеріалу; конструктивне спрощення й підвищення жорсткості технологічного оснащення, що працює в умовах складного просторового навантаження; підвищення температури нагрівання оснащення й швидкості рухомих частин обладнання для розширення номенклатури оброблюваних матеріалів; автоматизація установки для ГЕ; розроблення систем автоматизованого проектування технологічного процесу й штампового оснащення для спрощення модифікації конструкцій.

## 4.2 Модель процесу деформування за схемою реверсивного зсуву

Застосування онтологічного підходу для систематизації та структурованого подання ключових конструктивно-технологічних параметрів процесу ПД створює основу для розроблення бази знань і можливості раціонального вибору або створення нових схем ПД, визначає шляхи керування основними параметрами якості одержуваних виробів.

Запропоновано спосіб деформування реверсивним зсувом (РЗ, РЗ-180) [19], при якому заготовку фіксують в штампі по довжині і деформують її поперечний переріз з одночасною формозміною всього обсягу заготовки в умовах плоского деформованого стану.

Запропонований спосіб здійснюється так. У матрицю 1 (рис. 4.3, а), яка жорстко зафіксована, встановлюють пуансон 2, який обмежений у русі внутрішньою порожниною матриці і має одну з деформівних поверхонь, нахилена під кутом  $\alpha$  до площини, перпендикулярній осі деформування.



*а – початкове положення заготовки; б – положення заготовки на початку другої і наступних операцій; в – положення заготовки на останній операції*

*Рисунок 4.3 – Схема ПД реверсивним зсувом (РЗ)*

Потім на деформівну поверхню встановлюють заготовку 3 з поперечним перерізом довільної форми, при цьому один із розмірів перерізу заготовки не перевищує ширину порожнини штампа S (рис. 4.3, а), що дозволяє використовувати заготовки з різними формами перерізу на першій операції деформування, при якій заготовка поступово набуває форми у вигляді паралелограма з двома сторонами, паралельними осі деформування; при цьому будуть відбуватися деформування вздовж двох осей, а по довжині розмір заготовки збігається з шириною порожнини матриці 1 (рис. 4.3, а) і таким чином заготовка обмежена в поздовжньому переміщенні порожниною матриці (уздовж поздовжньої осі), що створює схему плоского деформованого стану в поперечному перерізі заготовки. Зверху заготовки встановлюють пуансон 4 (рис. 4.3), до якого прикладають деформівне зусилля Р, пуансони

2 і 4 мають однакову форму похилої деформівної поверхні. Після деформування заготовку витягують зі штампу, виконують повертання на  $180^\circ$  по осі деформування і встановлюють знову в штамп, як показано на рис. 4.3, б, і таким чином змінюють на кожній наступній операції напрямок деформування. Потім знову переформовують отриманий поперечний переріз заготовки тепер уже в умовах стисненого формування при постійному обмеженні та поперечному деформуванні в перерізі заготовки таким чином, що гострі та тупі кути поперечного перерізу міняються місцями, при цьому хід деформування становить L.

Етапи деформування повторюють до отримання необхідної дрібнозернистої структури. На останній операції (рис. 4.3, в) хід деформування Lk зменшують у 2 рази і відновлюють близьку до симетричної форму поперечного перерізу заготовки.

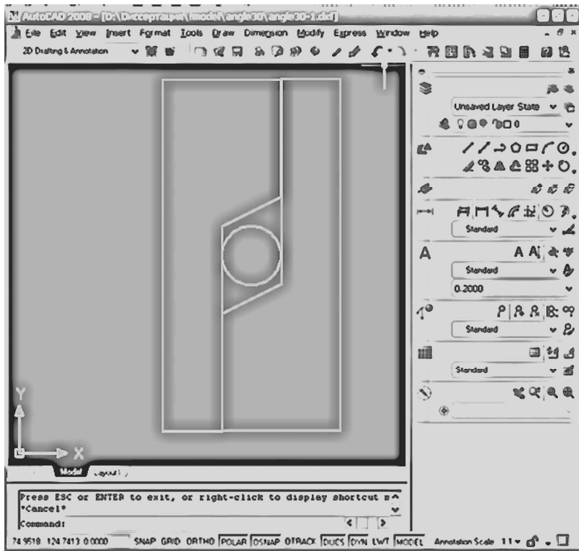
Для розроблення розрахункової моделі й вибору методів дослідження розглянемо схему деформування реверсивним зсувом, яка включає жорстко зафіксовану матрицю 1, пуансон 2, 4 з деформівними поверхнями, розташованими під кутами  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  (рис. 4.3). Пуансон й заготовка розташовані в порожнині матриці, їх рух у горизонтальній площині обмежений матрицею. Рух по вертикалі нижнього пуансона обмежений плитою пресу. Весь технологічний процес за схемою PЗ включає першу операцію, під час якої заготовка довільного поперечного перерізу (коло, квадрат, прямокутник, шестигранник тощо) набуває форми перерізу у вигляді паралелограму (рис. 4.3, а). Для виконання подальших операцій деформування виконується повертання заготовки між операціями згідно з прийнятою схемою деформування.

Для реалізації процесу деформування за схемою реверсивного зсуву потрібне просте штампове оснащення та універсальне обладнання. У порівнянні зі штамповим оснащенням для процесів ПД гвинтової екструзії та рівноканального кутового пресування, штампове оснащення для схеми PЗ більш просте у виготовленні, що позитивно впливає на собівартість отримання заготовок.

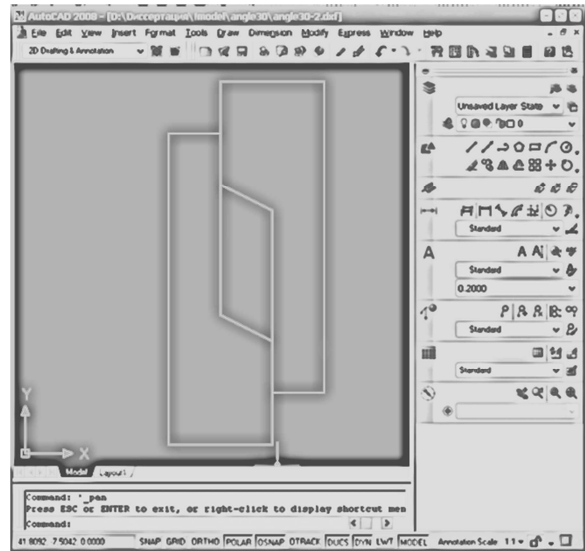
#### ***4.2.1 Проектування штампового оснащення для моделювання операцій ПД заготовок методом реверсивного зсуву***

Під час проектування оснащення за схемою ПД реверсивним зсувом були підготовлені графічні моделі у форматі .DXF для 4 операцій деформування заготовки. Геометрія пуансонів задавалася за допомогою інструмента програми AutoCAD «полілінія». Графічна модель для першої операції (рис. 4.4) включає два пуанسونи і заготовку.

Для прискорення проектування та забезпечення точності побудови можна побудувати один із пуансонів, а другий пуансон побудувати шляхом копіювання і дзеркального відображення щодо осей X і Y.



*a*



*б*

*Рисунок 4.4 – Проектування оснащення для непарних (а) і парних (б) операцій*

Побудовані графічні моделі необхідно зберегти в текстовому форматі .DXF для можливості використання в САЕ-системі QForm. При проектуванні графічної моделі для другої операції деформування (рис. 4.4.) необхідно врахувати таке:

- 1) кут нахилу деформівних поверхонь змінюється на протилежний;
- 2) робочий простір вздовж осі X має залишитися незмінним;
- 3) графічна модель включає тільки пуанسونи.

Проектування графічної моделі для третьої операції деформування (рис. 4.5) виконується так само, як і для першої операції, за винятком заготовки. Проектування графічної моделі для четвертої операції не потрібне, тому що вона повністю збігається з графічною моделлю для другої операції.

Крім базової схеми деформування (реверсивний зсув), були спроектовані графічні 2D-моделі більш ніж 10 аналогічних схем.

Підготовлені графічні моделі у форматі .DXF були імпортовані в редактор геометрії QForm. Графічна модель (рис. 4.5) містить інформацію по трьох ланцюжках, що описують два пуанسونи і заготовку. Послідовно виділяючи кожен з ланцюжків, необхідно призначити тип частини. Наприклад, виділивши верхній пуансон, необхідно вказати, що в розрахунковій моделі він буде мати ім'я «tool1», нижній пуансон матиме ім'я «tool2», заготовка матиме ім'я «wpiece» (рис. 4.5).

Після задавання імен частин у розрахунковій моделі необхідно зберегти її у форматі .CRS. Цей формат використовується в QForm для плоских розрахункових завдань. У ряді випадків не вдається побудувати розрахункову модель на основі графічної моделі через її некоректність. Через помилки при побудові графічної моделі редактор геометрії не може знайти замкнуті ланцюжки. У таких випадках необхідно перевірити графічну модель або побудувати її заново. Так само при побудові пуансонів шляхом дзерка-

льного копіювання та наявності заокруглень, в редакторі геометрії QForm фрагменти заокруглення губляться і їх необхідно побудувати заново.

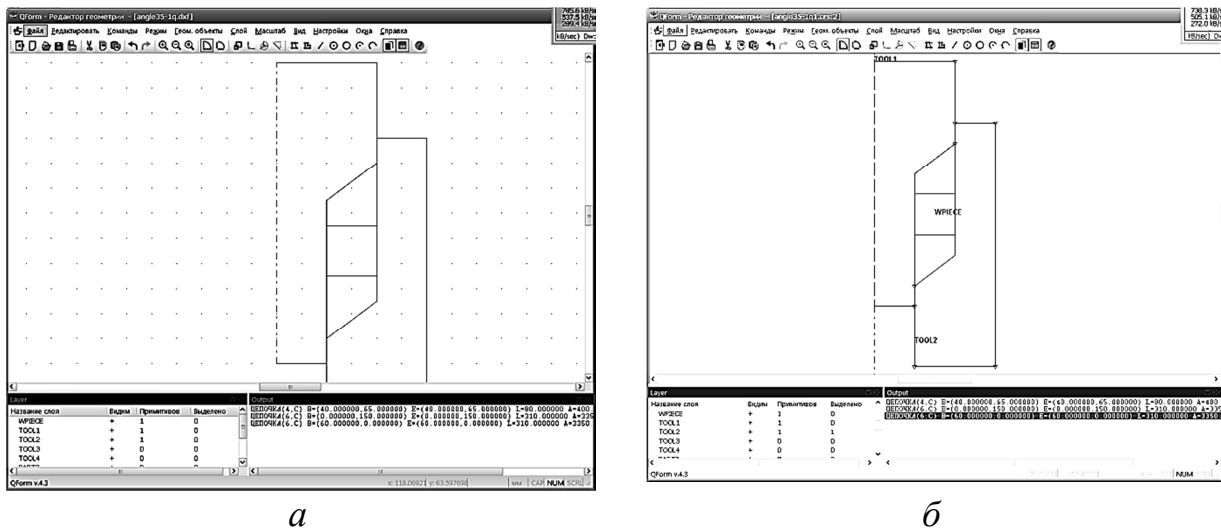


Рисунок 4.5 – Імпорт графічної моделі в редакторі геометрії QForm

CAE-система QForm має дружній інтерфейс і дозволяє дуже швидко скласти розрахункову модель на основі підготовленої графічної моделі. При складанні розрахункової моделі використовується майстер, який включає кілька кроків.

1. Вибирається «Вид процесу». Для процесу ПД «реверсивний зсув» необхідно вибрати «Гідравлічний прес».

2. Вибирається тип форми заготовки і вид процесів, які моделюються в заготовці, а також необхідність моделювання процесів у інструменті.

3. Вибір файлу геометрії у форматі .CRS для плоскої задачі деформування. У нижній частині відображається тип форми заготовки, перелік файлів геометрії й поточна обрана геометрія із зазначенням імен інструментів і заготовки. У разі, якщо файл геометрії через якісь причини не може бути використаний (порушення послідовності інструменту, невірні розміри по горизонталі), відбувається блокування кнопки «Вперед» і подальші кроки майстра будуть заблоковані доти, поки не буде обраний коректний файл геометрії.

4. Вибір додаткових операцій. Для плоскої задачі деформування більшість додаткових операцій заблоковано. Додаткова операція «Ручне позиціонування, повертання» доступна тільки при виборі об'ємної моделі деформування.

5. Вибір технологічного обладнання. Список технологічного обладнання можна змінювати за допомогою «Редактора обладнання».

6. Вибір параметрів технологічного процесу. Потрібно вибрати варіант зупинки розрахунку й задати відстань між верхнім і нижнім інструментами. Відстань між інструментами вибирається в найбільш близьких точках.

7. Вибір параметрів заготовки. Вибирається матеріал заготовки і температура деформування.

8. Вибір параметрів інструменту. Вибирається тип мастила між інструментом і заготовкою й температура інструменту.

Вибравши всі необхідні параметри, необхідно зберегти розрахункову модель у форматі QFM.

Розглянуті кроки потрібно виконувати для кожної операції деформування. Таким чином, якщо необхідні чотири операції деформування, то кроки повторюються чотири рази.

#### ***4.2.2 Розроблення САПР оснащення для інтенсивного пластичного деформування заготовок за схемою реверсивного зсуву***

Для деталей, що мають однакову форму, але різні геометричні розміри, ефективним є застосування параметричного моделювання. Основний принцип параметризації – встановлення при проектуванні залежностей між параметрами елементів моделі й створення геометричної моделі з урахуванням співвідношень між цими параметрами. Параметричне моделювання є одним з пріоритетних напрямків розвитку САПР і лежить в основі цілого ряду CAD-систем (Creo, фірми ParametricTechnologyCorporation, T-FLEX CAD, фірми «Топ Системи» тощо) [20–21].

Параметричне проектування використовує математичну модель пов'язаних в єдину систему параметрів об'єктів, на основі якої змінюються геометричні моделі деталей і їх положення в збірці, коли змінюються базові вихідні параметри. Завдання, яке вирішують при параметризації конструкції, – збереження її цілісності при зміні розмірів у межах заданого ряду проєктованих об'єктів.

Параметричне проектування особливо ефективно в машинобудуванні для типових і стандартних деталей, розміри яких регламентовані існуючими стандартами. Фірми, які постачають різне комплектування, надають і таблиці, геометричні моделі, у яких зберігаються значення змінних розмірів деталей, що постачаються [22]. У процесі побудови зображення розміри, за необхідності, можуть коригуватися.

Таким чином, САПР повинна мати можливість побудувати штампове оснащення в умовах, коли базові розміри заготовки можуть змінюватися.

Розглянемо проектування оснащення для реалізації процесу ІПД методом реверсивного зсуву (рис. 4.6) у CAD-системі PowerSHAPE [23].

Створення параметричної моделі штампового оснащення для схеми ІПД РЗ реалізовано в додатку Implant. САПР має можливість побудувати модель оснащення, причому основна маса розмірів розраховується в процесі проектування. Параметризація розмірів дозволяє розширити варіативність проєктованого оснащення. Після побудови параметричної моделі додаток «Імплант» виконує експорт моделі в форматі .stp, який можна використовувати в CAD/CAE-системах для подальшого моделювання.

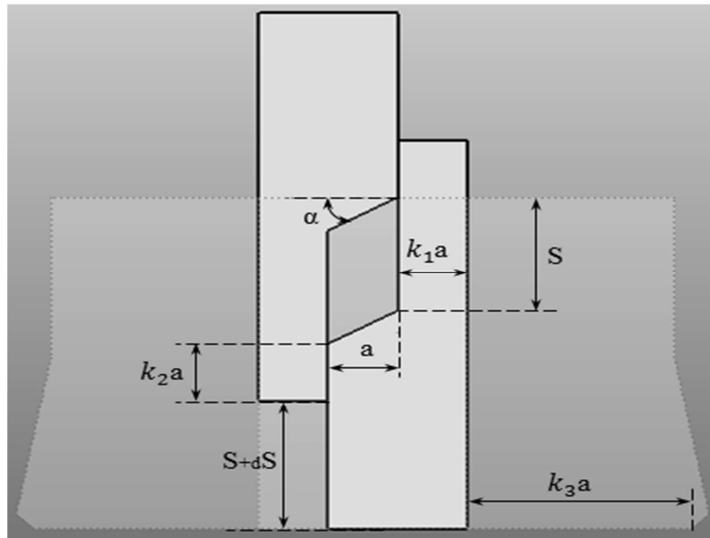


Рисунок 4.6 – Базові розміри для побудови моделі

У цьому разі координати масиву точок контуру розраховуються за такими залежностями (рис. 4.7) з урахуванням змінних параметрів оснащення ( $A$ ,  $S$ ,  $\alpha$ ,  $b$ ).

```

points[0] = new psPoint3D(0, 0, 0);
points[1] = new psPoint3D(0 - 0.25 * a, 0, 0);
points[2] = new psPoint3D(0 - 0.5 * a, 0, 0.25 * a);
points[3] = new psPoint3D(0, 0, 1.5 * S);
points[4] = new psPoint3D(0, 0, ((S + dS + (k2 * a)) + (a * Math.Tan(alpha)) + S));
points[5] = new psPoint3D(2 * (k3 * a + k1 * a) + a, 0, (S + dS + (k2 * a)) + (a *
Math.Tan(alpha)) + S);
points[6] = new psPoint3D(2 * (k3 * a + k1 * a) + a, 0, 1.5 * S);
points[7] = new psPoint3D(2 * (k3 * a + k1 * a) + 0.5 * a + a, 0, 0.25 * a);
points[8] = new psPoint3D(2 * (k3 * a + k1 * a) + a + 0.25 * a, 0, 0);
points[9] = new psPoint3D(2 * (k3 * a + k1 * a) + a, 0, 0);
points[10] = new psPoint3D(0, 0, 0);

```

Рисунок 4.7 – Розрахунок масиву точок штампового оснащення

Розроблений додаток для візуального структурного проектування імплантату і оснащення є оболонкою, у яку, за вибором конструктора, динамічно поміщається параметрична модель оснащення. На рис. 4.8 наведено головну форму розробленого програмного продукту після завантаження моделі оснащення.

Для початку роботи з додатком необхідно вибрати тип оснащення, яке ми хочемо спроектувати. Список виробів знаходиться в випадному списку «Вибір типу оснащення» (див. рис. 4.8, 1). Значення типів оснащення завантажуються в список з бази даних автоматично при запуску програми. Як тільки тип оснащення обраний, для нього будуть складені списки деталей (2), а також базових параметрів (3), і показаний кресленик (4). Їх значення, так само, як і список оснащення, будуть завантажені з бази даних.



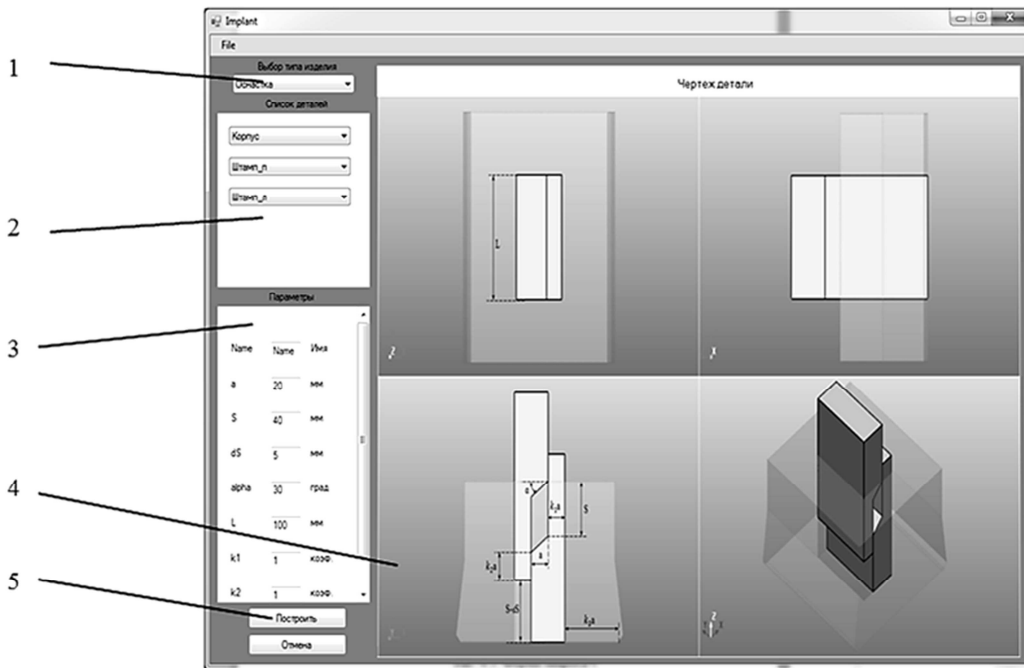


Рисунок 4.8 – Кресленик і список параметрів для обраного оснащення

Як видно з рис. 4.8, значення полів деталей і параметрів заповнюються значеннями «за умовчанням». Для деталей – це перша деталь зі списку. Після того, як значення всіх полів задані, при натисканні кнопки «Побудувати» запускається алгоритм розрахунку і побудова оснащення.

У цьому разі після розрахунку робочого контуру виконується побудова об'ємної моделі оснастки. При виклику методу задаються довжина витягування й ім'я, яке отримає побудоване тіло: `Work.CreateSolid (name, L)`. Результат процесу проектування наведено на рис. 4.9.

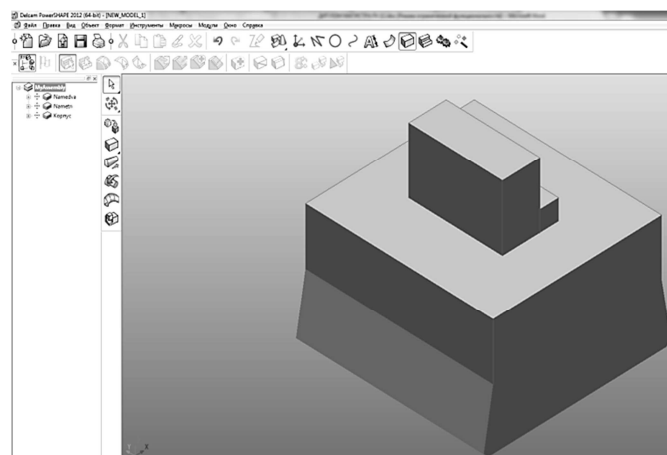


Рисунок 4.9 – Геометрична модель штампового оснащення для процесу РЗ в пакеті Delcam PowerShape

Отримана параметрична модель штампового оснащення в графічному форматі .str була використана для розрахунків процесу ПД по схемі РЗ в САЕ-системі QFORM. Параметри геометричних поверхонь, сполучення поверхонь параметричної моделі, отриманої за допомогою програми

«Імплант», відповідають вимогам і не викликають конфліктів при побудові розрахункової моделі в САЕ-системі QForm.

Для оцінювання часу, що витрачається на побудову деталей, у код програми був доданий лічильник Stopwatch з бібліотеки System.Diagnostics, що дозволяє виміряти час виконання коду. Щоб складність побудови кожної з деталей не впливала на загальний результат, побудову деталей проводили в різній послідовності (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати проектування оснащення, мс

Кількість деталей	Одна	«Чистий» час побудови 1/2/3	Дві	Три
Експеримент 1 (1 – 2 – 3)	1326	1214	3948	5174
Експеримент 2 (2 – 3 – 1)	2704	2568	3951	5165
Експеримент 3 (3 – 1 – 2)	1338	1226	2595	5163
Загальний час		5008		5163

Як видно з табл. 4.1, на побудову першої деталі потрібно більше часу, ніж на інші. Якщо скласти витрати часу на побудову кожної з деталей, то їх сума не відповідає часу побудови всіх трьох виробів разом. При великій кількості деталей у збірці це може бути важливим для зниження загального часу побудови параметричної моделі.

### 4.3 Моделювання процесу деформування за схемою реверсивного зсуву в САЕ-системі ABAQUS

Теоретичні дослідження процесу ПД за схемою РЗ виконані за допомогою програми скінченно-елементного аналізу ABAQUS, яка використовувалася рядом дослідників теоретичних розрахунків МСЕ інших методів ПД [24–27]. Складено математичну модель і виконано розрахунки за схемою РЗ для плоскої та об'ємної задачі деформування заготовки. У якості матеріалу заготовки обрано мідь марки М1. Матеріал заготовки розглядався як пружно-пластичне тіло з ізотропним зміцненням. Криву зміцнення було отримано під час випробування зразків на розтягнення. Розміри вихідної заготовки: діаметр – 20 мм, довжина – 40 мм. Моделювання проводили при температурі 200 °С.

Проаналізовано деформований стан заготовки в умовах плоскої схеми деформування після 4 операцій. Виконано моделювання з варіюванням таких чинників:

- кути нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2$  у діапазоні 20...35° з інтервалом 5°;
- співвідношення сторін поперечного перерізу заготовки Н/С змінювали в межах 0,8...1,1;
- коефіцієнт тертя  $\mu$  за законом Кулона брали 0,05; 0,1; 0,15; 0,2.

Для вивчення впливу форми вихідної заготовки обрані перерізи у вигляді кола й прямокутника як такі, що найбільш часто зустрічаються в промисловому виробництві у вигляді прокату [28].

Розподіл і значення еквівалентних деформацій для заготовок з різними значеннями співвідношення сторін перерізу заготовки  $H/S$  при кутах нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ , коефіцієнті тертя  $\mu = 0,15$  для 4-ї операції показано на рис. 4.10.

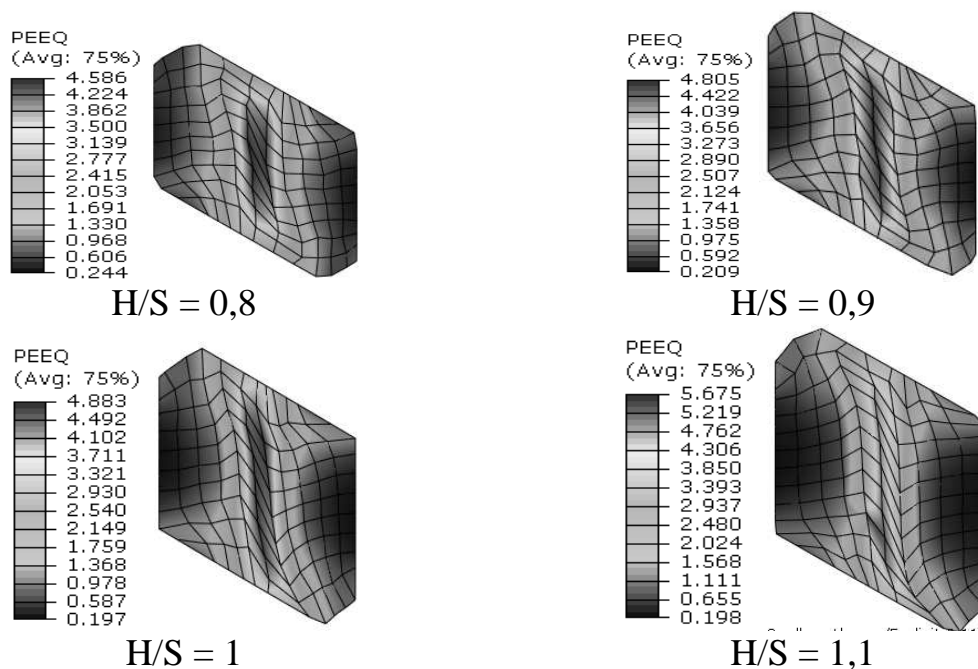


Рисунок 4.10 – Розподіл і значення еквівалентних деформацій  $\epsilon_{eq}$  для 4-ї операції за схемою P3 при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu=0,15$  з різним співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S$

Під час теоретичних досліджень встановлено, що зміна співвідношення розмірів заготовки  $H/S$  у бік збільшення практично не впливає на нерівномірність розподілу деформації, але викликає зменшення максимальної величини ступеня деформації в центрі заготовки. Рациональним співвідношенням розмірів перерізу заготовки за цим показником є  $0,7 \dots 1$ .

З графіка  $K_e(H/S)$  (рис. 4.11) видно, що нерівномірність розподілу деформацій для першої операції істотно відрізняється, що викликано зміною форми вихідної заготовки з прямокутника в паралелограм. Форма заготовки на початку і в кінці деформування для 2, 3 і 4-ї операцій не змінюється, тому характер зміни нерівномірності розподілу деформацій практично не змінюється. Таким чином, можна зробити висновок про несуттєвий вплив цього параметра ( $H/S$ ) на характер розподілу деформації по перерізу заготовки.

Зменшення співвідношення сторін перерізу заготовки приводить до зменшення і локалізації осередку деформацій, а отже, до утворення великих градієнтів деформацій і може викликати утворення дефектів у матеріалі заготовки. При цьому збільшення співвідношення сторін  $H/S$  приво-

дить до збільшення максимального значення еквівалентних деформацій (на 24 % при збільшенні  $H/S$  з 0,8 до 1,1), розтягування осередку, який розташований у центрі заготовки, і збільшення слабо деформованих зон, розташованих уздовж вертикальних стінок інструменту.

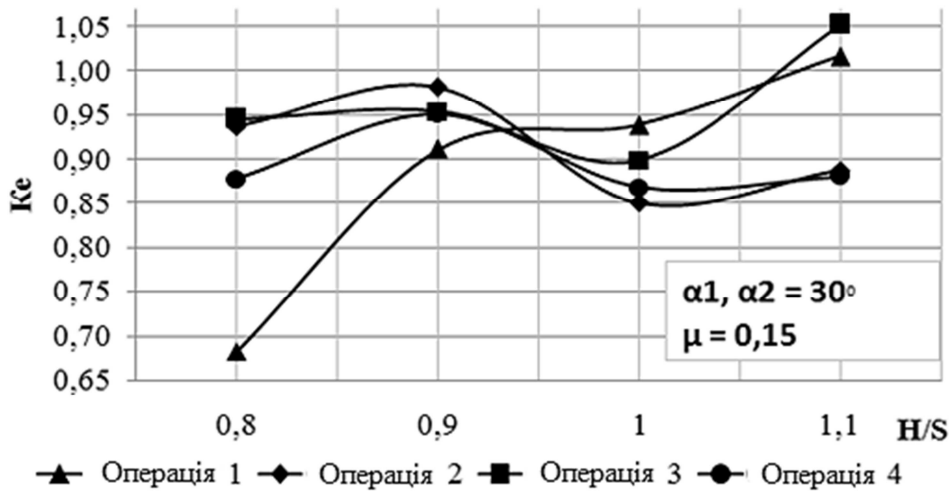


Рисунок 4.11 – Вплив співвідношення сторін перерізу заготовки  $H/S$  на нерівномірність деформацій  $K_e$

Результати моделювання з різним співвідношенням сторін  $H/S$  показують, що при збільшенні  $H/S$  стабілізується поведінка заготовки в процесі деформування. Так, можна відзначити, що використання заготовки із співвідношенням  $H/S = 1,1$  і інструменту з кутами нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2 = 35^\circ$  при різних значеннях  $\mu$  дозволяє домогтися стабільного протікання процесу деформування при всіх операціях, незалежно від форми вихідної заготовки.

Збільшення співвідношення сторін  $H/S$  приводить до збільшення гідростатичного стиснення  $\sigma_0$  на 38 % при зміні  $H/S$  від 0,8 до 1,0 (рис. 4.12), що дозволяє регулювати  $\sigma_0$  для підвищення пластичності матеріалу заготовки.

Збільшення гідростатичного стиснення спостерігається в центрі й вздовж похилих поверхонь заготовки, що пов'язано з тертям на контактних поверхнях інструменту. Характер зміни гідростатичного стиснення  $\sigma_0$  для кожної операції однаковий, величина  $\sigma_0$  зростає в кінці кожної операції, що викликано зростанням площі контакту заготовки й інструмента.

Розподіл і значення еквівалентних деформацій для різних кутів нахилу деформівної поверхні  $\alpha_1, \alpha_2$  при співвідношенні сторін перерізу заготовки  $H/S$  0,9 і коефіцієнті тертя  $\mu = 0,15$  для 4-ї операції наведено на рис. 4.13.

У результаті дослідження встановлено вплив кутів нахилу на розподіл еквівалентних деформацій, який показав, що зі збільшенням кутів нахилу величина деформації не змінюється, а розподіл більш рівномірний по перерізу заготовки. У схемі з кутом нахилу  $20^\circ$  у центрі заготовки видно яскраво виражений осередок деформацій. Також найбільша площа слабо деформованої зони спостерігається при мінімальному куті нахилу деформівної поверхні.

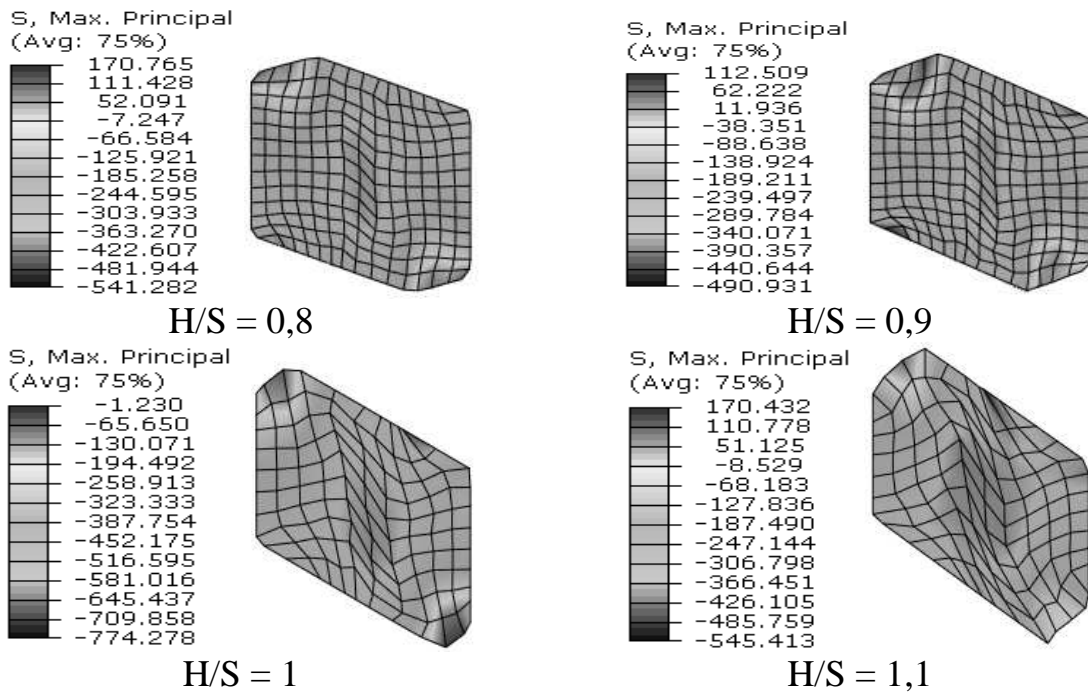


Рисунок 4.12 – Розподіл і значення гідростатичного стискування  $\sigma_0$  для 4-ї операції за схемою P3 при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ, \mu = 0,15$  з різним співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S$

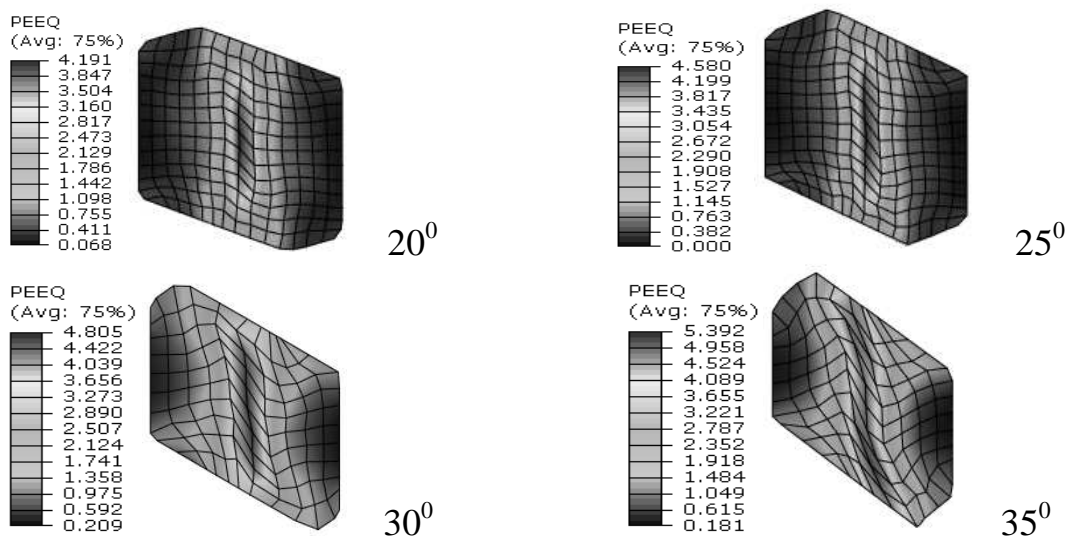


Рисунок 4.13 – Розподіл і значення еквівалентних деформацій для 4-ї операції за схемою P3  $H/S = 0,9, \mu = 0,15$  з різним значенням кутів нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2$

Моделювання при кутах понад  $20^\circ$  показало нестабільну поведінку заготовки при другій і наступних операціях, пов'язану з самовільним повертанням заготовки в процесі деформування і порушенням заданої схеми. Надалі ухвалено рішення обмежитися моделюванням з кутами нахилу деформівної поверхні  $20^\circ, 25^\circ$  і  $30^\circ$ .

Встановлено, що збільшення кутів нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2$  не викликає істотної зміни коефіцієнта нерівномірності розподілу

деформації в перерізі заготовки (рис. 4.14), але збільшує максимальні значення накопиченої деформації на 27,6 %.

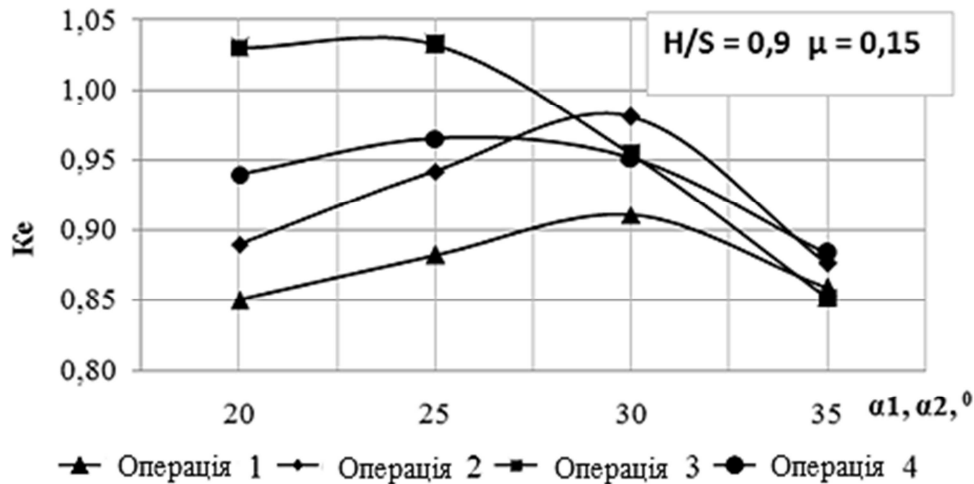


Рисунок 4.14 – Вплив кутів нахилу деформівних поверхонь пуансонів  $\alpha_1, \alpha_2$  на нерівномірність деформації  $K_\epsilon$

Збільшення кутів нахилу деформівних поверхонь пуансонів понад  $20^\circ$  призводить до нестабільної поведінки заготовки під час другої і наступних операцій формозмінення, тому раціональними кутами нахилу деформівних поверхонь є  $\alpha_1, \alpha_2 = 25 \dots 30^\circ$ .

Дослідження впливу тертя на ПД заготовки проводилося з використанням закону тертя Кулона. Коефіцієнт тертя за законом Кулона задавався значеннями  $\mu$  0,05; 0,1; 0,15 і 0,2. Виконано моделювання для 4 операцій за схемою РЗ з повертанням на  $180^\circ$  для матеріалу мідь М1 при температурі  $20^\circ\text{C}$ .

Під час вивчення впливу тертя на НДС заготовки встановлено (рис. 4.15, 4.16), що збільшення тертя на контактних поверхнях призводить до локалізації осередку деформації, збільшення нерівномірності деформацій по перерізу і зростанню максимальних значень деформацій у центрі заготовки, при цьому величина еквівалентних деформацій  $\epsilon_{eq}$  у центрі заготовки збільшується від значення 4,19 для коефіцієнта тертя 0,05 до 5,27 для коефіцієнта тертя 0,2. Збільшення коефіцієнту тертя призводить до збільшення площі слабо деформованих зон при терті 0,05 з 27 % площі перерізу заготовки до 72 % при терті 0,2.

Збільшення тертя призводить до утворення слабо деформованих зон уздовж вертикальних сторін, що пов'язано з обмеженням течії металу уздовж похилих поверхонь інструменту і фіксацією матеріалу в тупих кутах штампа, і, внаслідок цього, більш інтенсивного руху середніх шарів заготовки, що збільшує й локалізує зсувні деформації в центрі заготовки, а також призводить до збільшення градієнту деформацій по перерізу заготовки.

Зниження коефіцієнта тертя понад 0,1 при зменшенні співвідношення сторін більше 0,8 і збільшенні кутів нахилу деформівних поверхонь понад  $30^\circ$  призводить до самовільного повертання заготовки та порушення схеми РЗ. Таким чином, для заготовок із співвідношенням  $H/S \leq 0,8$   $\alpha_1,$

$\alpha_2 \leq 30$  доцільним є збільшення тертя до 0,2 з метою стабілізації проходження процесу деформування.

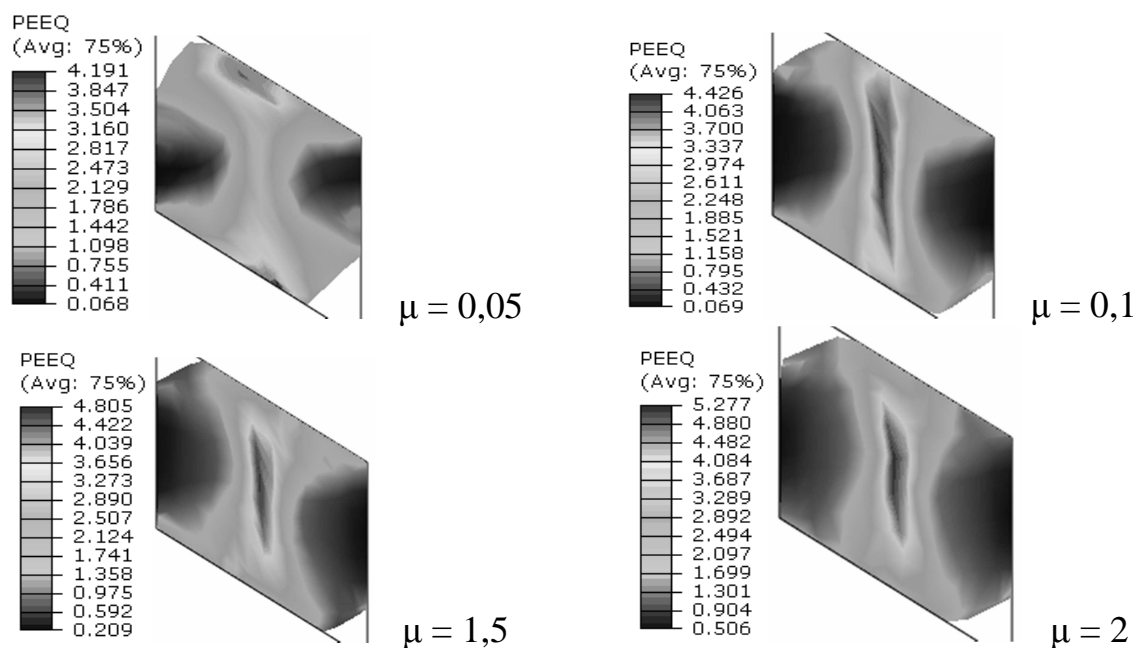


Рисунок 4.15 – Розподіл і значення еквівалентних деформацій для 4-ї операції за схемою P3  $H/S = 0,9$ ,  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$  з різним значенням коефіцієнта тертя  $\mu$

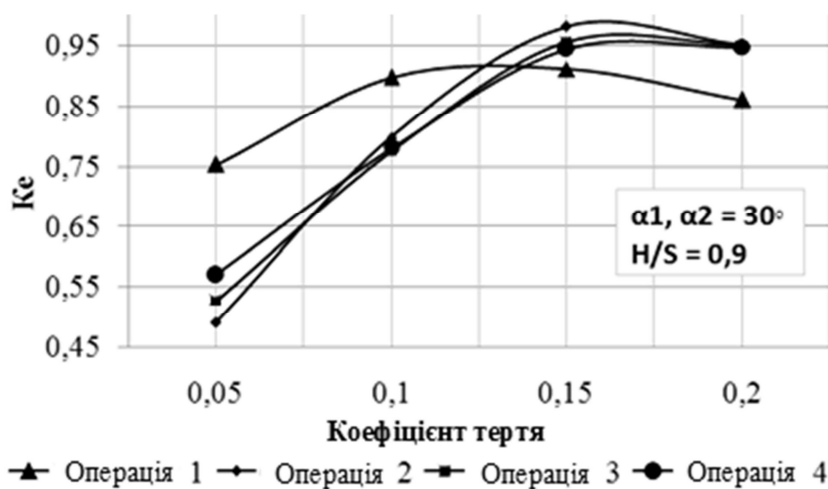


Рисунок 4.16 – Вплив тертя на нерівномірність деформації

Вивчивши вплив технологічних факторів на НДС заготовки, проаналізуємо зміну еквівалентних деформацій  $\varepsilon_{eq}$ , зсувних деформацій  $\gamma$ , нерівномірність розподілу деформації  $K_e$  і гідростатичне стиснення  $\sigma_0$  для кожної операції деформування.

На рис. 4.17 показаний розподіл інтенсивності деформацій по перерізу заготовки на послідовних операціях деформування. Аналіз деформованого стану показує, що на кожній операції в центральній частині заготовки зосереджені максимальні деформації. На непарних операціях деформування (рис. 4.17, операції 1 і 3) осередок деформації має витягнуту форму уз-

довж більшої діагоналі поперечного перерізу заготовки у вигляді паралелограму. При доштампуванні найбільша інтенсивність деформації виникає в гострих кутах заготовки. У кінці парних операцій деформування (рис. 4.17, операції 2 і 4) осередок деформації має ближчу до симетричної щодо поздовжньої осі заготовки форму. Максимальні деформації також зосереджені в центральній частині заготовки.

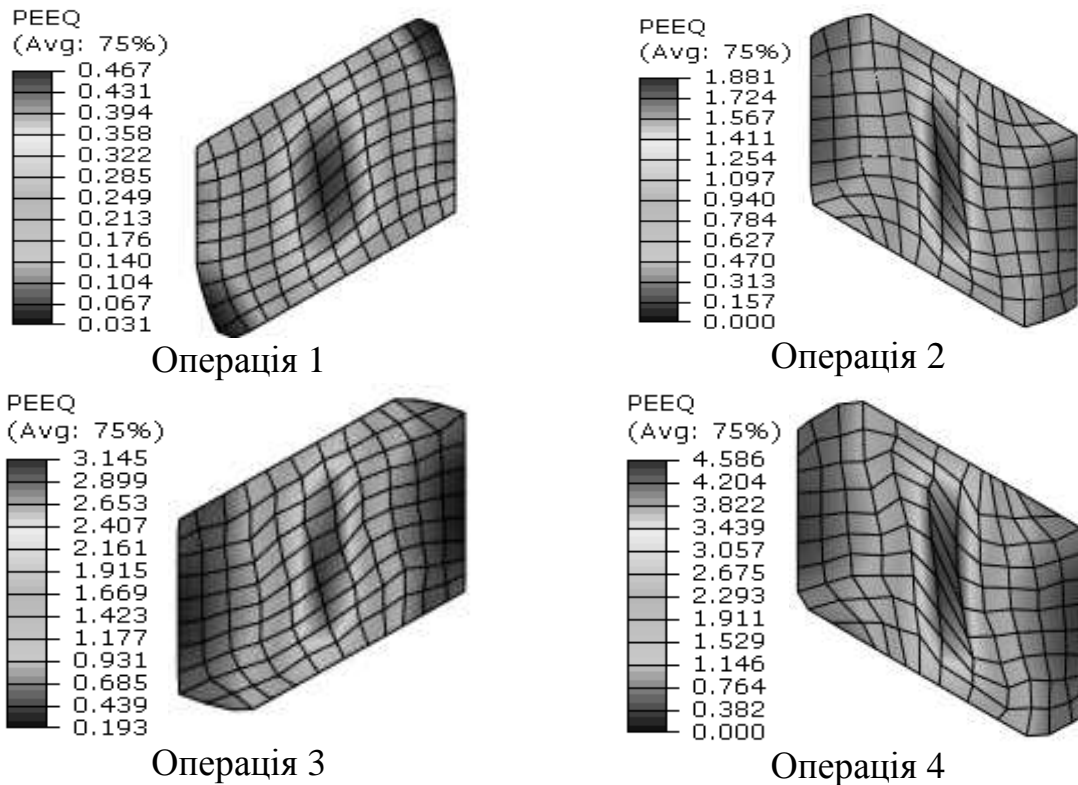


Рисунок 4.17 – Розподіл і значення еквівалентних деформацій  $\varepsilon_{eq}$  для 4 операцій за схемою P3 при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$  із співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S 0,8$

Виявлено, що зони з мінімальними інтенсивностями деформацій знаходяться уздовж вертикальних сторін пуансонів і утворюють застійні зони в тупих кутах перерізу заготовки у вигляді паралелограму. При формозміненні заготовки круглого перерізу спостерігається ефект повертання осередку деформації при збільшенні зони контакту з похилою частиною пуансона. У заготовках з вихідною формою перерізу у вигляді квадрата і прямокутника, а також при подальших операціях деформування такий ефект практично відсутній, незалежно від форми вихідного перерізу заготовки.

Розподіл еквівалентних деформацій  $\varepsilon_{eq}$  для 4 операцій наведено на рис. 4.18, а, б для значень  $\varepsilon_{eq}$  в обраних точках, які розташовані в найбільш складно оброблюваних зонах поперечного перерізу заготовки.

З графіка видно, що найбільш інтенсивно опрацьовується центральна частина заготовки, а істотне зростання деформацій на контакті з бічними сторонами інструменту не спостерігається. Розподіл деформацій практично симетричний до поздовжньої осі заготовки.



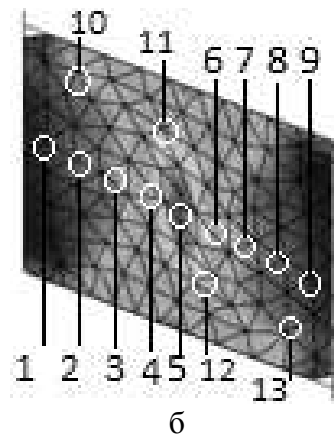
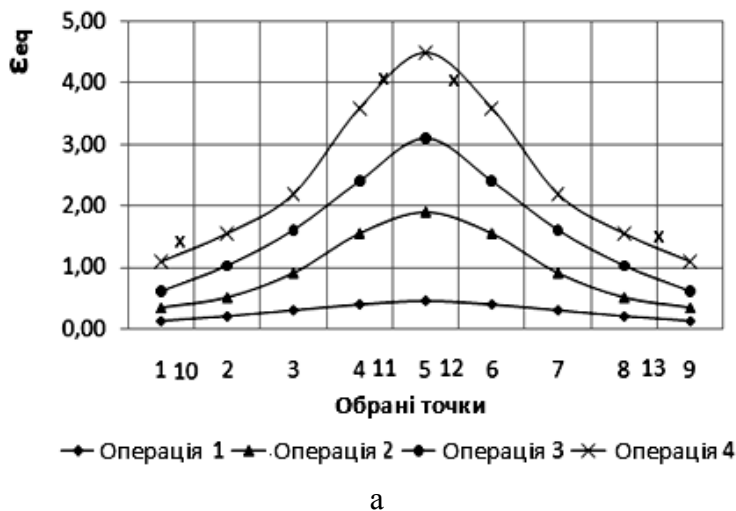


Рисунок 4.18 – Графік зміни (а) еквівалентних деформацій в обраних точках (б) для 4 операцій за схемою РЗ при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$  зі співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S 0,8$

Результати розрахунку об'ємної моделі вказують на незначні відмінності в характері НДС торцевої зони, що пов'язано з тертям на торцях, при цьому відбувається зміщення більш опрацьованої зони заготовки в бік пуансона, який переміщується. Глибина такої торцевої зони становить 4...5 мм з кожного боку.

Аналіз розподілу зсувів у перерізі заготовки показує, що в процесі формозмінення при кожній операції змінюються на протилежний знак зсувні деформації (рис. 4.19).

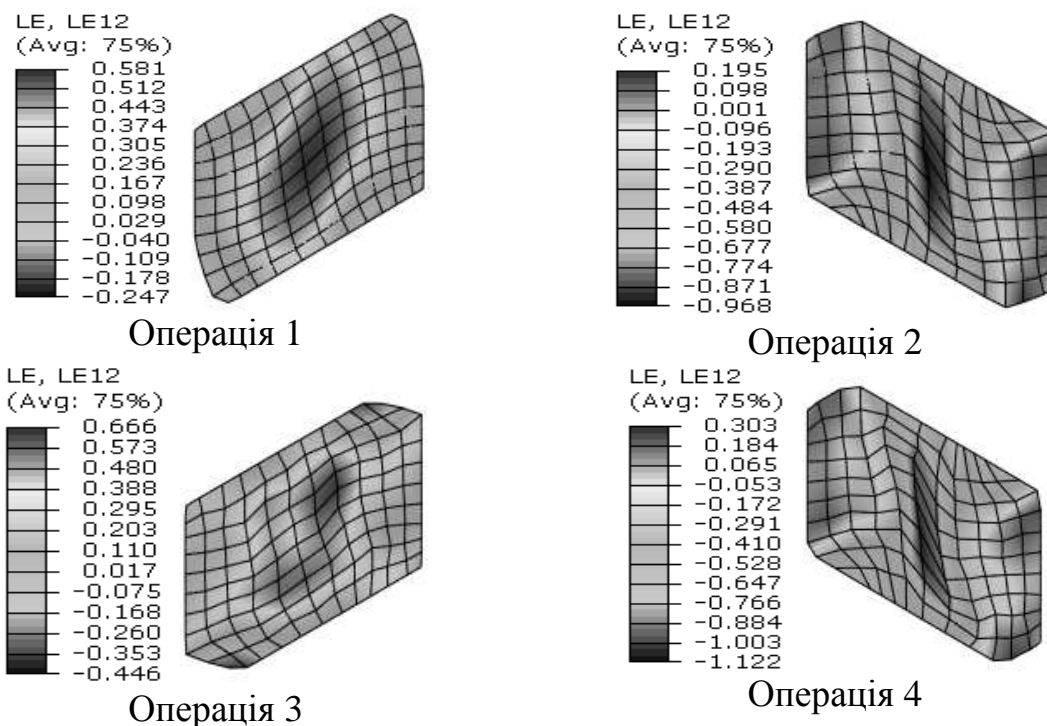


Рисунок 4.19 – Розподіл зсувних деформацій у для 4 операцій за схемою РЗ при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$  зі співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S 0,8$

На всіх операціях осередок деформації має витягнуту форму вздовж більшої діагоналі поперечного перерізу заготовки. На непарних операціях деформування зона інтенсивних зсувних деформацій розташована уздовж більшої діагоналі паралелограму, при парних операціях відбувається вирівнювання щодо центра заготовки і вздовж діагоналей.

Максимальні деформації протилежного знаку зосереджені в центрі заготовки і гострих її кутах, а мінімальні зсувні деформації розташовані уздовж вертикальних стінок матриці. На графіку (рис. 4.19) наведено зміну зсувних деформацій в обраних точках перерізу заготовки в процесі деформування для трьох послідовних операцій.

На початку кожної операції величина зсувних деформацій в об'ємі заготовки не змінюється, що викликано змінанням гострих кутів. У кінці операції відбувається значне збільшення зсувних деформацій, що пов'язано з інтенсивним рухом матеріалу заготовки уздовж похилих поверхонь і в центральній зоні.

Графік зміни зусилля деформування від часу для 4 операцій за схемою РЗ наведено на рис. 4.20.

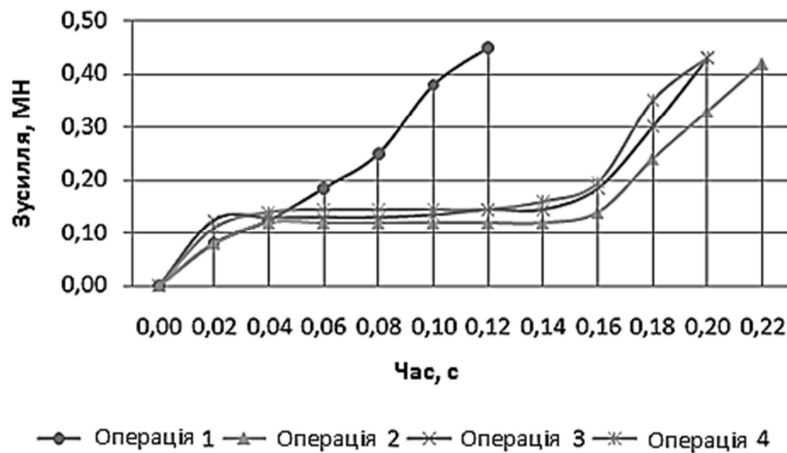


Рисунок 4.20 – Графік зміни зусилля деформування від часу для 4 операцій за схемою РЗ при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$  зі співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S 0,8$

Розподіл і значення гідростатичного стиснення  $\sigma_0$  наведено на рис. 4.21.

Максимальне значення зусилля деформування склало 420...450 кН. Максимальне значення гідростатичного стиснення знаходиться в центральній зоні і вздовж похилих поверхонь заготовки, при цьому на кожній операції збільшується зі значення 400 МПа на 1-й операції до 780 МПа на 4-й операції, що пов'язано зі зміцненням матеріалу заготовки. У результаті теоретичних досліджень встановлено, що максимальні значення напружень, деформацій і зусиль (рис. 4.20) досягаються в кінці кожної операції, що пов'язано зі збільшенням зони контакту між заготовкою і інструментом і залученням всього обсягу заготовки в процес формозмінення.

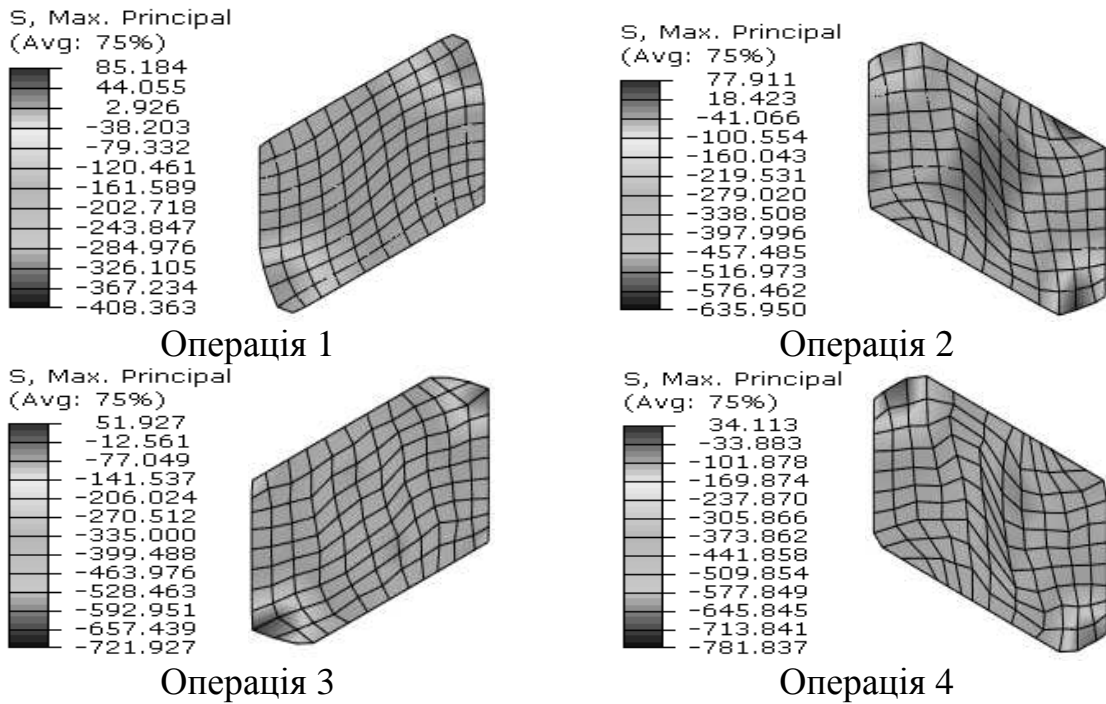


Рисунок 4.21 – Розподіл гідростатичного стиснення  $\sigma_0$ , МПа для 4 операцій за схемою РЗ при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$ ,  $H/S 0,8$

Для оцінювання вичерпання ресурсу пластичності матеріалу заготовки з міді М1 виконаний розрахунок за методикою, розглянутою в другому розділі, для заготовок, оброблених за схемою РЗ. У процесі вивчення встановлено зони з максимальним вичерпанням ресурсу пластичності по перерізу заготовки (рис. 4.22).

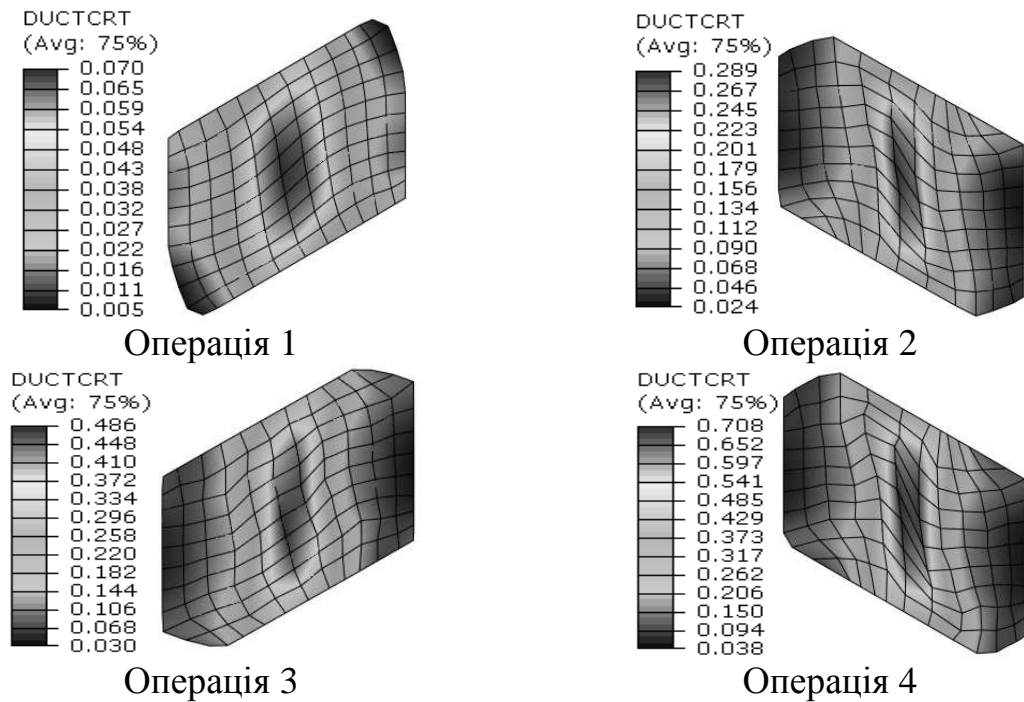


Рисунок 4.22 – Розподіл ресурсу пластичності  $\psi_D$  для 4 операцій за схемою РЗ при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$ ,  $H/S 0,8$

Розташування зони зі зменшенням ресурсу пластичності збігається з осередком деформації. Для ряду розрахунків отримано значення  $\psi_D > 1$  у центрі заготовки або при утворенні складок на поверхні, що говорить про вичерпання ресурсу пластичності в окремих ділянках заготовки та можливе руйнування матеріалу заготовки.

Таким чином, обраний спосіб розрахунку ресурсу пластичності дозволяє передбачити зони з можливим утворенням пошкоджень.

У процесі аналізу напруженого стану заготовки встановлено величини і зони контактної тиску на поверхні заготовки (рис. 4.23), які дозволили встановити, що в зонах заготовки, які контактують з похилими поверхнями пуансонів, створюються найбільші величини питомого тиску до 1000 МПа; у зонах заготовки, прилеглих до вертикальних і торцевих стінок інструменту, контактний тиск зменшується до 700 МПа; у зонах гострих кутів заготовки контактний тиск мінімальний – до 100 МПа.

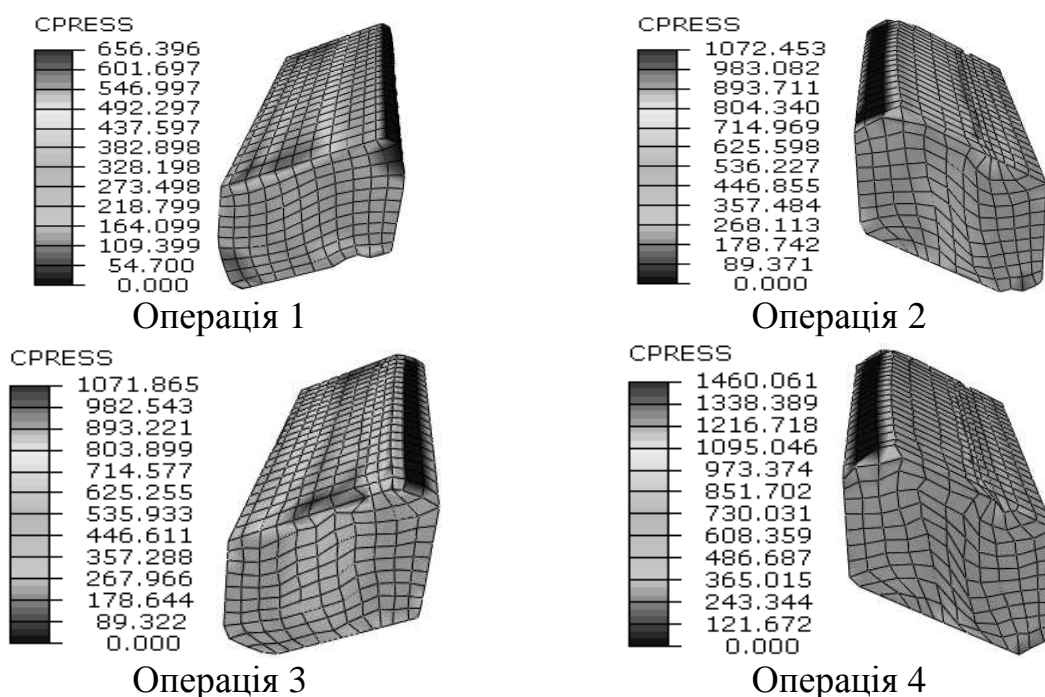


Рисунок 4.23 – Розподіл питомого тиску, МПа, для 4 операцій за схемою P3 при  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,15$  зі співвідношенням сторін перерізу заготовки  $H/S 0,8$

Результати проведеного моделювання вказують на наявність слабо деформованих зон уздовж вертикальних стінок інструменту, при цьому центральна зона й зони вздовж похилих стінок інструменту в різному ступені добре деформовані. Зміна геометричних розмірів заготовки, форми перерізу вихідної заготовки і коефіцієнтів тертя не дозволили повністю прибрати слабо деформовані зони.

У процесі теоретичних досліджень у програмі ABAQUS для ряду схем спостерігався ефект провертання заготовки, переважно з кутами нахилу деформованої поверхні  $30...40^\circ$ , а також при використанні контактної

взаємодії з коефіцієнтом тертя менше 0,12 за законом тертя Кулона. У результаті відбувалося повертання заготовки і слабо деформовані зони заготовки розташовувалися проти похилих поверхонь пуансонів, що при наступній операції деформування дозволяло знизити нерівномірність розподілу деформації на парних операціях і таким чином поліпшити якість одержуваних заготовок.

#### 4.4 Моделювання напруженого стану штампового оснащення

Для оцінювання навантажень на інструмент був виконаний розрахунок штампового оснащення для схеми РЗ у програмі ABAQUS/Explicit.

При моделюванні напруженого стану штампового оснащення пружні властивості матеріалу задавали межею плинності  $\sigma_s$  для сталі 45 з термічним обробленням, яка склала 850 МПа.

Результати розрахунків (рис. 4.24) показують на осередок напруги, що знаходиться на похилій поверхні пуансонів, яка переходить у вертикальну поверхню пуансона. Отримані дані дозволяють зробити висновок про можливість використання зазначених сталей з відповідною термічною обробкою для виготовлення штампового оснащення за схемою РЗ.

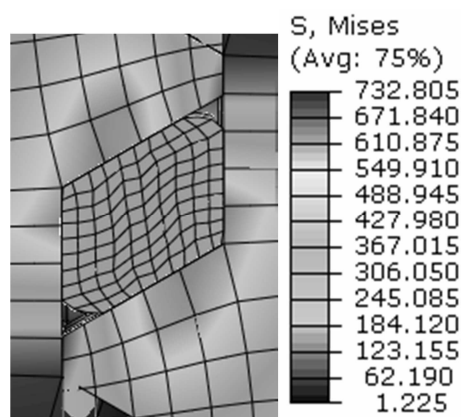


Рисунок 4.24 – Результат розрахунку напружень в інструменті за схемою РЗ

Результати розподілу і величини питомого тиску на поверхні пуансонів наведено на рис. 4.25.

Зони контакту з максимальними значеннями тиску на поверхні розташовані на похилих поверхнях пуансонів, зони з меншими значеннями тиску присутні на вертикальних поверхнях пуансонів. Граничні значення контактного тиску за схемою РЗ несуттєво відрізняються від схем ПД ССДФ і РККП без протитиску і значно менше схем ПД з протитиском, таких як ГЕ і РККП з протитиском. Також слід зазначити, що в схемах РЗ і ССДФ максимальні значення питомого тиску виникають на кінцевому етапі деформування.

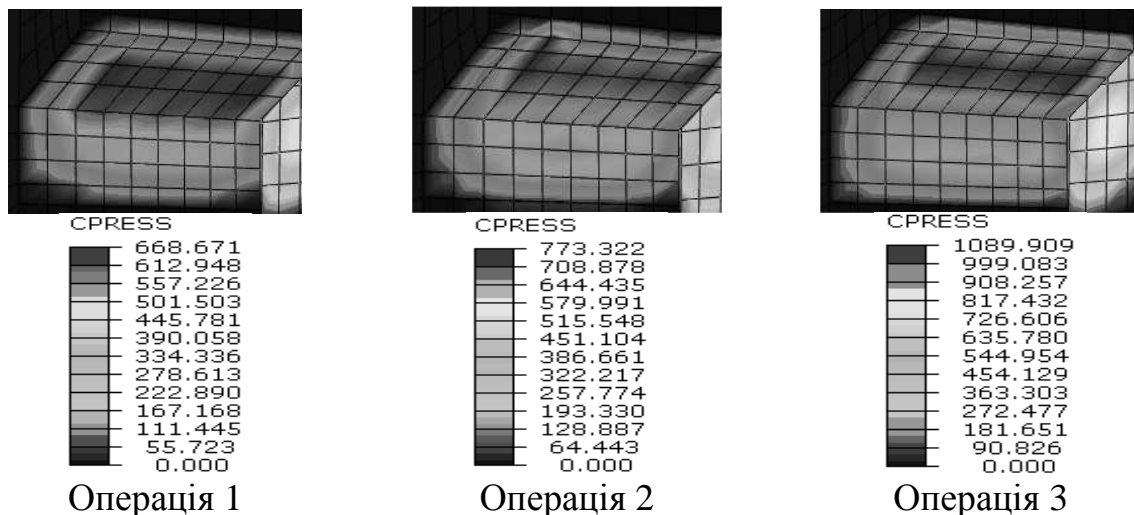


Рисунок 4.25 – Питомний тиск на поверхні пуансонів

Встановлено такі залежності для параметрів процесу:

1. При збільшенні співвідношення сторін з 0,8 до 1,1 збільшується інтенсивність деформацій на 21 % у центральній зоні й рівномірність розподілу деформації по перерізу заготовки на 7 %.

2. При збільшенні кута нахилу деформівної поверхні пуансона з 20° до 30° збільшуються величина інтенсивності деформацій на 56 % у центральній зоні й нерівномірність розподілу деформацій на 15 %.

3. При зменшенні тертя на контактних поверхнях величина інтенсивності деформацій незначно зменшується, при цьому зона осередка деформацій зростає, рівномірність розподілу деформації збільшується на 23 %.

4. Обрано раціональні кути нахилу деформівних поверхонь 30° і відносна висота заготовки 0,8. Слід зазначити, що збільшення кутів нахилу деформівних поверхонь пуансонів до значення понад 30° призводить до зминання частини заготовки в області її гострих кутів і повертання заготовки відносно поздовжньої осі. Це призводить до зміни схеми або нестабільного протікання процесу деформування.

#### 4.5 Експериментальні дослідження процесу деформування за схемою реверсивного зсуву

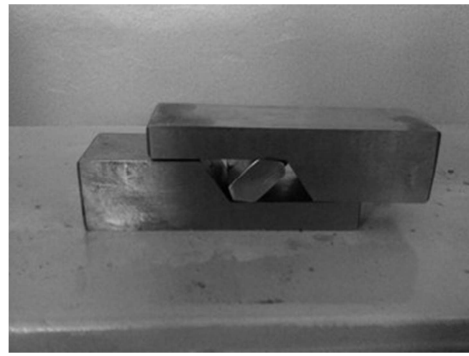
Проведення експериментальних досліджень у галузі оброблення металів тиском передбачає деформування заготовки, отримання та оброблення даних експерименту. У процесі дослідження визначаються кінематичні й енергосилові характеристики процесу, механічні характеристики оброблюваного матеріалу, потім виконуються розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) і контроль зміни мікроструктури [2].

Застосоване штампове оснащення показано на рис. 4.26, а–е.

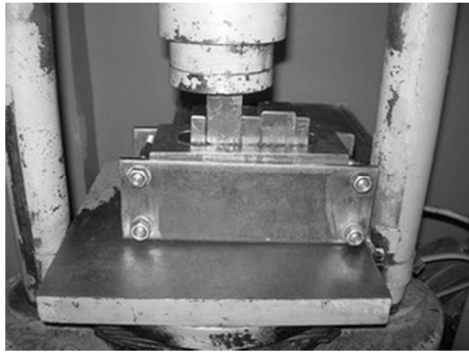
Пуансони з вихідними заготовками до деформування – рис. 4.26, а, із заготовками при наступних операціях деформування – рис. 4.26, б. Матрицю зі встановленими пуансонами показано на рис. 4.26, в.



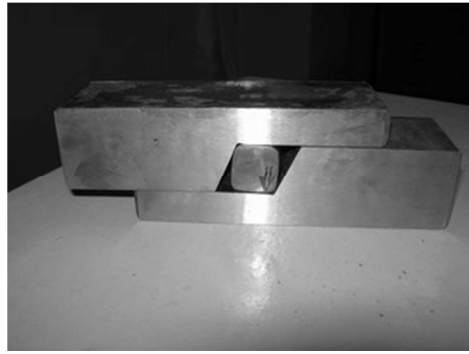
а



б



в



г



д



е

*а – при першій операції деформування; б – при наступних операціях деформування; в – штампове оснащення, встановлене на пресі; г – пуансон із заготовкою; д, з – випресування заготовки після деформування*

*Рисунок 4.26 – Положення заготовки*

Для аналізу НДС заготовок, підданих формозміненню із застосуванням методу інтенсивного пластичного деформування, процес оброблення даних включає ряд етапів:

- визначення зусиль деформування;
- розрахунок напружено-деформованого стану заготовки;
- розрахунок ресурсу пластичності матеріалу заготовки;
- дослідження мікротвердості й мікроструктури заготовки.

Деформування заготовки може бути виконане за один або кілька етапів. Отримання даних експерименту може виконуватися після кожного етапу деформування й використовуватися для визначення його показників. У таких процесах отримання накопичених даних має важливе значення,

оскільки потрібно визначити НДС заготовки, яка може значно змінювати свою форму в процесі оброблення, що значно ускладнює отримання й оброблення результатів експерименту.

Кожну операцію деформування здійснювали в розглянутому штамповому оснащенні на пресах зусиллям 500 кН і 2000 кН.

Залежно від вихідного перерізу заготовки (коло, квадрат, прямокутник) задавали хід деформування, виходячи з розрахунків геометричних розмірів заготовки. Переміщення відстежувалися за допомогою ходографів, які встановлені на рухомих частинах штампу або пресу [29].

Заготовку деформували кілька разів при постійному обмеженні поперечного деформування в перерізі заготовки й додатково по другій поздовжній осі таким чином, що гострі й тупі кути поперечного перерізу мінялися місцями на кожному етапі деформування. Етапи деформування повторювали до отримання необхідної дрібнозернистої структури.

Перед кожним наступним етапом деформування виконували повертання заготовки на  $180^\circ$  по осі деформування й змінювали його напрямок. На останньому етапі хід деформування зменшували у 2 рази й відновлювали близьку до симетричної форму поперечного перерізу заготовки.

Для визначення НДС заготовки використовують координатні сітки, оброблення яких залишається трудомісткою операцією, особливо при багатоопераційному деформуванні, і вимагає високої точності вимірювань. Крім того, на результатах визначення НДС заготовки базується розрахунок ступені використання ресурсу пластичності.

Таким чином, визначення ряду характеристик деформування за результатами експериментальних досліджень трудомістке і вимагає розвитку засобів автоматизації процесу отримання і оброблення даних, особливо при дослідженні багатоопераційного деформування методами ІПД.

#### ***4.5.1 Результати експериментальних досліджень за схемою реверсивного зсуву***

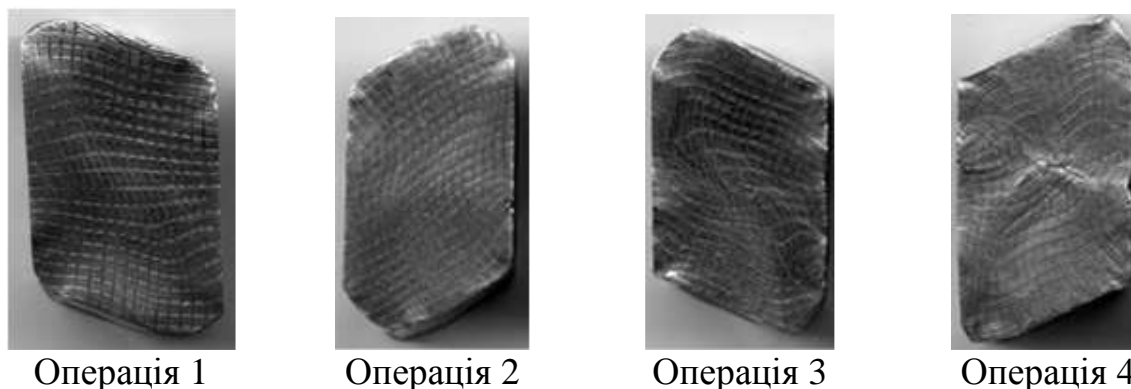
Завданням експерименту є вивчення характеру плинності матеріалу заготовки при виконанні першого етапу експериментальних досліджень на пластиліні за схемою РЗ. Деформування виконували на гідравлічному пресі з ручним подаванням. Пуансони з кутом нахилу деформівних поверхонь  $\alpha_1, \alpha_2 = 30^\circ$  (рис. 4.3), виготовлені з дерева, розміщували в порожнині матриці. Заготовку, що складається з 16 смуг пластиліну різного кольору, з'єднану в вигляді паралелепіпеда, деформували 4 рази. Розмір перерізу заготовки  $28 \times 28$  мм, розмір перерізу кожного бруска  $7 \times 7$  мм. Співвідношення сторін перерізу заготовки  $H/S = 1$ .

Заготовку загортали в плівку і покривали мастилом для зменшення тертя при контакті з поверхнею інструменту.



Після кожної операції деформування виконували фотофіксацію поперечного перерізу заготовки (рис. 4.27). За результатами оброблення координатної сітки встановлено таке:

- 1) після кожної операції деформування зона найбільших деформацій розташована уздовж більшої осі паралелограму;
- 2) зони з мінімальними деформаціями розташовані уздовж вертикальних стінок інструменту;
- 3) матеріал заготовки не повністю заповнює гострі кути штампу;
- 4) на останній операції вдалося отримати форму перерізу, близьку до вихідної, завдяки зменшенню ходу в 1,5 разу.



*Рисунок 4.27 – Заготовка з координатною сіткою для 4 операцій за схемою деформування РЗ*

Виконано експеримент по ІПД міді марки М1 за схемою РЗ. Завданням експерименту було визначення впливу технологічних факторів на деформований стан заготовки і силовий режим деформування, перевірка результатів теоретичних розрахунків.

Заготовку круглого перерізу діаметром 20 мм і довжиною 40 мм, розділену навпіл, деформували 4 рази пуансонами з нахилом деформівної поверхні  $25^\circ$ . На деформівні поверхні й заготовку наносили мастило на основі графіту. Після кожного деформування заготовку витягували, за допомогою сканера знімали координатну сітку (рис. 4.28).

Зусилля деформування склали 375 кН для першої операції. Зусилля деформування для подальших операцій склали 420...430 кН.

Торцеві поверхні обробляли для отримання мікрошліфа, на поверхні якого виконували заміри твердості за Віккерсом, яка складала після першої операції 900 МПа, після другої – 1150 МПа, після третьої – 1250...1300 МПа, після четвертої – 1450...1500 МПа, при початковій твердості 720 МПа. Вимірювання твердості за Віккерсом отриманих заготовок виконувалося низкою дослідників при деформуванні чистої міді іншими процесами ІПД. Отримані результати твердості при інших методах ІПД знаходяться в діапазоні 1400...1600 МПа, що узгоджується з даними за запропонованим способом реверсивного зсуву.

Після виконання четвертої операції деформування в центрі заготовки з міді М1 утворилася тріщина довжиною 1,5...2 мм, розташована уздовж більшої діагоналі перерізу паралелограма.

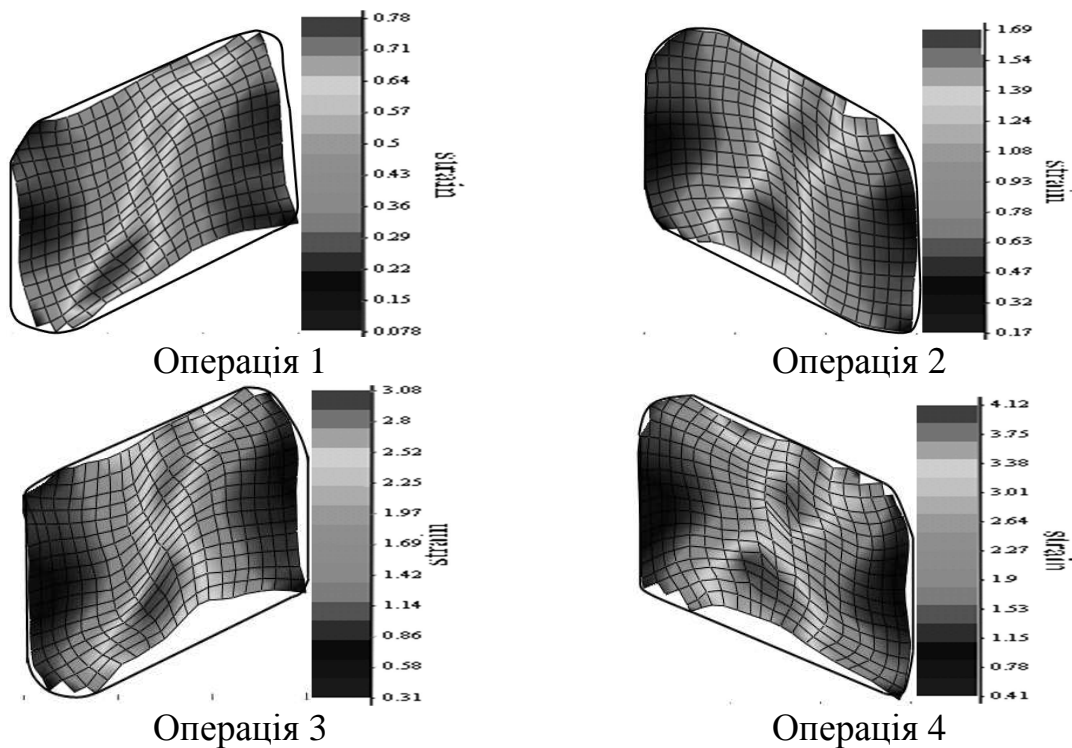


Рисунок 4.28 – Експериментальний розподіл інтенсивності накопичених деформацій у перерізі заготовки за схемою РЗ

Для визначення накопиченої інтенсивності деформацій у перерізі заготовки виконано оброблення координатної сітки для 4 операцій за методом І. П. Ренне. Отримані результати дозволили встановити наявність зони з найбільшою інтенсивністю деформацій у центрі перерізу заготовки, яка склала на третій операції  $\varepsilon_i = 2,7$  і на четвертій –  $\varepsilon_i = 3,6$ .

Результати експерименту узгоджуються з даними теоретичних розрахунків для заготовки з міді М1 (рис. 4.27) з аналогічними параметрами і підтверджують наявність осередку деформації в центрі й уздовж діагоналей перерізу заготовки. Найменша інтенсивність деформації розташована уздовж вертикальних стінок.

Побудовано розподіли зсувів по перерізу заготовки (рис. 4.29), які показують наявність двох парних зон деформації з протилежним знаком, при цьому на кожній операції деформування змінюється знак на протилежний, що пов'язано зі зміною напрямку деформування.

Побудовано графіки розподілу теоретичних і експериментальних даних інтенсивності деформацій в обраних точках перерізу заготовки (рис. 4.30, див. також рис. 4.18).

Результати показують, що розподіл деформацій має нерівномірний характер (рис. 4.28) з низькою інтенсивністю деформацій у зонах контакту заготовки з вертикальними стінками інструменту, що пояснюється блокуванням заготовки в тупих кутах штампу і тертям об вертикальні стінки, яке ускладнює рух металу в цих зонах. Через утворення дефекту в центрі перерізу заготовки після 4-ї операції, координатна сітка має похибки в центральній зоні.

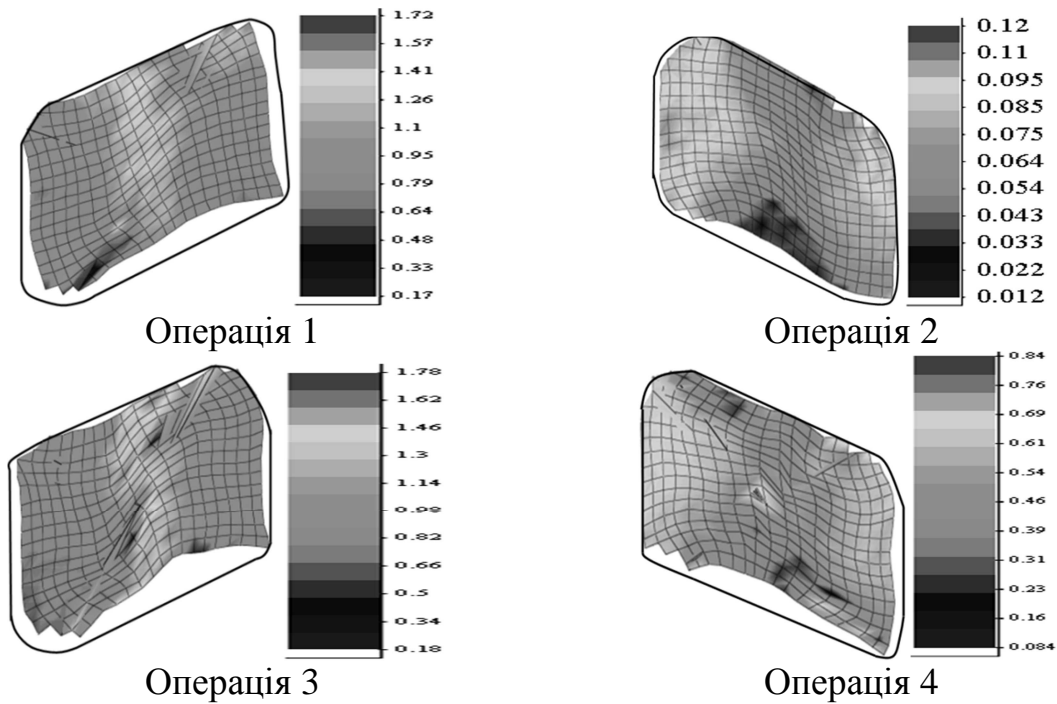


Рисунок 4.29 – Експериментальне розподілення зсувних деформацій у перерізі заготовки за схемою РЗ

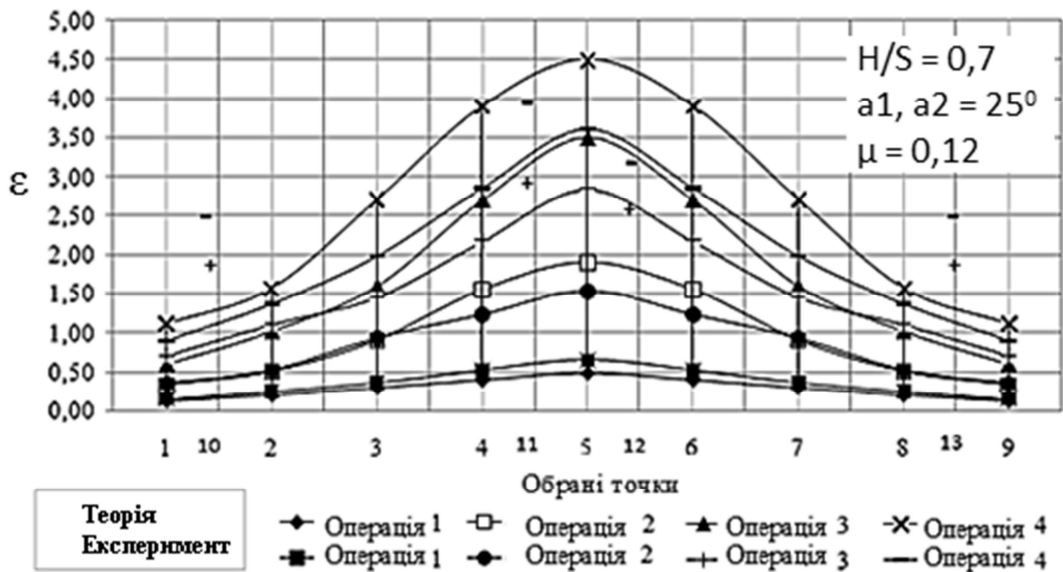


Рисунок 4.30 – Графік розподілу накопиченої деформації для теоретичних і експериментальних даних за схемою РЗ

#### Висновки за розділом 4

1. Встановлено, що при протезуванні розширюється застосування матеріалів з попереднім деформаційним обробленням із застосуванням інтенсивних пластичних деформацій. Перспективними напрямками для подальшого розвитку методів ПД є: дослідження методів рівноканального

кутового пресування, гвинтової екструзії та інших, розроблення нових схем деформування, включаючи комбіновані процеси, конструктивне спрощення оснащення, автоматизація обладнання та розроблення САПР процесів ПД і штампового оснащення. Розроблено й реалізовано конструктивні рішення, які дозволили освоїти напівпромислову технологію гвинтової екструзії медичного титану. Роботи в цьому напрямку проведено спільно з ДонФТІ ім. А. А. Галкіна НАН України.

2. Для отримання заготовок медичних імплантатів запропонований і вивчений новий технологічний процес інтенсивного пластичного деформування за схемою реверсивного зсуву (РЗ) в умовах плоского деформованого стану, який дозволяє отримувати високі ступені деформації в центрі заготовки і рівномірний розподіл деформацій по її довжині, що практично усуває кінцеві відходи при обробленні заготовок. Процес дозволяє виконувати ПД оброблення титану для підвищення його механічних характеристик.

3. Розроблено методику параметричного проектування штампового оснащення для методу ПД за схемою реверсивного зсуву, яка дозволила розширити набір штампового оснащення для отримання медичних імплантатів. Виконано розроблення параметричної моделі оснащення та ПМК для реалізації процесу РЗ.

4. Спроектоване штампове оснащення використане при моделюванні деформування заготовок методом реверсивного зсуву. Для зниження витрат часу на проектування складних виробів необхідно вивчати час побудови виробів у САД-системі для вибору раціональної послідовності програмної побудови деталей.

5. За результатами моделювання процесу ПД методом реверсивного зсуву визначено раціональні параметри штампового оснащення для проведення експерименту. Проведено експериментальні дослідження на міді марки М1, які підтвердили результати моделювання.

### **Список використаних джерел**

1. Estrin, Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science / Y. Estrin, A. Vinogradov // *Acta Materialia*. – 2013. – № 61. – P. 782–817.

2. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ИЦК Академкнига, 2007. – 397 с.

3. Segal, V. M. Equal channel angular extrusion of flat products / V. M. Segal // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 476. – N 1–2. – P. 178–185.

4. Salishchev, G. A. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties / G. A. Salishchev, O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev // *J. Mater. Sci.* – 1993. – № 28. – P. 2898–2903.

5. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll–bonding (ARB) process / Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai // *Acta Mater.* – 1999. – № 47. – P. 579–583.

6. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.

7. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering.* – 2009. – A 503. – P. 14–17.

8. Алтухов, А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // *Письма о материалах.* – 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 54–59. – ISSN 2218-5046.

9. Евстратов, В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / Евстратов В. А. – Харьков : Вища шк., Изд-во Харьк. унта, 1987. – 144 с.

10. Холодная объемная штамповка : справочник / под ред. Г. А. Навроцкого. – М. : Машиностроение, 1973. – 496 с.

11. Тарасов, А. Ф. Расчет напряженно-деформированного состояния в элементах штампов с использованием пакета конечноэлементного анализа COSMOS/Works / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 2004. – №8. – С. 27–30.

12. Тарасов, А. Ф. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов штампового блока и рабочего инструмента штампа / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий. // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 2006. – № 2. – С. 34–37.

13. Кулагин, Р. Ю. Установки винтовой экструзии для лабораторного и промышленного применения / Кулагин Р. Ю. // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 261–266.

14. Патент № 74317 України, МПК G 22 F 1/16, B 21 J 5/00. Спосіб одержання ультрадрібнозернистих заготовок із металів та сплавів / О. Ф. Тарасов, О. В. Періг, О. В. Алтухов. – № и 201204007 ; заявл. 02.04.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

15. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами: монография : монография / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манаенков, А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов. – Харьков : УкрГАЗТ ; Краматорск : ДГМА, 2010. – 287 с.

16. Системные методы в автоматизации проектирования изделий машиностроения : монография / А. Ф. Тарасов, Г. Б. Билык, П. И. Сагайда, М. А. Винников, С. А. Короткий. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 240 с.

17. Тарасов, А. Ф. Анализ способов повышения надежности штамповой оснастки / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // *Совершенствование про-*

цессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск, 2001. – С. 124–127.

18. Патент № 71855 України, МПК В 21С 25/00. Роз'ємна матриця для гвинтової екструзії / Я. Ю. Бейгельзімер, О. Ф. Тарасов, Р. Ю. Кулагін. – № u 201201260 ; заявл. 07.02.2012 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

19. Патент 76206 Україна, МПК В22F 3/03. Спосіб багаторазової інтенсивної пластичної деформації заготовки зі зміною напрямку деформування / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов. – №u201207396 ; заявл. 18.06.2012 ; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.

20. Вылегжанин, А. В ногу со временем: Опыт использования технологий / Вылегжанин А. // САПР и графика. – 2008. – № 11. – С. 89–91

21. Trivedi, Ruchik D. 3D Parametric Modeling for Product Variants Using Case Study on Inner Ring of Spherical Roller Bearing / Ruchik D. Trivedi, Dhaval B. Shah, Kaushik M. // Patel Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 51. – P. 709–714.

22. Саенко, А. Проектирование управляющих программ для станков ЧПУ в CAD/CAM-системе MASTERCAM / Саенко А. // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. – 2008. – № 4. – С. 108–109.

23. Белькович, А. PowerSHAPEPro: новые возможности реверсивного инжиниринга / А. Белькович, В. Власов, К. Евченко // САПР и графика. – 2009. – № 1. – С. 16–22.

24. Dimitrov, O. Nominal and effective strains in severe plastic deformation processes/ Omourtague Dimitrov // Ann. Chim. Sci. Mat. – 2002. – Vol. 27 (3). – P. 15–24.

25. Finite element simulation of twist extrusion on ECAPed Al6061 specimen / K. Hans Raj, Rahul Swarup Sharma, Ankit Sahai and Shanti S. Sharma // Paris, AIP Conf. Proc. – 2010. – Vol. 1315. – P. 507–512. – DOI 10.1063/1.3552496.

26. The simulation of deformation distribution during ECAP using 3D finite element method / Tao Suo, Yulong Li, Yazhou Guo, Yuanyong Liu // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 432. – P. 269–274.

27. Schafler E. Effects of releasing the hydrostatic pressure on the nanostructure after severe plastic deformation of Cu / E. Schafler // Scripta Materialia. – 2010. – Vol. 62. – P. 423–426.

28. Тарасов, А. Ф. Моделирование процесса интенсивного пластического деформирования заготовок по схеме реверсивного сдвига/ А. Ф. Тарасов, А. В. Алтухов // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – № 4. – С. 47–54.

29. Максимук, В. С. Тензометрический пружинный ходограф / В. С. Максимук, Д. Н. Гурулев // КШП ОМД. – М. : Изд. ООО «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением», 2008. – С. 43–44.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБЛЕННЯ САПР ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ІНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ З САД/САМ/САЕ-СИСТЕМАМИ

#### 5.1 Моделювання і проектування процесу й оснащення для пластичного деформування поковок деталі «U-імплантат» із застосуванням схем ШД

Розглянемо скінченно-елементне моделювання отримання імплантату «U-імплантат» з титану VT1-0 [1]. Для цього побудуємо модель технологічного процесу пластичного деформування й оснащення.

##### *5.1.1 Проектування геометричної моделі деталі «U-імплантат» і поковки для її виготовлення*

Проектування поковки деталі ґрунтується на вивченні даних кресленика деталі, її геометричних і формотвірних характеристик. На підставі цих даних розроблятиметься алгоритм отримання деталі із заданими характеристиками, висуватимуться пропозиції щодо досягнення таких параметрів. Чим складнішою буде деталь за своєю формою, чим більше в ній буде виступів, западин і інших формотвірних елементів, тим складніше буде її спроектувати. І чим складнішою є форма деталі, тим більше знадобиться технологічних переходів для її виготовлення пластичним деформуванням. Розглянемо проектування поковки деталі «U-імплантат» [1]. Модель U-імплантату, вставлену в хребет, наведено на рис. 5.1.



*Рисунок 5.1 – Модель U-імплантату, вставленого в хребет*

Деталь «U-імплантат» має основу, двоє крил і зубці, розташовані на крилах (рис. 5.2).

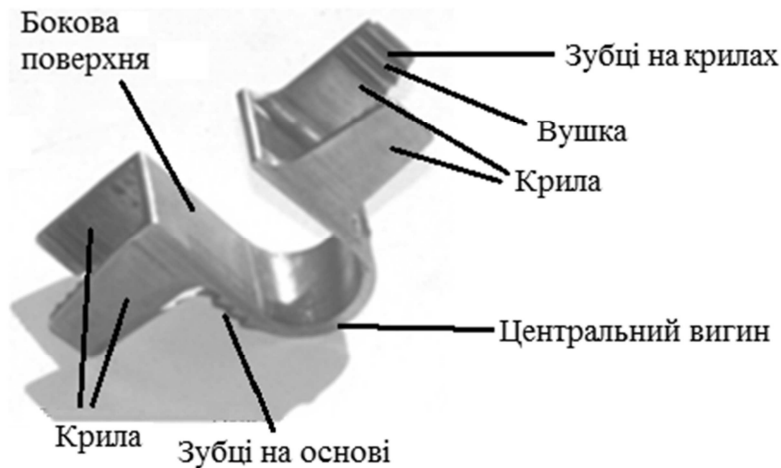


Рисунок 5.2 – 3D-модель деталі «U-імплантат» з позначенням формотвірних елементів

Розглянемо кресленик деталі «U-імплантат». Вигляд збоку деталі «U-імплантат» наведено на рис. 5.3. Як видно з вигляду збоку, деталь має складну форму, має багато виступів по сторонам, на її виготовлення знадобиться не один технологічний перехід.

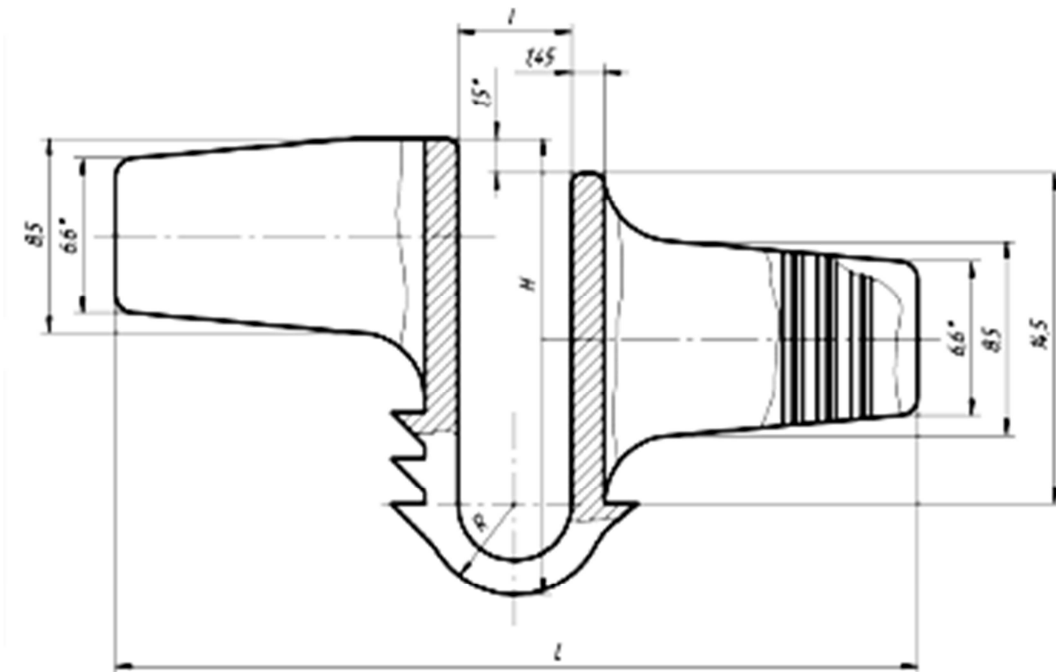


Рисунок 5.3 – Кресленик кінцевої деталі «Імплантат» (вигляд збоку)

Вигляд зверху деталі «U-імплантат» наведено на рис. 5.4.

Як видно з вигляду зверху (див. рис. 5.4), деталь «U-імплантат» має два типи вигину: по центру і біля крил. Для подальшого оброблення виконаємо розгортку нашої деталі, яку можна буде отримати пластичним деформуванням.



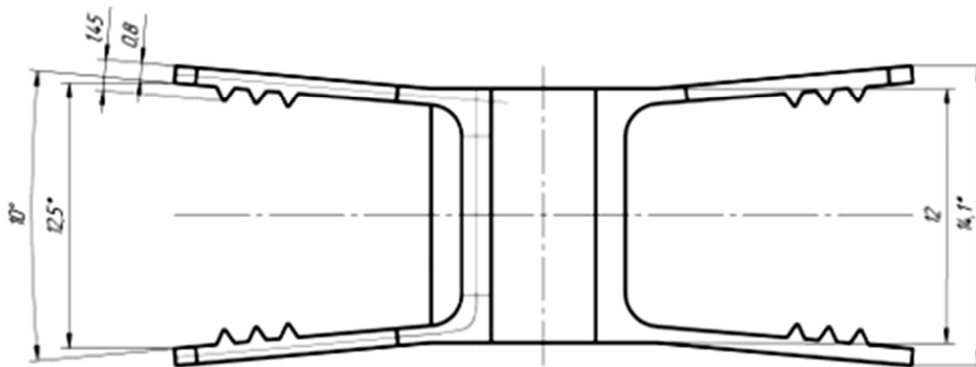


Рисунок 5.4 – Кресленик деталі «U-імплантат» (вигляд зверху)

При виконанні розгортки в місці центрального вигину, довжина заготовки визначається по центру товщини деталі в розрізі. Розгортку крил деталі також можна виконати по середній лінії. На відміну від центрального вигину, бічний не має таку плавну середню лінію, тому тут рівень погрішності буде вищий, що необхідно також враховувати. Розгортку поковки з розмірами зображено на рис. 5.5 (вигляд зверху), 5.6 (вигляд збоку) і 5.7 (вигляд спереду).

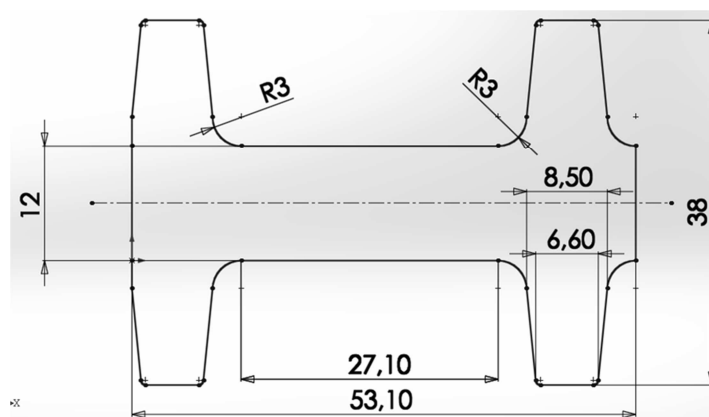


Рисунок 5.5 – Розгортка поковки з розмірами (вигляд зверху)

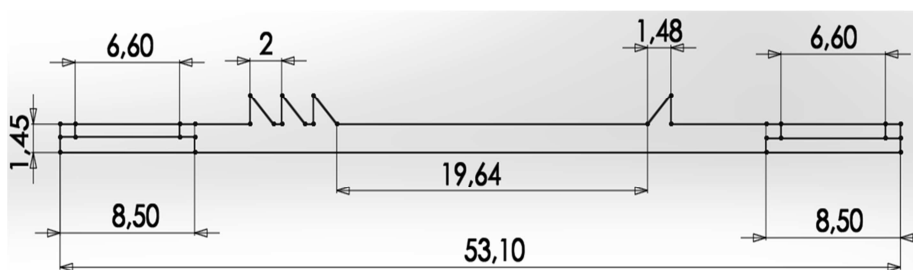
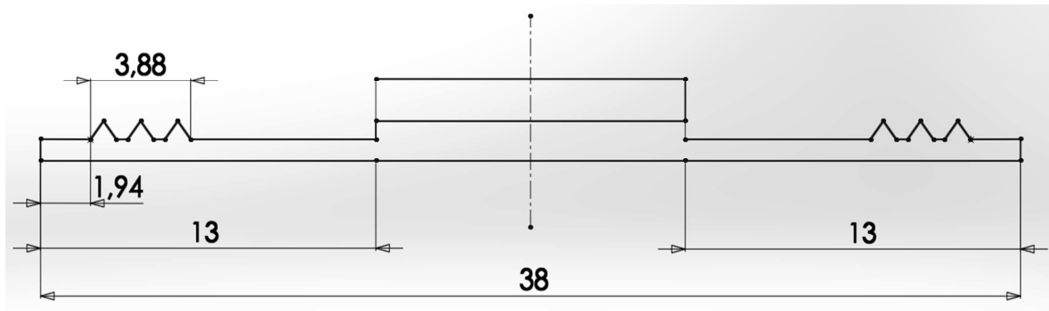


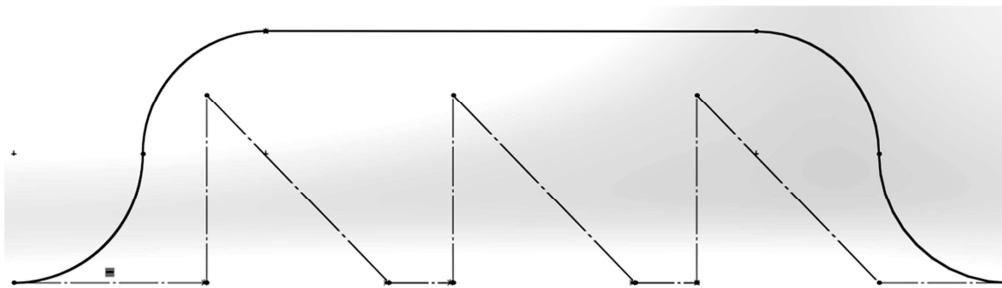
Рисунок 5.6 – Розгортка поковки з розмірами (вигляд збоку)

Через специфіку плинності металу при пластичному деформуванні, для отриманої поковки треба зробити додаткове механооброблення, під час якої виточують зубці, гострі краї й інші елементи, які проблематично або неможливо отримати при обробленні металів тиском, зважаючи на вихід за рамки граничних навантажень і інші причини.



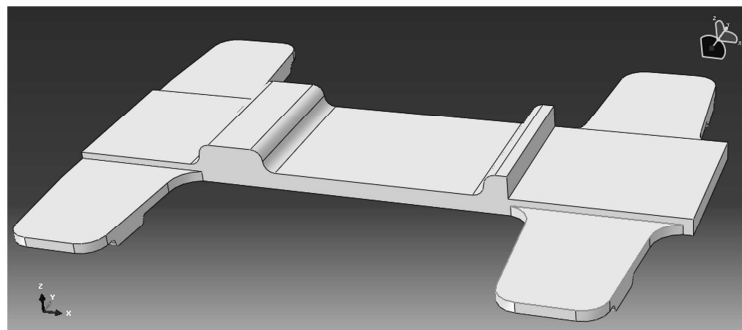
*Рисунок 5.7 – Розгортка деталі з розмірами (вигляд спереду)*

Під механооброблення необхідно призначити напуск під розміри й припуски під зубці. Цей момент достатньо важливий, оскільки навіть невелика нестача металу в районі зубців пошкодить заготовку. Для вирішення цієї проблеми зробимо припуск металу по контуру, а в районі зубців за допомогою припуску з радіусами. На рис. 5.8 зображено пунктирною лінією базове розташування зубців, а жирною – припуск під зубці.



*Рисунок 5.8 – Область зубців деталі «U-імплантат» з припусками (пунктирна лінія - базове розташування зубців; жирна лінія – припуск під зубці)*

Для побудови поковки доцільно використати CAD-систему. А оскільки для визначення геометричних розмірів поковки буде необхідно визначити її об'єм, то вибрана CAD-система, бажано, повинна визначати об'єм і інші характеристики. У якості такої системи може виступати SolidWorks. Розгортку деталі «U-імплантат», виконана в CAD-системі SolidWorks, наведено на рис. 5.9.



*Рисунок 5.9 – Розгортка деталі «U-імплантат», виконана у CAD-системі SolidWorks*

Визначивши об'єм, ми можемо визначити розміри поковки. На основі розмірів нашої деталі, ми можемо визначити необхідні для механообробки розміри:

1. Довжина розмаху крил (вушка):  $38 \text{ мм} + (1 \text{ мм})^*$ .
2. Довжина заготовки:  
при радіусі 8 мм:  $\Rightarrow 40,60 \text{ мм} + (0,5 * 2)^*$ ;  
без центрального вигину – 30,5 мм;  
довжина центрального вигину – 10,11 мм;  
радіус нульового рівня – 3,22 мм;  
при радіусі 16 мм:  $\Rightarrow 53,1 \text{ мм} + (0,5 * 2)^*$ ;  
без центрального вигину – 30,5 мм;  
довжина центрального вигину – 22,60 мм;  
радіус нульового рівня – 7,20 мм.
3. Товщина вушка:  
а) центр – 1,5 мм;  
б) середина:  $0,8 \text{ мм} + (0,1 \text{ мм})^*$ ;  
в) зубці:  $1,5 + (0,2 \text{ мм})^*$ .
4. Радіус біля вушка і крила – 3 мм;  
довжина зубів на вушку – 3,88 мм;  
довжина до зуба – 1,94.
5. Зуби на заготовці:  
довжина зуба – 1,48 мм;  
між зубами – 0,52 мм;  
сума 1 зуба – 2,00 мм;  
висота зуба:  $1,53 \text{ мм} + (0,2 \text{ мм})^*$ .
6. Товщина заготовки –  $12 \text{ мм} + (1 \text{ мм})^*$ ,  
де \* - додатковий розмір для напуску і допусків.

Тепер додаємо припуски і напуск на розгортку для механооброблення. Розгортку поковки з припусками й розмірами наведено на рис. 5.10 (вигляд зверху) і 5.11 (вигляд збоку).

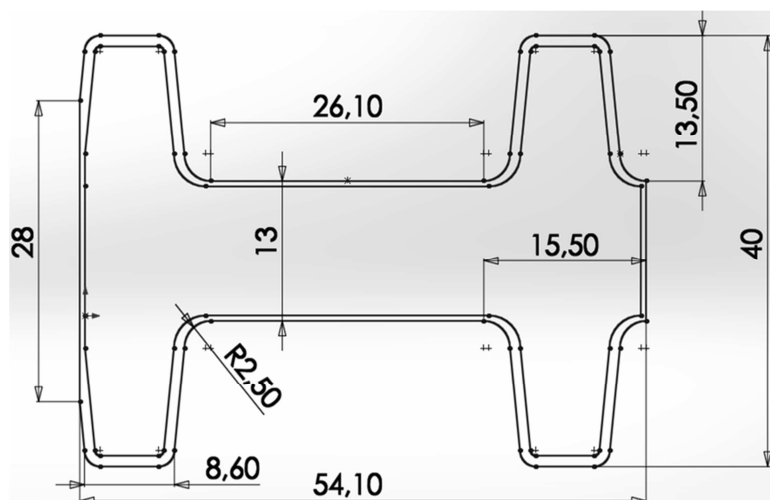


Рисунок 5.10 – Розгортка поковки з припуском з розмірами (вигляд зверху)

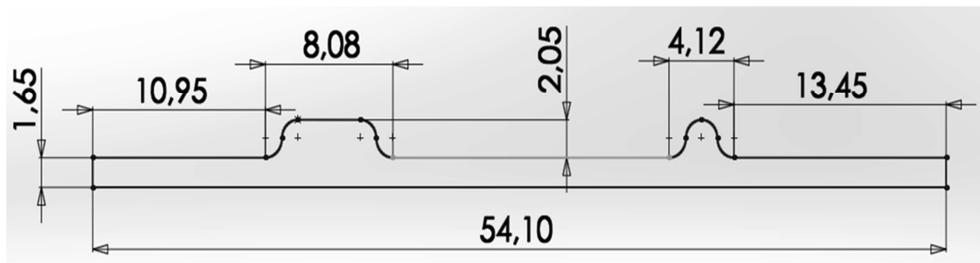


Рисунок 5.11 – Розгортка поковки з припуском з розмірами (вигляд збоку)

Особливість деталі в тому, що вона вставляється в хребет. З огляду на це вона повинна виготовлятися з титану марки ВТ1-0 високої чистоти, легкого жароміцного металу сірого кольору з температурою плавлення 1660 °С. Він відрізняється незначним коефіцієнтом температурного розширення, малою щільністю (4,505 г/см<sup>3</sup>), дуже високою пластичністю 20...80 %, яка дозволяє отримувати деталі будь-якої форми. Завдяки наявності поверхневої оксидної плівки, сплав має виняткову корозійну і хімічну стійкість, яка набагато перевищує стійкість неіржавких сталей [2].

Деформація титану марки ВТ1-0 повинна виконуватися з нагріванням. Температура нагрівання визначається декількома чинниками. Для виготовлення деталі «U-імплантат» використовуватиметься заготовка, отримана методами інтенсивного пластичного деформування. Заготовки, отримані цими методами, мають температуру рекристалізації нижчу, ніж температура рекристалізації недеформованої заготовки титану марки ВТ1-0. Через цю причину доцільно вибрати температуру нагрівання в інтервалі 350...450 °С. Деформування при нижчих температурах має переваги з точки зору збереження отриманих властивостей заготовки, але вимагає більш потужного устаткування й викликає великі навантаження на інструмент.

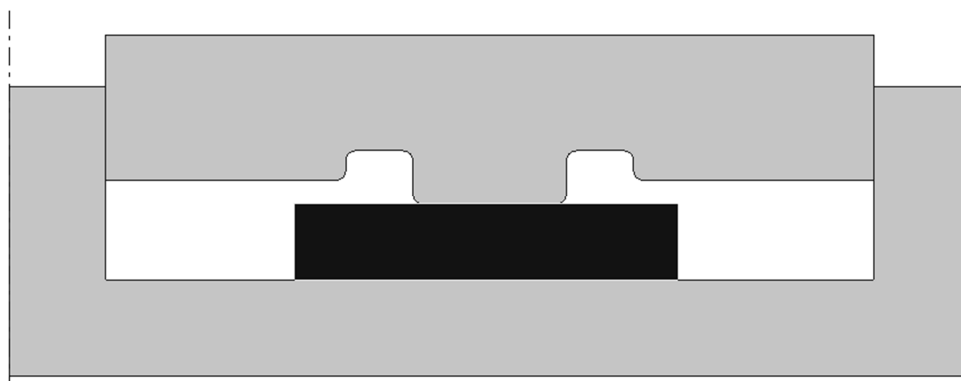
Температура заготовки приймається однаковою по всьому її перерізу. У реальності досить важливо, щоб до моменту початку оброблення перепад температур в центрі і на поверхні заготовки був мінімальним. Це необхідно враховувати й на етапі нагрівання, і при транспортуванні, оскільки поверхня заготовки в результаті теплообміну з довкіллям починає остигати раніше й інтенсивніше за центр.

Охолодження металу в штампі відбувається помітно швидше, ніж на повітрі. Температура металу на поверхні тим нижча, чим довше вона стикається з поверхнею струмка штамп. Для запобігання теплового зносу штамп (у результаті різкого перепаду температур) і поліпшення умов плинності металу штампування доцільно проводити у заздалегідь підігрітих штампах.

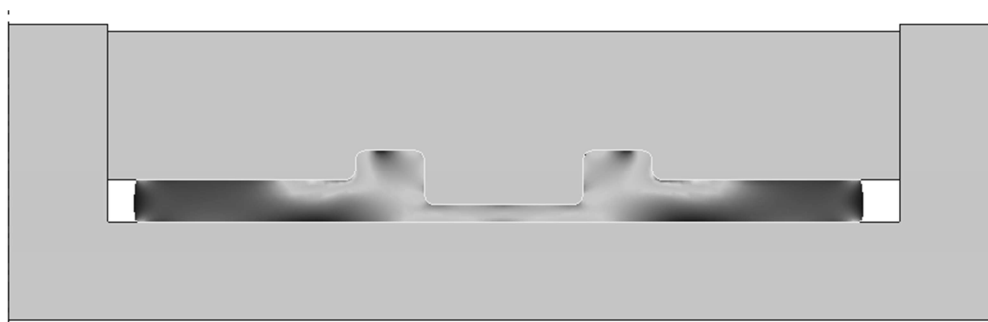
Для отримання деталі «U-імплантат» потрібно декілька переходів. Один перехід потрібний для формування необхідної довжини заготовки й отримання виступів, які використовуються для виготовлення зубців, що фіксують імплантат на хребцях. Після першого переходу потрібно виконати розподіли металу так, щоб його було досить для формування частин імплантату на наступних переходах. На рис. 5.12–5.17 наведено можливі ва-

ріант виконання першого переходу. При невірному проектуванні першого переходу в одній з частин може опинитися недостатньо металу для наступних переходів. Визначивши параметри першого переходу, розглянемо детальніше наступні переходи.

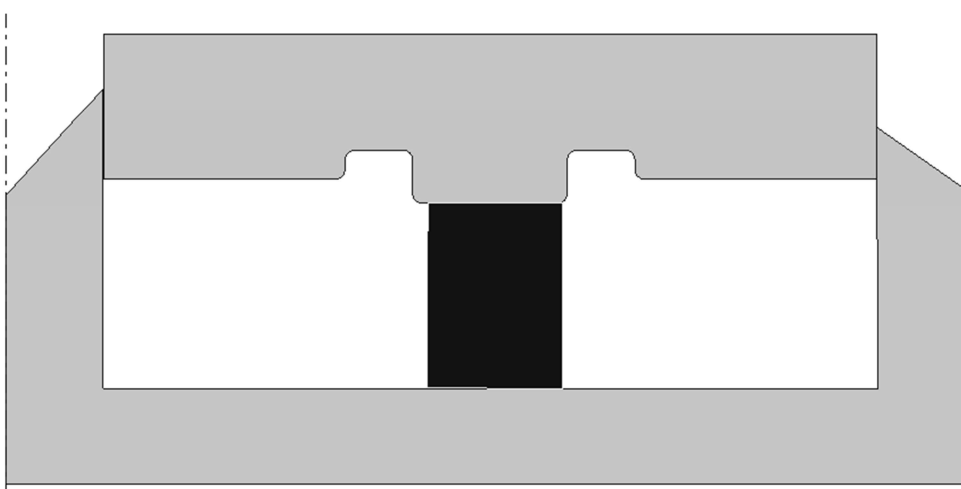
Попереднє моделювання для визначення параметрів першого переходу реалізовано в САЕ-системі QForm для плоскої задачі, що дозволяє істотно скоротити час проектування й швидко вибрати необхідну форму інструменту й розташування заготовки. Доцільно проаналізувати різну геометрію заготовки і варіанти розміщення її в порожнині штампу.



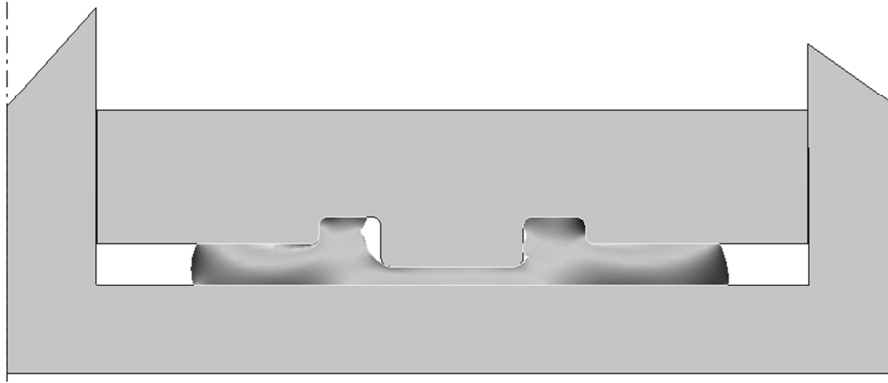
*Рисунок 5.12 – Розміщення низької заготовки по центру верхнього пуансона*



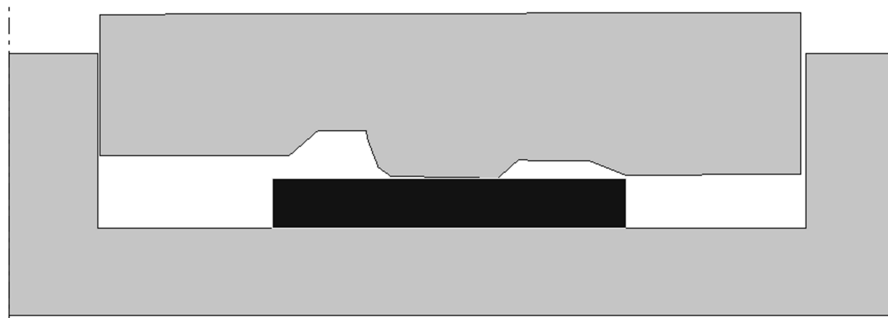
*Рисунок 5.13 – Розподіл металу після першого переходу*



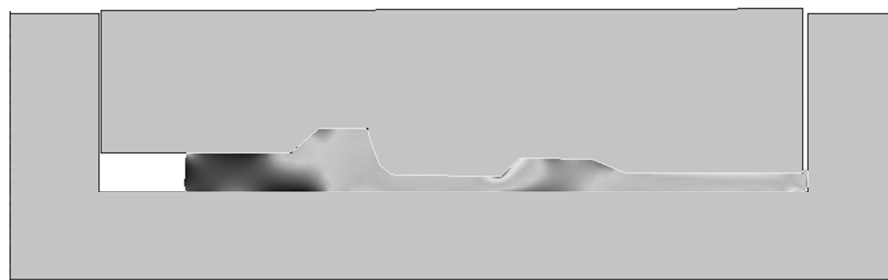
*Рисунок 5.14 – Розміщення високої заготовки по центру верхнього пуансона*



*Рисунок 5.15 – Розподіл металу після першого переходу і незаповнені порожнини в центральній частині при зміщенні заготовки*



*Рисунок 5.16 – Розміщення низької заготовки по центру асиметричного верхнього пуансона для вибору форми порожнин під зуби*



*Рисунок 5.17 – Розподіл металу після першого переходу і незаповнені порожнини в лівій частині*

Провівши попереднє моделювання можливих варіантів виконання першого переходу, для отримання деталі «U-імплантат» вибрано схему з розташуванням низької заготовки по центру симетричного пуансона. Таке розташування заготовки дає оптимальний розподіл металу після першого переходу. Вибір геометрії заготовки важливий для попередньої операції формозмінення. Деталь «U-імплантат» необхідно отримати із заготовки з поліпшеними фізико-механічними властивостями, які потрібні для надійної експлуатації імплантату протягом тривалого часу. Такі фізико-механічні властивості забезпечуються методами інтенсивного пластичного деформування. Після оброблення методом ПД заготовці необхідно надати необхідні розміри для подальшого формозмінення.

## 5.1.2 Проектування оснащення для виготовлення деталі «U-імплантат»

На основі побудованої тривимірної моделі поковки (див. рис. 5.9) спроектуємо оснащення. Проектування оснащення повністю залежить від форми поковки. Тому при виготовленні оснащення потрібно враховувати такі формотвірні елементи поковки :

- наявність зубців на верхній стороні;
- довгі крила, що йдуть з боків;
- зубці на крилах;
- заготовка не повністю симетрична відносно осі, проведеної упоперек.

Зуби на верхній стороні поковки створюють одну з найбільших складнощів при проектуванні. З одного боку розташовуються три зуби, а з іншого – тільки один. При цьому динаміка плинності металу не дасть звичайним штампуванням видавити округлення хоч би допустимої точності через їхні висоти і радіуси (2 мм і 1 мм, відповідно) – метал занадто сильно розтікатиметься в сторони. Цю проблему можна вирішити, додавши на штамп аналогічні радіуси і, що більш важливо, зробити невеликі фіксатори, що спускаються, які не даватимуть металу розтікатися в різні боки занадто швидко. Цей виступ має бути таким, що не сильно виділяється, інакше він сильно деформується за відносно малу кількість штампувань. Чим точніше буде оптимальне рішення між товщиною, до якої можна додати центр поковки, і силою розтікання в боки, яка не повинна вийти за межі допускних розмірів під зубці, тим менше металу знадобиться для заготовки, меншою буде прикладена сила, і економія коштів як при штампуванні, так і при механообробленні.

Крила заготовки – також складний елемент поковки. Для правильного їх формування потрібно достатньо металу. Правильна форма крил багато в чому залежить від успіху попереднього етапу з витискуванням металу під зуби. Найбільш відповідним буде осадити заготовку по усій довжині. Для цього треба буде зафіксувати заготовку, щоб на першому етапі метал не потік у бік крил. Центральний інструмент, що відповідає за осідання металу по центру, на етапі утворення крил має бути залишений на своєму місці, інакше метал може текти у зворотному напрямі, і, замість формотворення крил, зіпсує верхні зубці. Зубці на крилах утворюються із залишків металу при осаджуванні крил, тому при початкових розрахунках є сенс дещо збільшити об'єм заготовки, щоб гарантувати заповнення порожнини матриці.

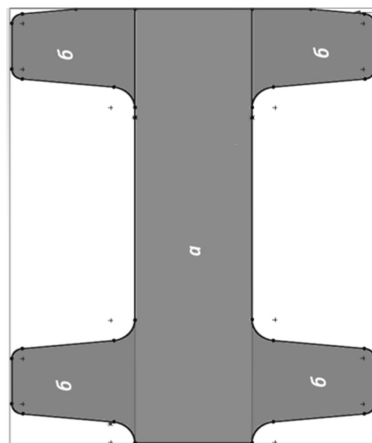
Поковка симетрична відносно осі уподовж, але не симетрична відносно осі упоперек. Різна кількість зубів, додаткова кількість металу в найвіддаленішій ділянці (який також впливає й на бічні крила) не дають можливості розмістити заготовку по центру. Необхідно визначити, у який бік і наскільки потрібно зрушити заготовку для потрібного розподілу металу в боки.

### 5.1.3 Розрахунок послідовних етапів пластичного деформування поковки

Для того щоб виконати моделювання й розрахунок проектування поковки методом пластичного деформування, необхідно врахувати багато чинників.

Виготовлення деталі «U-імплантат» методом пластичного деформування досягається в декілька переходів. На першому етапі заготовка поміщується в матрицю відповідної форми й відбувається попереднє оброблення заготовки шляхом тиску по центру пуансоном області між зубами. Під дією пуансона метал заготовки змінює свою форму і розтікається від центру до бічних сторін матриці. На другому етапі попереднього оброблення два пуансони давлять заготовку по бічних краях і видавлюють метал форми під крила.

Маючи форму розгортки деталі «U-імплантат» з припусками під механооброблення, виконаємо проектування пуансонів і матриці. Пуансони й матриця, які використовуються в розрахунках, будуть незначно відрізнятися від тих, що вимагається використати у виробництві. А саме тим, що увесь периметр матриці буде прямокутним і значно вище, щоб під час виробництва не допустити сильну деформацію поточної матриці (яка в розрахунках задається як абсолютно жорстка). Вона матиме довгасту форму для того, щоб ми змогли осадити її уподовж, і стінки з боків, щоб заготовка при деформуванні була зафіксована з боків. А оскільки заготовку потрібно буде осадити ще і в боки для крил, то на перших етапах будемо вставляти заглушки відповідної форми, а на подальших – їх видалимо. Ескіз пуансонів для виготовлення деталі «U-імплантат» із позначеними центральною частиною і «заглушками» зображений на рис. 5.18.

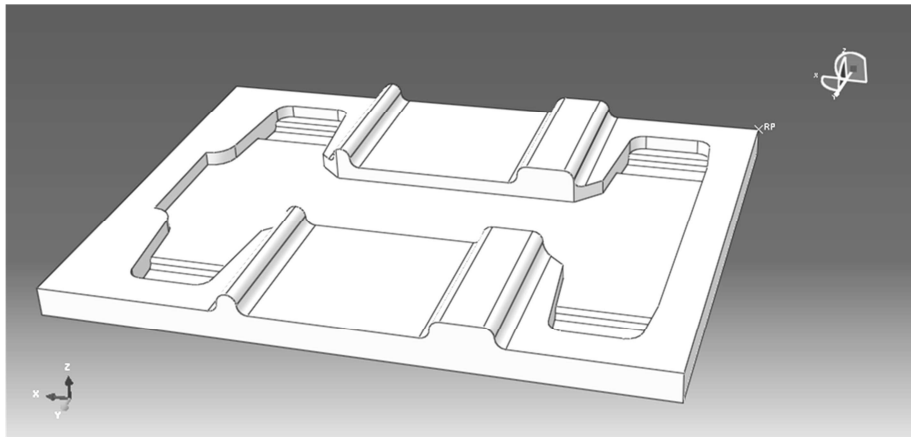


*а – центральна частина»; б – «заглушки»*

*Рисунок 5.18 – Ескіз пуансонів для виготовлення деталі «U-імплантат»*

Матрицю для виготовлення деталі «U-імплантат» наведено на рис. 5.19.

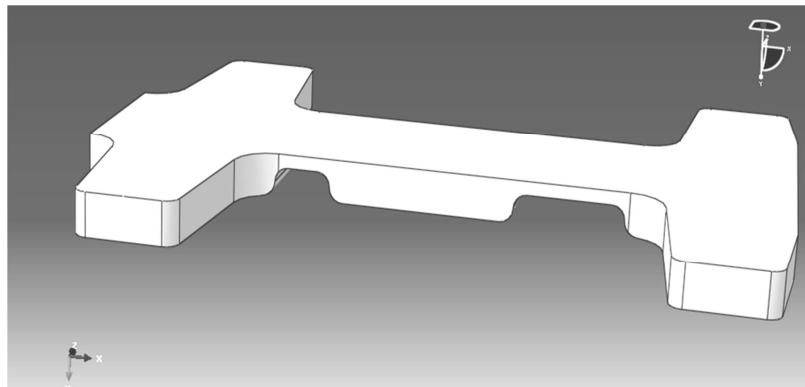




*Рисунок 5.19 – Матриця*

Для штампування додаємо в штамп пуансони. При осадженні пуансонами необхідно домогтися інтенсивної пластичної плинності металу й заповнення металом усієї поверхні матриці. Такого заповнення не можна досягти за одне осадження пуансоном через контактну взаємодію елементів штампового оснащення, а також складної форми поковки, тому необхідно осаджувати пуансоном по усій площі матриці: спочатку по центру, а потім по крилах, не зачіпаючи область із зубами. Тому для здійснення осадження знадобляться три пуансони, які об'єднуються в об'єднаний пуансон. Об'єднаний пуансон зображений на рис. 5.20. Певна область заготовки осаджується однією з трьох частин об'єданого пуансона. Ескіз пуансона для виготовлення деталі «U-імплантат» наведено на рис. 5.21.

На кінцях пуансона (див. рис. 5.21) зроблено невеликі виступаючі елементи, мета яких – стримувати плинність металу в різні боки.



*Рисунок 5.20 – Об'єднаний пуансон*



*Рисунок 5.21 – Ескіз пуансона для виготовлення деталі «U-імплантат»*

Завдання першого пуансона – осадити метал по центру так, щоб залишилося місце під зубці. Наступний штамп повинен осадити метал на всю довжину усередині матриці. На другому етапі центральний пуансон повинен залишатися на деталі. За формоутворення крил відповідає третій пуансон, його завдання – осадити метал в області крил. Як і у випадку з першим пуансоном, треба також залишити в ньому порожнину під зуби. Але на відміну від зубів на верхній стороні, крила є повністю симетричними, і метал під них знаходиться не біля основи, що утруднює процес формоутворення, а на кінцях. Не доцільно додавати до третього пуансона елементи, що виступають, для гальмування процесу плинності в сторони. Причини, через які ми не можемо відразу виготовити форми крил заготовки, полягають у тому, що це потребувало б значно більше енерговитрат, з якими теоретично прес міг би не впоратися і прийти в стан непрацездатності. Тому процес виготовлення крил U-імплантату складається з двох частин. Перша частина - це деформування заготовки на краях у районі крил третім пуансоном. А друга частина – це  $n$ -на кількість осаджень пуансоном безпосередньо самої форми крил. Кожне осадження пуансоном заготовки йде рівномірно від її центру до її крил. Залежно від розміру крил кількість цих пуансонів може варіюватися. Наступним етапом є моделювання заготовки під деталь.

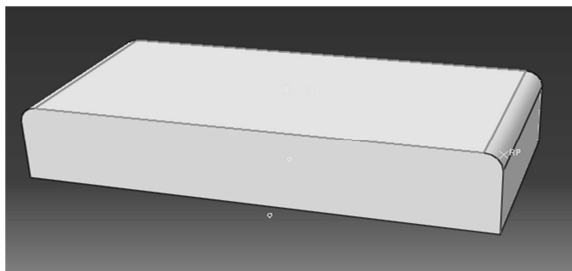


Рисунок 5.22 – Заготовка

У якості заготовки (див. рис. 5.22) вибирається брусок титану ВТ1-0 шириною 13 мм. Деформована заготовка повинна займати певний об'єм  $V = \text{const}$  (виконується умова постійності об'єму). Заготовка заздалегідь нагрівається до 400 С.

Далі спроектовані матриця, об'єднаний пуансон і заготовка об'єднуються у збірку. Приклад розташування деталей у збірці показано на рис. 5.23.

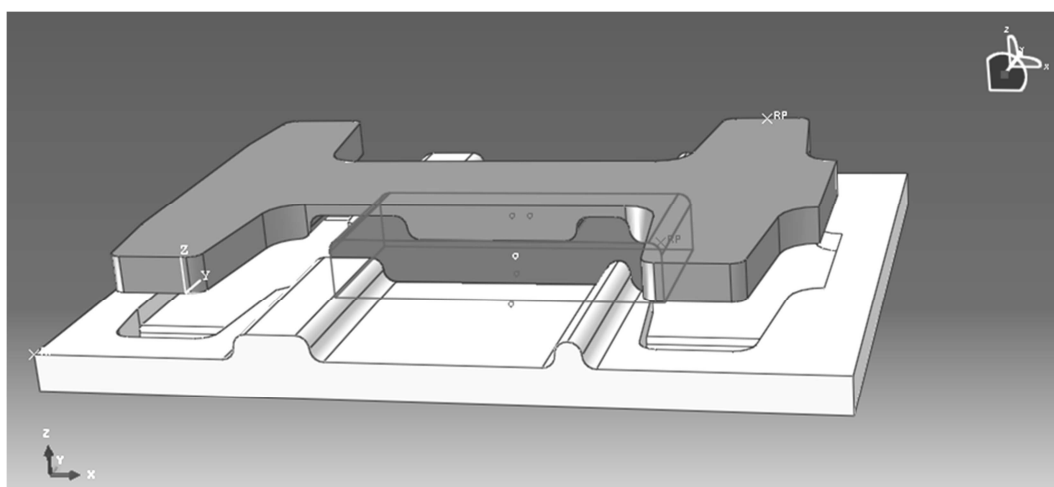


Рисунок 5.23 – Приклад розташування деталей у збірці

## 5.2 Моделювання осаджування заготовки «U-імплантат» в САЕ-системі ABAQUS

### 5.2.1 Генерація скрипту для моделювання технологічного процесу пластичного деформування й оснащення за допомогою САЕ-систем

Проектування й оптимізація технологічного процесу (ТП) пластичного деформування й оснащення були виконані в САЕ-системі ABAQUS. Ця система була обрана як найбільш відповідне середовище для проектування й проведення дослідження цього ТП, зважаючи на можливість відстежування фізико-механічних параметрів пресу і заготовки під час деформування й проведення дослідження впливу різних чинників, таких як час, характер плинності металу, енерговитрати на деформування, а отже, і грошові витрати на кінцеву поковку.

Наявність інтерпретатора мови програмування Python у складі САЕ-системи створює можливість реалізації програмного скрипту, який виконується в середовищі ABAQUS. Макроси надають можливість автоматизувати завдання, пов'язані з інтеграцією і введенням інформації. Структуру взаємодії скрипту, інтерфейсу користувача й ABAQUS наведено на рис. 5.24 [3].

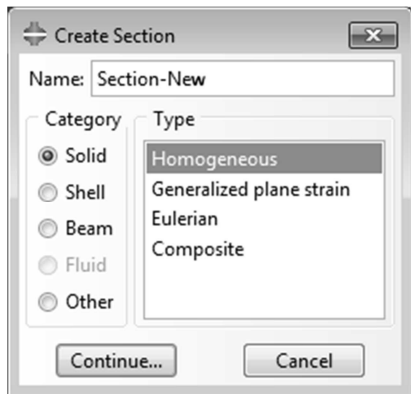


Рисунок 5.24 – Структура взаємодії скрипту, призначеного для інтерфейсу користувача в ABAQUS [3]

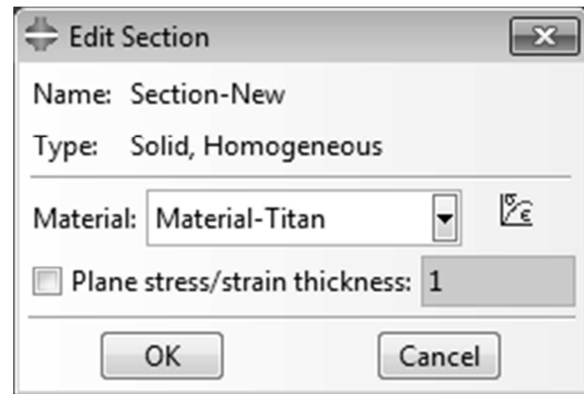
Будь-яку дію користувача, таку як взаємодія з графічними елементами або робота в командному рядку, генерують команди на мові Python. Ці команди обробляються інтерпретатором і посилають результат у ядро ABAQUS. ABAQUS, у свою чергу, генерує вхідні файли, які посилаються в один з можливих «вирішувачів» ABAQUS. Потім вирішувач робить розрахунок проекту, результати якого «упаковуються» у вихідну базу даних [4]. Оскільки будь-які дії користувача генерують команди скрипту, в ABAQUS вбудовано функцію запису цих дій. Наприклад, на рис. 5.25 і 5.26 показано створення перерізу з ім'ям Section-New з вибором параметрів і матеріалу перерізу.

Якщо під час запису макросу створити новий переріз, як показано на рис. 5.25, а, то відповідні команди скрипту виглядатимуть на мові Python так, як показано на рис. 5.25, б.

Грунтуючись на функції запису скрипту (див. рис. 5.26), стає можливим записати макрос, який створить повністю увесь проект, завантажить деталі, призначить різні параметри, включаючи розміри заготовки, створить проект розрахунку і його запуск.



А



Б

Рисунок 5.25 – Вибір параметрів перерізу і матеріалу перерізу

```
import section
mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(
    name='Section-New',
    material='Material-Titan',
    thickness=None)
```

Рисунок 5.26 – Фрагмент коду на мові Python, що створює переріз у системі ABAQUS

Але створення кожного разу одного й того самого скрипту зі змінними параметрами для кожного розрахунку - дуже трудомістке завдання, адже велика частина дій дублюватиметься. Вирішити цю проблему можна шляхом синтаксичного оброблення тексту з додаванням параметризації. Важливі моменти нашого генерованого скрипту ми замінимо синтаксич-

ними константами, що складаються з унікальних символів, які точно не повторяться в тексті, наприклад: «###WidthPalte###». Потім при обробленні скрипту замінимо символну послідовність реальними значеннями. Для полегшення створення скрипту розіб'ємо його на декілька кроків.

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Створення матеріалу             | 8. Створення заготовки                     |
| 2. Створення перерізу              | 9. Створення складання                     |
| 3. Створення властивостей контакту | 10. Створення кроків обробки               |
| 4. Завантаження пуансон-матриці    | 11. Привласнення контактів                 |
| 5. Завантаження пуансон-штампа 1   | 12. Створення навантажень і граничних умов |
| 6. Завантаження пуансон-штампа 2   | 13. Створення сітки                        |
| 7. Завантаження пуансон-штампа 3   | 14. Створення і запуск роботи              |

Кожен розділ може бути або статичним (однаковим в усіх варіантах розрахунку), або динамічним (деякі елементи розраховуються, виходячи з конкретного завдання).

1. Створення матеріалу (є статичним розділом). У цьому випадку заготовка виготовлена з титана VT1-0, нагрітого до 350...400 °С. Для програмних розрахунків матеріал задається такими характеристиками, як щільність (щільність маси), еластичність (модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона) і пластичність (графік залежності питомого навантаження від пластичного деформування). Прийнятну криву зміцнення матеріалу VT1-0 для температури 400 °С наведено на рис. 5.27.

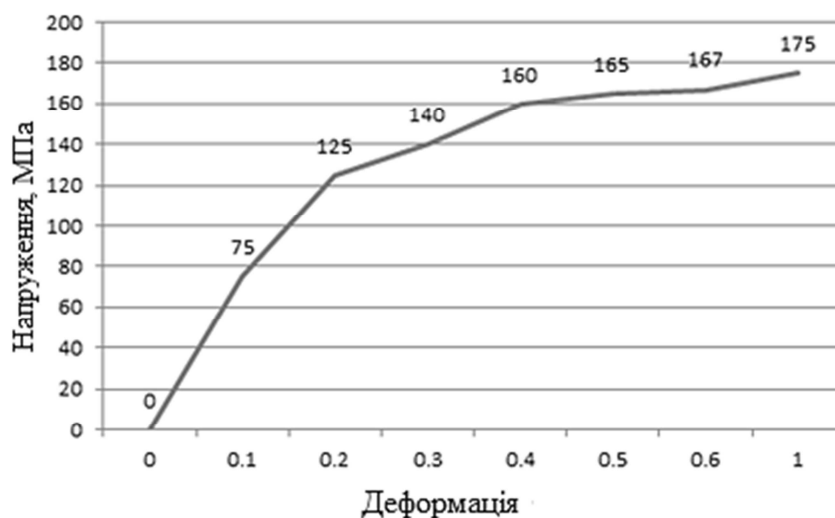


Рисунок 5.27 – Крива зміцнення матеріалу VT1-0

2. Створення перерізу (є статичним розділом). Переріз тісно взаємозв'язаний з матеріалом, оскільки, тільки використовуючи перерізи, можна вказати матеріал для нашої деталі. Для кожного перерізу має бути вказаний свій матеріал. Смысл перерізу в тому, що ми вказуємо, який тип має наша деталь: твердотіла, листовая або інша. У будь-якого типу є свої підтипи, так, наша заготовка є твердотілою, однорідною деталлю.

3. Створення властивостей контакту (є статичним розділом). Під час штампування взаємодіють поверхні заготовки і пуансонів. Внаслідок такої взаємодії основним параметром є сила тертя. Цей параметр можна зробити динамічним, якщо під час розрахунків сила тертя виявиться занадто великою. Код на мові Python для створення властивостей перерізу наведено на рис. 5.28.

```
mdb.models['Model-1'].ContactProperty('IntProp-2')
    mdb.models['Model-1'].interactionProperties['IntProp-2'].TangentialBehavior(
        formulation=PENALTY,
        directionality=ISOTROPIC,
        slipRateDependency=OFF,
        pressureDependency=OFF,
        temperatureDependency=OFF,
        dependencies=0,
        table=((0.3,)),
        shearStressLimit=None,
        maximumElasticSlip=FRACTION,
        fraction=0.005,
        elasticSlipStiffness=None)
```

*Рисунок 5.28 – Код на мові Python для створення властивостей перерізу*

У цьому коді (рис. 5.29) параметр «table», що дорівнює «0.3», відповідає коефіцієнту сили тертя.

```
parasolid = mdb.openParasolid(
    fileName='D:/DiplomD/MainPart.x_t', topology=SOLID)
mdb.models['Model-1'].PartFromGeometryFile(
    name='PartMatrix',
    geometryFile=parasolid,
    combine=False,
    dimensionality=THREE_D,
    type=DEFORMABLE_BODY, scale=1.0)
```

*Рисунок 5.29 – Код на мові Python для імпорту деталей*

Тому, якщо виникне необхідність змінити силу тертя, це значення має бути змінено на символічну константу, яка буде змінена при парсингу.

Парсинг – це процес перетворення текстового рядка шляхом заміни деяких його символів на інші символи. По суті, парсинг є форматуванням тексту й перетворенням його.

4. Завантаження пуансон-матриці (є статичним розділом). Оскільки форма пуансон-матриці не є простою, то доцільно буде зробити її в САД-системі, а потім імпортувати до САЕ-системи.

5. Завантаження пуансон-штампа 1 (є статичним розділом).

6. Завантаження пуансон-штампа 2 (є статичним розділом).

7. Завантаження пуансон-штампа 3 (є статичним розділом). Ці розділи виконуються аналогічно пункту 4.

8. Створення заготовки (є динамічним розділом). У цьому випадку заготовка має форму прямокутної металевої пластини. Її побудову легко виконати в АВАQUS, і завдяки цьому параметризувати. На рис. 5.30 присутні дві символічні константи «###WidthPlate###» і «###HeightPalte###», що відповідають ширині й висоті заготовки. Під час парсингу замість них підставляються відповідні розраховані значення, і, зрештою, заготовка набуде потрібної форми, яка легко впишеться в іншу частину проекту.

```
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch( name='__profile__', sheetSize=200.0)
g, v1, d, c1 = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s.rectangle(
    point1=(-45.0, -5.0),
    point2=(10.0, 15.0))
s.ObliqueDimension(vertex1=v1[3], vertex2=v1[0], textPoint=(-31.3149356842041,
-12.3279333114624), value=###WidthPlate###)
s.ObliqueDimension(vertex1=v1[0], vertex2=v1[1], textPoint=(-55.5450477600098,
5.24291515350342), value=13.0)
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Zagotovka', dimensionality=THREE_D,
type=DEFORMABLE_BODY)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Zagotovka']
p.BaseSolidExtrude(sketch=s, depth=###HeightPalte###)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Zagotovka']
d2 = p.datums
p.DatumPointByOffset(point=d2[4], vector=(1, 0.0, 0.0))
```

*Рисунок 5.30 – Код на мові Python, що виконує параметризацію геометричних розмірів заготовки*

Оскільки в АВАQUS зв'язок з проектом (складання, контактна взаємодія, скінченно-елементна сітка) здійснюється через масиви точок, граней

і поверхонь заготовки, зміна геометричних характеристик легко параметризує проект.

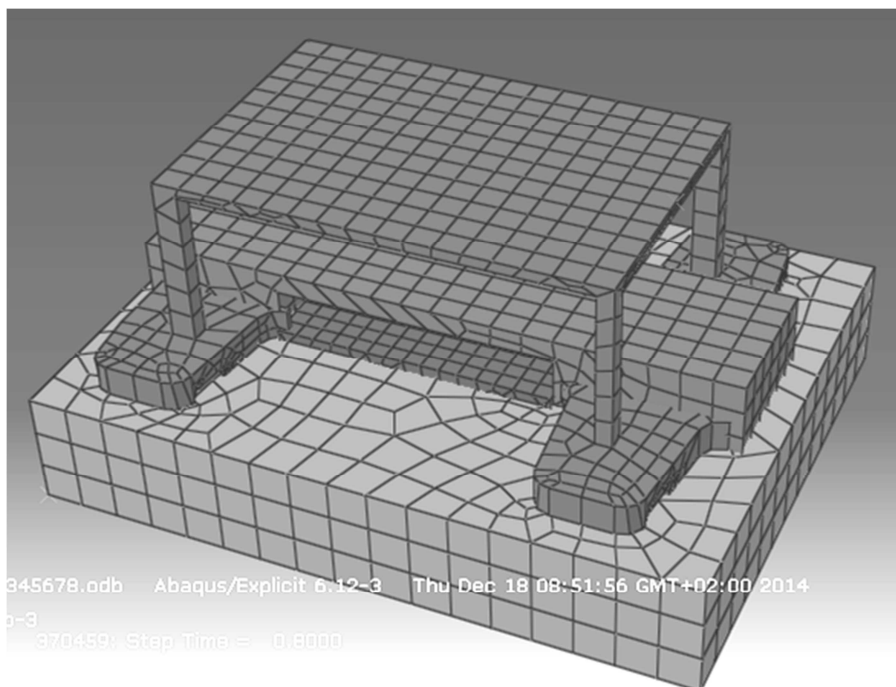
9. Створення складання (є статичним розділом). Складання описує розташування й взаємодію різних деталей між собою (матриці, пуансон і заготовки). На рис. 5.31 у якості прикладу показано, як задати прив'язку центральної точки матриці й заготовки в кодї на мові Python, а на рис. 5.32 – результат виконання цього коду.

Як сполучні ланки використовуються точки, грані, поверхні й тіла.

10. Створення кроків (є статичним розділом). Крок у ABAQUS використовується для задавання послідовного руху пуансонів (рис. 5.33). На першому кроці рухається центральний пуансон (пуансон 1), на другому – бічний пуансон (пуансон 2), на третьому – пуансон для крил (пуансон 3).

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['Zagotovka']
a.Instance(name='Zagotovka-1', part=p, dependent=ON)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
d11 = a.instances['Zagotovka-1'].datums
d12 = a.instances['PartMatrix-1'].datums
a.CoincidentPoint(movablePoint=d11[8], fixedPoint=d12[6])
```

*Рисунок 5.31 – Код на мові Python, що задає прив'язку центральної точки матриці й заготовки*



*Рисунок 5.32 – Складання, побудоване після виконання коду на мові Python*



```
mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Step-1', previous='Initial')
mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Step-2', previous='Step-1')
mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Step-3', previous='Step-2')
```

*Рисунок 5.33 – Код на мові Python, що демонструє створення трьох кроків деформування*

11. Привласнення контактів (є статичним розділом). Оскільки у нас є декілька пуансонів, кожен з яких складається з одного або різних матеріалів, то необхідно задати, яка взаємодія буде між двома різними поверхнями. Для нашого завдання необхідно задати 4 контакти:

- між заготовкою і пуансоном 1;
- між заготовкою і пуансоном 2;
- між заготовкою і пуансоном 3;
- між заготовкою і матрицею.

Для кожного з чотирьох контактів мають бути написані свої ділянки коду на мові Python. Контакт включає властивість контакту.

На рис. 5.34 наведено код на мові Python, який встановлює контактну взаємодію між матрицею й заготовкою.

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['PartMatrix-1'].surfaces['Surf-1']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Zagotovka-1'].surfaces['Surf-1']
mdb.models['Model-1'].SurfaceToSurfaceContactExp(name='Int-1',
createStepName='Initial', master = region1, slave = region2,
mechanicalConstraint=KINEMATIC, sliding=FINITE,
interactionProperty='IntProp-2', initialClearance=OMIT, datumAxis=None,
clearanceRegion=None)
```

*Рисунок 5.34 – Код на мові Python, що встановлює контактну взаємодію між матрицею й заготовкою*

12. Створення навантажень і граничних умов (є динамічним розділом). Для проведення розрахунків необхідно задати рух пуансонам для осаджування заготовки, а матрицю жорстко зафіксувати. Для забезпечення цих дій призначається точка опори (reference point, RF) і для кожної з цих точок обмеження по ступенях свободи: жорстка фіксація або рух на вказану відстань за будь-якою з осей координат (табл. 5.1).

У табл. 5.1, де описано завдання граничних умов для деталей, «зафіксовано» означає, що деталь не рухається ні по якій з осей, «рухається» означає, що тіло переміщується по одній або декількох осях, «вільно» означає, що тіло ніяк не зафіксовано й не рухається.

Таблиця 5.1 – Задавання граничних умов для деталей

	Крок 1	Крок 2	Крок 3
Матриця	Зафіксовано	Зафіксовано	Зафіксовано
Пуансон 1	Рухається (z)	Зафіксовано	Зафіксовано
Пуансон 2	Зафіксовано	Рухається (z)	Зафіксовано
Пуансон 3	Зафіксовано	Зафіксовано	Рухається (z)
Заготовка	Зафіксовані бокові поверхні (y)	Вільно	Вільно

Задавання граничних умов для деталей дуже важливе, тому що при цьому задається, на яку відстань і по якій осі переміщується пуансон.

На рис. 5.35 наведено код на мові Python, що встановлює, на скільки повинен переміщуватися перший пуансон. У цій ділянці коду записана символічна константа. Ця константа замінюється при парсингу на вже розраховане реальне значення, на яке повинен опуститися поточний штамп-пуансон.

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
r1 = a.instances['Puanson1-1'].referencePoints
refPoints1=(r1[5],)
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-2')
mdb.models['Model-1'].VelocityBC(name='BC-Puanson1Load',
createStepName='Step-1', region=region, v1=0.0, v2=0.0, v3=###LoadPuanson1###,
vr1=0.0, vr2=0.0, vr3=0.0, amplitude=UNSET, localCsys=None,
distributionType=UNIFORM, fieldName='')
mdb.models['Model-1'].boundaryConditions['BC-Puanson1Load'].deactivate('Step-2')
```

Рисунок 5.35 – Код на мові Python, що встановлює рух першого пуансона

### 13. Створення скінченно-елементної сітки (є статичним розділом).

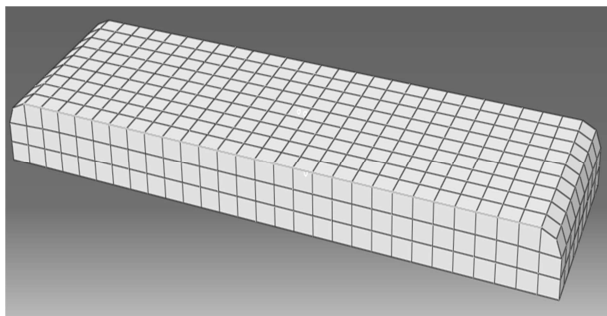


Рисунок 5.36 – Заготовка з нанесеною скінченно-елементною сіткою

Оскільки ABAQUS робить розрахунок на основі методу скінченних елементів, то для кожної деталі треба створити скінченно-елементну сітку. Зменшення розміру елемента викликає збільшення часу розрахунку. Необхідно вибрати оптимальний розмір елемента деформованих деталей. На рис. 5.36 наведено заготовку з нанесеною скінченно-елементною сіткою.

На рис.5.37 наведено код на мові Python, що реалізовує нанесення скінченно-елементної сітки на заготовку.

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Zagotovka']  
p.seedPart(size=0.8, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)  
p = mdb.models['Model-1'].parts['Zagotovka']  
p.generateMesh()
```

*Рисунок 5.37 – Код на мові Python, що реалізовує генерацію скінченно-елементної сітки для заготовки*

Окрім розміру, сітки можна скористатися адаптивним вирішувачем. Це дозволить перебудувувати сітку заготовки на етапі виконання. У ряді випадків використання адаптивного вирішувача може призводити до значного уповільнення розрахунку або виникнення помилки при перебудові сітки.

14. Початок запуску (є статичним розділом). Він створює завдання для розрахунку, вказує кількість ядер процесора, що виконує розрахунки і запускає завдання.

Потім виконується заміна параметрів скрипту на значення з використанням парсингу. Як вже відзначалося раніше, скрипт генерується шляхом записування послідовності дій користувача. У результаті такого запису виходить генерований програмний код скрипту на мові Python. Надалі запуск такого коду істотно полегшить проведення моделювання процесу деформування, істотно зменшить витрати часу на його проведення. Але коли вимагається змінити значення вхідних параметрів моделювання, використати код у такому вигляді, в якому його згенерувала програма, не є можливим. Такими вхідними параметрами є, наприклад, відстань, на яку повинні переміщуватися пуанسونи, розміри заготовки й інші. Тоді користувачеві необхідно здійснити генерацію коду скрипту, що відповідає за моделювання деформування, шляхом парсингу програмно згенерованого коду скрипту.

Перед проведенням парсингу необхідно зробити заміну частин скрипту, вхідних параметрів, що відповідають за введення, на символічні константи. Парсинг виконується шляхом застосування стандартних функцій класу String, платформи .NET Framework мови програмування C#. На рис. 5.38 наведено сигнатуру функції Replace класу String, призначену для заміни окремих ділянок рядків.

Сигнатура функції Replace має такі параметри: oldValue - рядок, який необхідно замінити, newValue - рядок для заміни всіх входжень oldValue. Значення, яке повертається, – рядок, еквівалентний поточному рядку, але з тією відмінністю, що всі входження oldValue замінені на newValue. Якщо oldValue не виявлений у поточному примірнику, метод повертає поточний примірник без змін. Цей метод не змінює значення поточного примірника. Замість цього повертається новий рядок, у якому всі входження oldValue замінюються на newValue.

```
public string Replace(
    string oldValue,
    string newValue)
```

Рисунок 5.38 – Сигнатура функції *Replace* класу *String*, призначеної для заміни окремих ділянок рядків

При парсингу треба пам'ятати також і те, що функція замінює усі виходження поточного рядка, тому слід потурбуватися про те, щоб символні константи були унікальними й не повторювалися. Для забезпечення цієї умови скористаємося особливістю мови Python, а конкретно оголошенням коментарів. Коментарі в коді на мові Python оголошуються символом «#». Тому цей символ використовується для позначення символних констант. Якщо деяка з символних констант не обробиться, то під час створення буде видано повідомлення про помилку. Для гарантії оброблення всіх символних констант додається «###» перед символною константою й після неї. У табл. 5.2 наведено позначення символних констант.

Таблиця 5.2 – Позначення символних констант

Назва константи	За що відповідає ця константа
WeightPlate	Довжина заготовки
HeightPlate	Висота заготовки
Puanson1Load	Відстань, що проходить перший пуансон
Puanson2Load	Відстань, що проходить другий пуансон
Puanson3Load	Відстань, що проходить третій пуансон

На рис. 5.39 наведено вікно програми «Генерація Python-коду для ABAQUS». Ця програма обробляє код скрипту, згенерований САЕ-системою ABAQUS під час проведення моделювання процесу деформування, так, щоб він став призначеним для користувача. Під час такого оброблення здійснюється парсинг, пошук значень вхідних параметрів, а саме об'єму, довжини і висоти заготовки, і їх заміни на значення, введені користувачем. Ширина заготовки приймається константною і складає 13 мм. Користувач задає об'єм (у мм<sup>3</sup>), довжину (у мм) і висоту (у мм) заготовки. Зміна будь-якого з трьох параметрів викликає зміну інших параметрів.

Програмний код скрипту вставляється в код програми. Ця програма робить парсинг програмного коду скрипту, призначеного для моделювання деформації деталі «U-імплантат» у САЕ-системі ABAQUS. Але також ця програма може здійснювати парсинг скрипту, що виконує моделювання процесу деформування заготовки в системі ABAQUS для побудови будь-якої деталі, а не тільки «U-імплантат». Тому розроблену програму можна вважати універсальною для парсингу скриптів, що здійснюють моделювання процесу деформування заготовки з метою отримання будь-яких деталей у САЕ-системі ABAQUS.

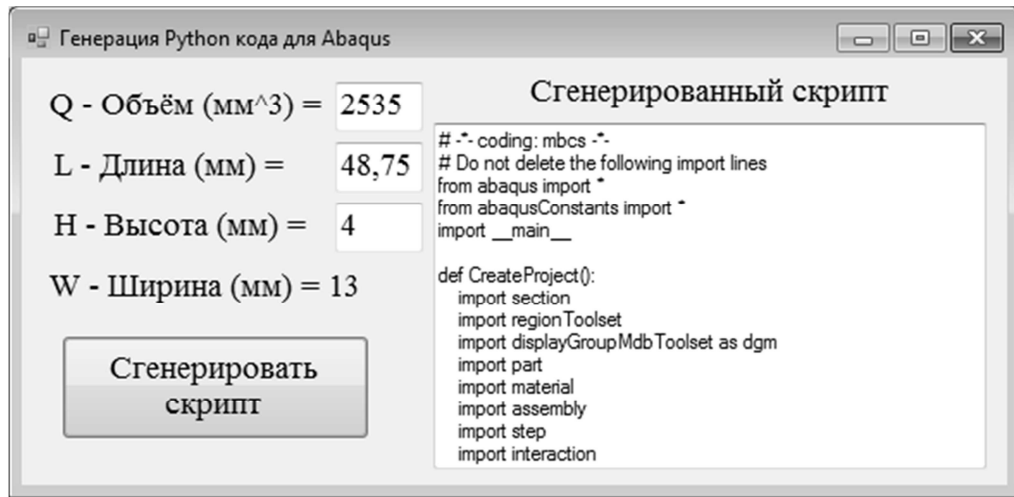


Рисунок 5.39 – Вікно програми «Генерація Python-коду для ABAQUS»

Після введення даних користувач натискає кнопку «Сгенерировать скрипт» і отримує код генерованого скрипту. Цей код вже скопійований у буфер обміну (імітація натиснення комбінації клавіш «Ctrl + C»), тому користувач повинен вставити цей код у вікно запуску скрипту в САЕ-системі ABAQUS комбінацією клавіш «Ctrl + V».

### 5.2.2 Дослідження процесу пластичного деформування заготовок і оснащення за допомогою САПР

Для початку проведення розрахунку необхідно створити проект у системі ABAQUS. Для цього скористаємося створеною САПР. У якості геометричних параметрів заготовки скористаємося даними, розрахованими раніше за допомогою САД-системи Solidworks: об'єм = 1950 мм<sup>3</sup>, висота заготовки = 4 мм. Згенерований скрипт запустимо в системі й отримаємо результат (рис. 5.40).

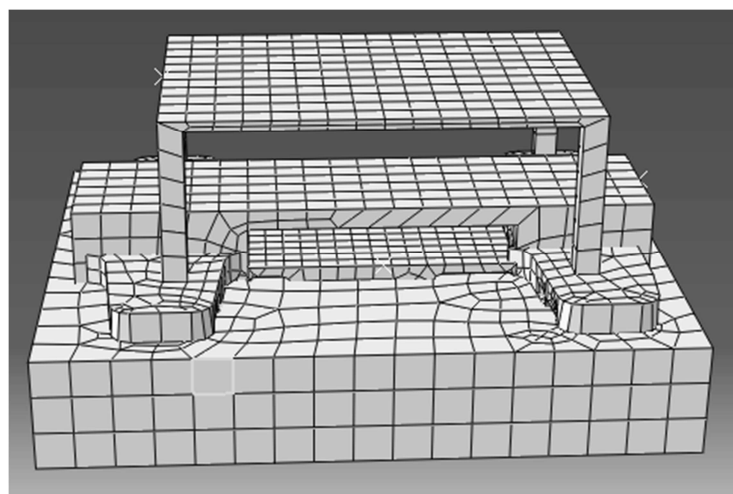


Рисунок 5.40 – Результат виконання скрипту, генерованого створеною САПР

Як видно з рис. 5.41, металу не вистачило на зуби і крила.

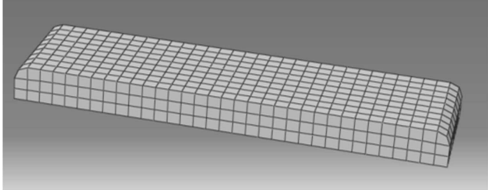
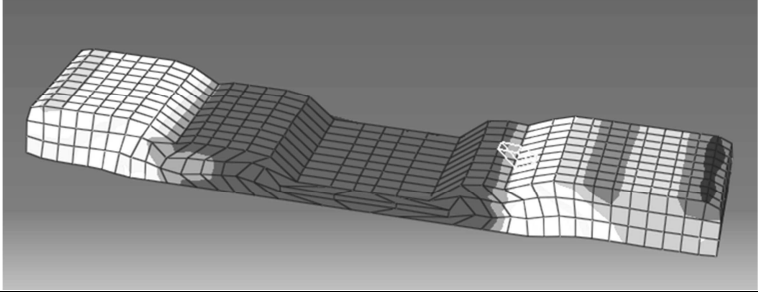
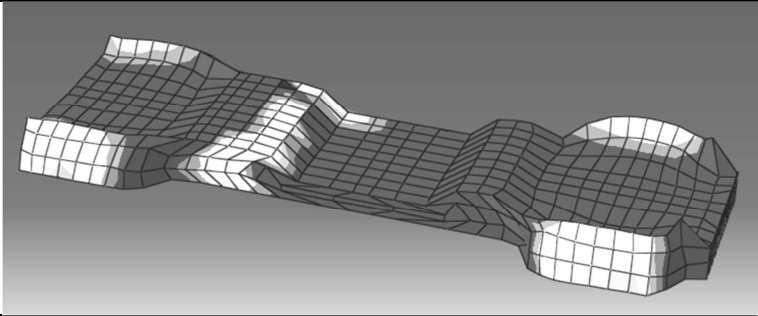
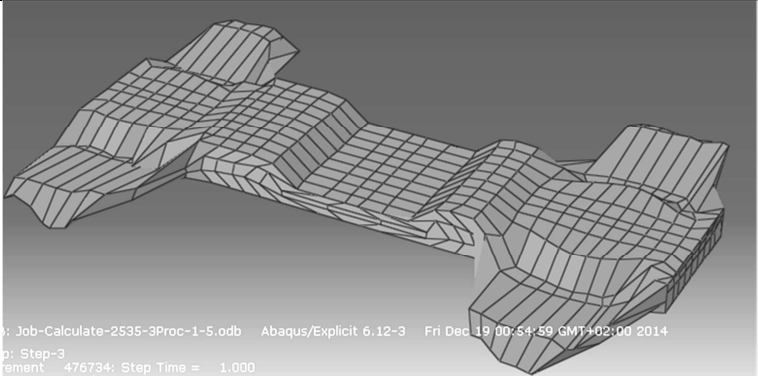
Номер етапу	Вигляд поковки на етапі деформування
0	
1	
2	
3	

Рисунок 5.41 – Деформована заготовка з нанесеною «грубою» сіткою, розмір елементів 1.5 мм

Для визначення достатнього об'єму заготовки збільшимо поточний об'єм на 30 %, щоб однозначно визначити межі потрібного об'єму:

$$Q_{min} < Q < Q_{max}, \quad (5.1)$$

де  $Q_{min}$  – об'єм заготовки, що однозначно менший від норми:  $Q_{min} = 1950 \text{ мм}^3$ ;

$Q_{max}$  – об'єм заготовки, що однозначно перевищує потрібну кількість металу, необхідного для виготовлення імплантату:  $Q_{max} = 2535 \text{ мм}^3$ .

Тепер для проведення подальших розрахунків потрібно просто вказувати в САПР потрібні геометричні характеристики, а згенерований скрипт з нуля створить наш проект і залишиться лише провести декілька розрахунків з різною сіткою.

Розмір елементів у сітці має важливе значення для розрахунків, тому що розмір елементів і час розрахунку пропорційні. При збільшенні щільності сітки точність і час розрахунку зростають. Для прикладу виконаємо розрахунок з «грубою» сіткою з розміром елементів 1.5 мм. На рис. 5.41 наведено поетапні результати деформування заготовки з нанесеною «грубою» сіткою, розмір елементів 1.5 мм. Надалі всі розрахунки будуть виконані на трьохядерному комп'ютері з продуктивністю 2.2 GHz кожного ядра.

Як ми бачимо, на першому і другому кроках деформація елементів незначна й знаходиться в допустимих межах, але на третьому етапі відбувається сильну деформацію бічних елементів. При цьому тривалість розрахунку склала 1.5 годин. Для порівняння зробимо розрахунок з розміром елементів 0.8 мм. Через зменшення розміру елементів у сітці майже у два рази очікується отримання деформованої заготовки більш високої якості. На рис. 5.42 наведено поетапні результати деформування заготовки з нанесеною сіткою, розмір елементів 0.8 мм.

Як і в розрахунках з «грубою» сіткою з розміром елементів 1.5 мм, на першому і другому кроках ступінь деформації склала 2...2.5 у центральній зоні заготовки. На третьому кроці він значно менший, тому що навантаження сконцентровані на елементах меншого розміру. Недоліком цього розрахунку є те, що він виконується 15 годин. Для додаткового порівняння наведемо приклад з розміром сітки з розміром елементів 1.2 мм, при якому час розрахунку дорівнює 4 години.

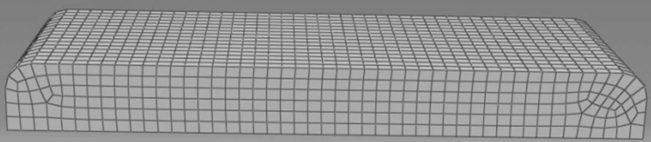
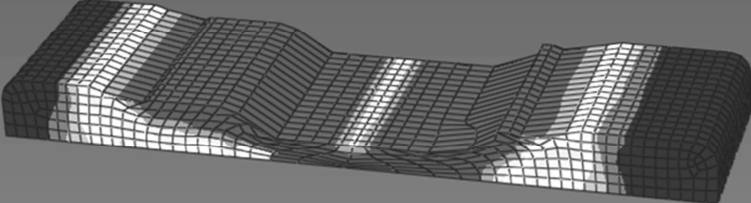
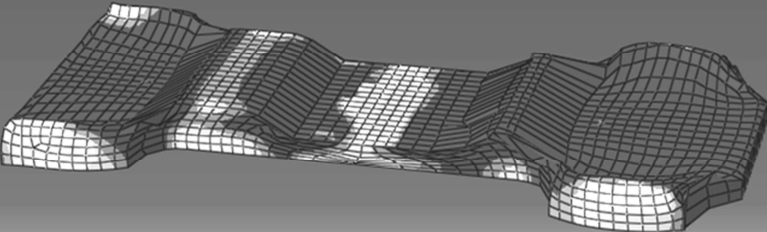
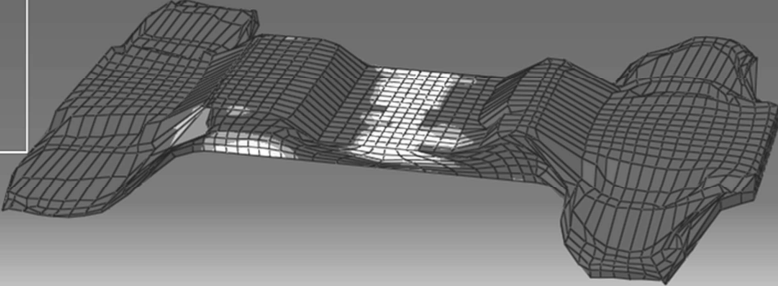
Розглянемо також тривалість розрахунку кожного кроку деформування (табл. 5.3).

Як видно з наведених експериментальних розрахунків, ущільнення сітки збільшує час розрахунку експоненційно, а точність розрахунків лінійно.

*Таблиця 5.3 – Тривалість розрахунку кроків деформування*

Крок (етап)	Час у %
1	10 %
2	25...30 %
3	60...65 %

Як видно з результатів розрахунків, одні скінченні елементи схильні до сильної деформації, інші – до слабкішої. Для пошуку найбільш компромісного варіанту проаналізуємо, наскільки сильно деформуються деякі елементи при сітці з розміром елементів 1.5 мм і 0.8 мм. Для цього скористаємося вбудованим функціоналом ABAQUS, який дозволяє побудувати графіки для будь-якого елемента під будь-яку характеристику: напруга, деформація, сила і тощо.

Номер етапу	Вигляд поковки на етапі деформування
0	
1	
2	
3	

*Рисунок 5.42 – Деформована заготовка з нанесеною сіткою, розмір елементів 0.8 мм*

Виберемо на першому (з сіткою 1.5 мм) і другому (з сіткою 0.8 мм) розрахунках два елементи: один – на бічній частині крила (сильно деформований), другий – на центральних зубцях (слабко деформований). На рис. 5.43 наведено вибрані два елементи на деформованій заготовці з сіткою з розміром елементів 1.5 мм.

На рис. 5.44, а наведено вибрані два елементи на деформованій заготовці із сіткою з розміром елементів 0.8 мм, а на рис. 5.44, б наведено графіки залежності напружень від часу для цих двох елементів.

Як видно з графіків (рис. 5.43, б), елементи на крилах при великій сітці на другому і третьому кроках схильні до більшого ступеня деформації при максимальному значенні напружень у 160 МПа, які залишаються незмінними до закінчення розрахунку.



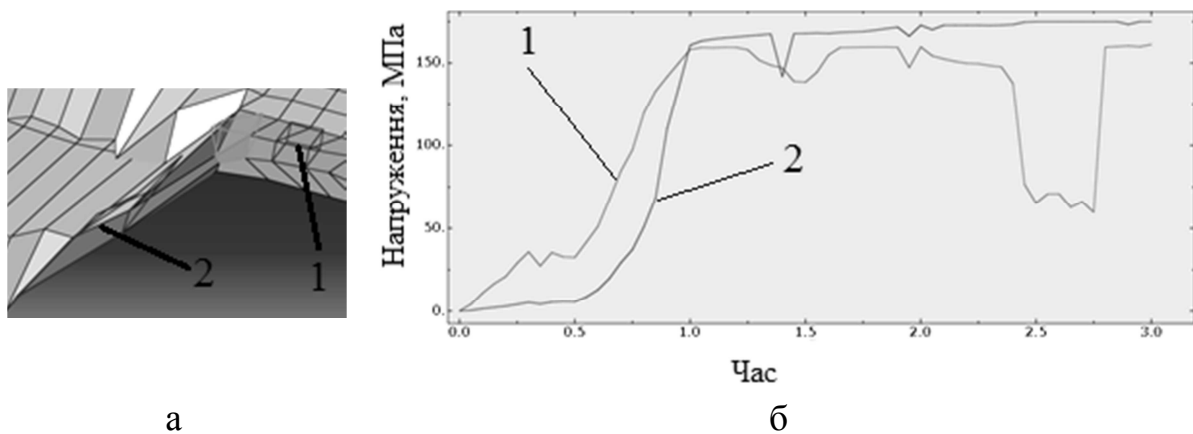


Рисунок 5.43 – Вибрані два елементи на деформованій заготовці із сіткою 1.5 мм і графік навантажень для цих двох елементів

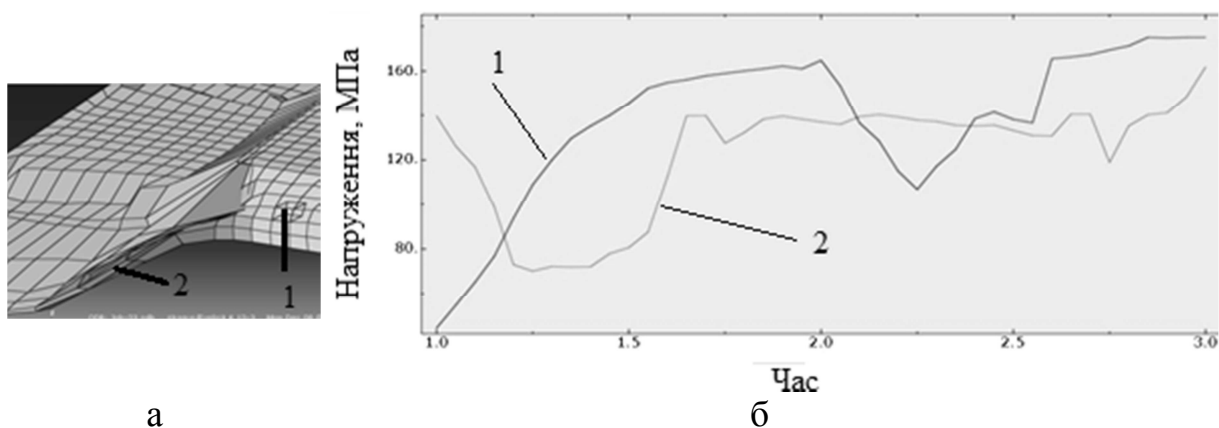
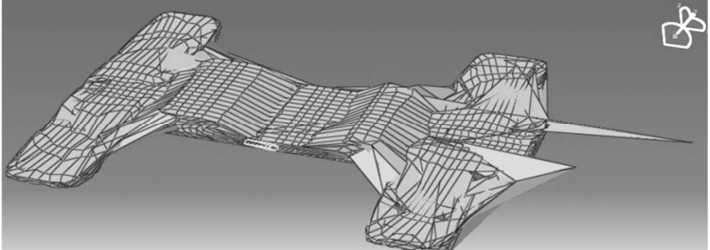
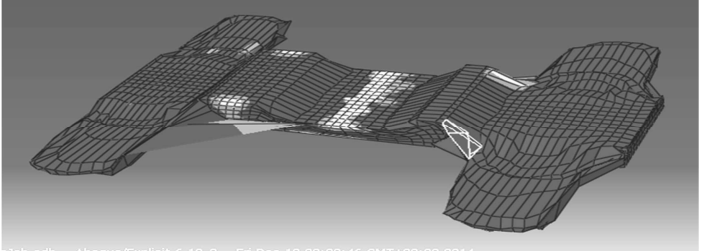
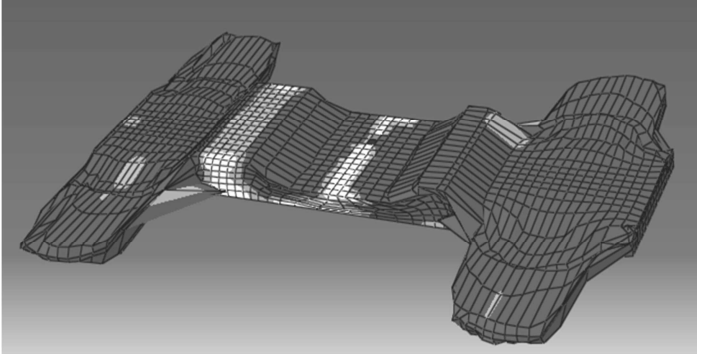
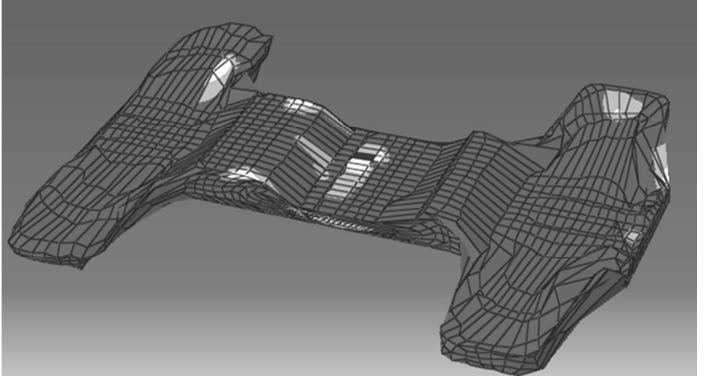


Рисунок 5.44 – Вибрані два елементи на деформованій заготовці із сіткою 0.8 мм і графік навантажень для цих елементів

На другому ж розрахунку видно більш стрибкоподібну зміну значення напруження, яке також досягло максимального значення в 160 МПа, при цьому присутні зони зменшення його і зростання. Елементи на зубцях (які схильні до меншого ступеня еформації) показують таке саме співвідношення поведінки напружень: при великій сітці напруження постійне практично на всьому етапі деформування, при більш дрібній сітці напруження змінюються стрибкоподібно. Максимальне значення напруження 155 МПа. Через таку поведінку елементів сітки при великому розмірі точність розрахунків не задовольняє поставленому завданню.

Для визначення необхідного об'єму заготовки був виконаний ряд розрахунків з різними розмірами заготовки. Результати розрахунків дозволили визначити оптимальний об'єм і розміри початкової заготовки (рис. 5.45). Розподіл напружень уздовж поковки є рівномірним, що дозволяє отримати достатню рівномірність властивостей заготовки і відсутність дефектів у місцях переходу з основної частини пластини в «крила».

Як бачимо з рис. 5.46, для отримання деталі «U-імплантат» методом пластичного деформування найбільше підходить заготовка з такими геометричними параметрами: довжина – 43.75 мм, висота – 4 мм, об'єм заготовки – 2275 мм<sup>3</sup>.

Геометрія заготовки	Вигляд поковки після деформування
Заготовка з довжиною 39 мм, заввишки 5 мм і об'ємом 2535 мм <sup>3</sup>	
Заготовка з довжиною 43.33 мм, заввишки 5 мм і об'ємом 2535 мм <sup>3</sup>	
Заготовка з довжиною 48.75 мм, заввишки 4 мм і об'ємом 2535 мм <sup>3</sup>	
Заготовка з довжиною 37 мм, заввишки 5 мм і об'ємом 2405 мм <sup>3</sup>	

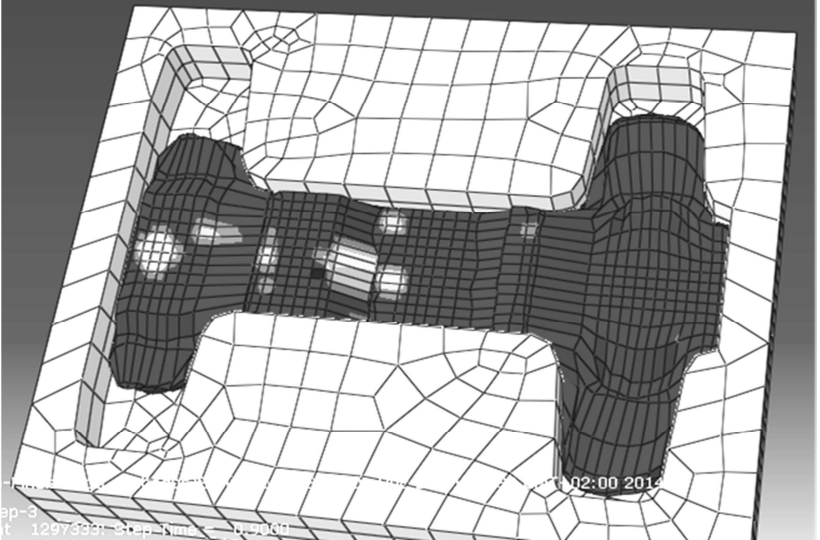
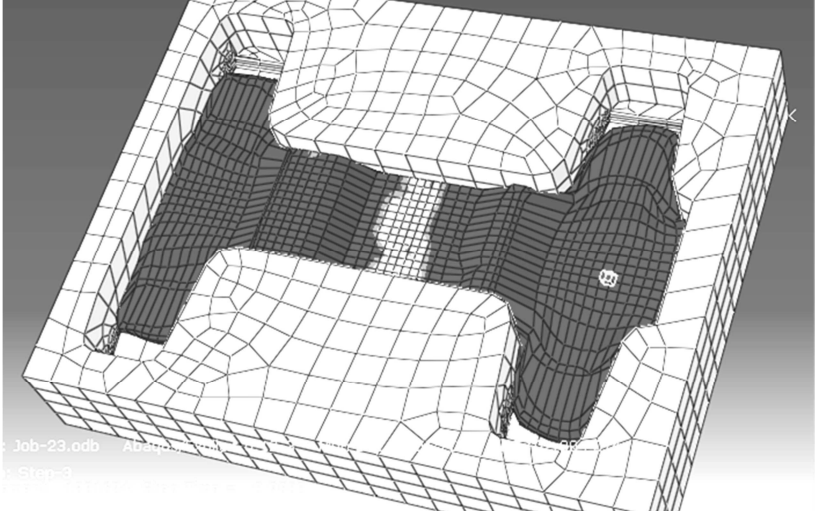
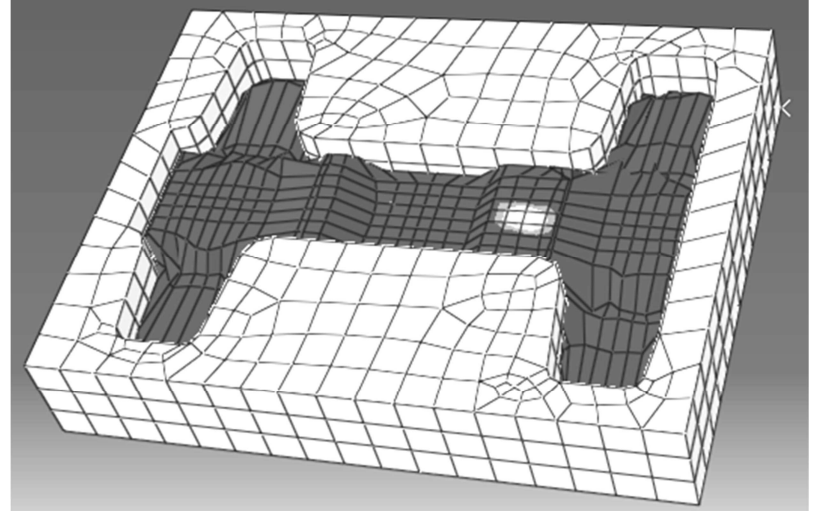
*Рисунок 5.45 – Результат моделювання пластичного деформування заготовки деталі «U-імплантат»*

Інші ж результати моделювання деформування заготовки не є прийнятними, оскільки не забезпечують її якість. Такі заготовки мають неправильну форму, надлишок або нестачу металу. Вибраний результат моделювання є найбільш прийнятним.

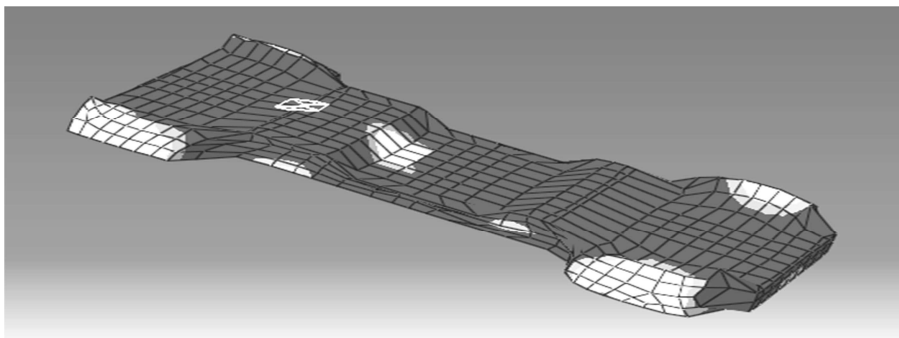
Другий етап моделювання пластичного деформування заготовки, яке видало прийнятний результат, наведено на рис. 5.47.

На рис. 5.48–5.51 наведено результати моделювання деталі «U-імплантат» з різними типами сіток.

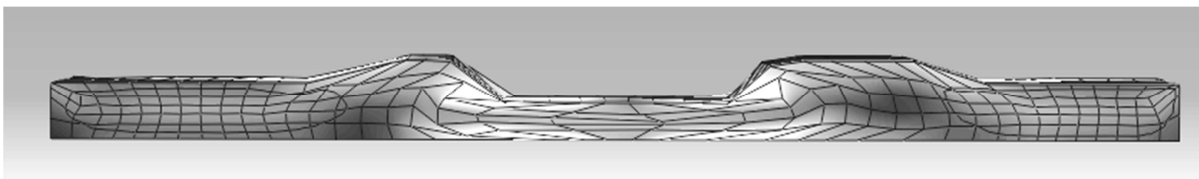
Рівномірна сітка з розміром елементів 0.8 мм має сильні спотворення в центральній частині заготовки й рівномірну сітку в бічних частинах.

<p>Результат моделювання штампування заготовки з довжиною 41.11 мм, заввишки 4.5 мм і об'ємом 2405 мм<sup>3</sup></p>	
<p>Результат моделювання штампування заготовки з довжиною 41.29 мм, заввишки 4 мм і об'ємом 2145 мм<sup>3</sup></p>	
<p>Результат моделювання штампування заготовки з довжиною 43.75 мм, заввишки 4 мм і об'ємом 2275 мм<sup>3</sup></p>	

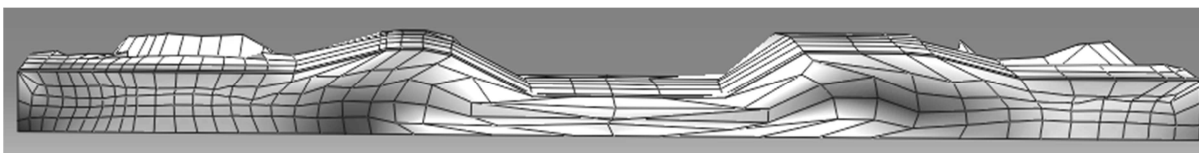
*Рисунок 5.46 – Результати моделювання пластичного деформування заготовки деталі «U-імплантат» з різними розмірами*



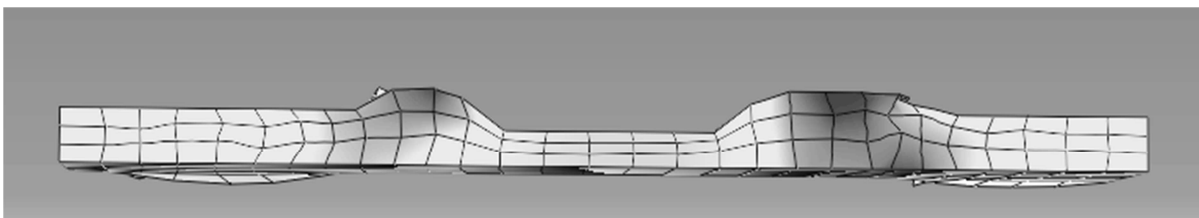
*Рисунок 5.47 – Другий етап моделювання пластичного деформування заготовки з оптимальним об'ємом*



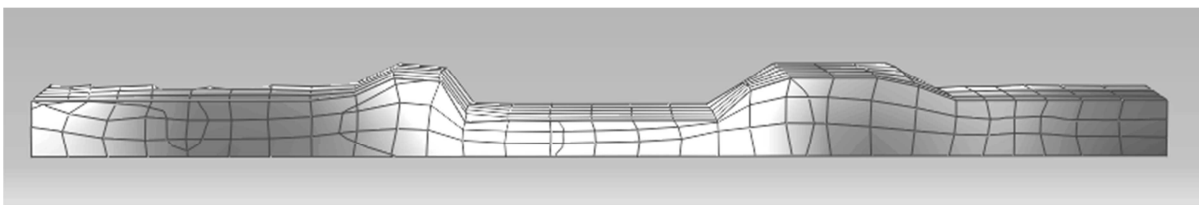
*Рисунок 5.48 – Результат моделювання з рівномірною сіткою, розмір елементів 0.8 мм*



*Рисунок 5.49 – Результат моделювання з нерівномірною сіткою, розмір елементів від 0.5 до 2 мм*



*Рисунок 5.50 – Результат моделювання з адаптивною сіткою, розмір елементів 1.5 мм*



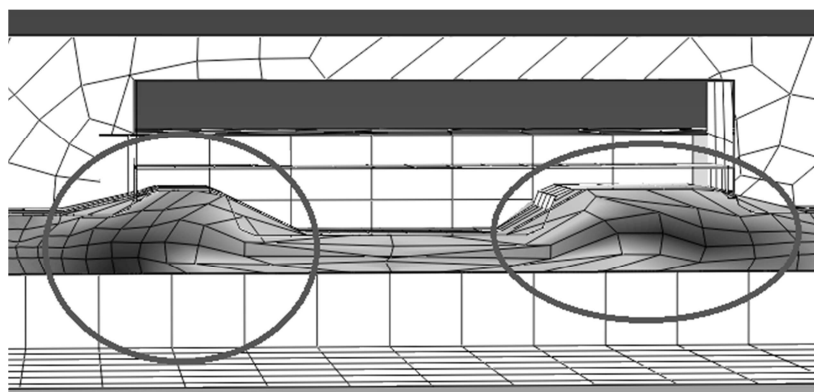
*Рисунок 5.51 – Результат моделювання з адаптивною сіткою, розмір елементів 1.5 мм*

Нерівномірна сітка з розмірами елементів від 0.5 до 2 мм має також спотворення елементів у центральній частині заготовки.

Адаптивна сітка з використанням ALE-вирішувача дозволяє отримати якісну сітку для першої і другої операцій штампування. При моделюванні третьої операції адаптивна сітка не використовувалась.

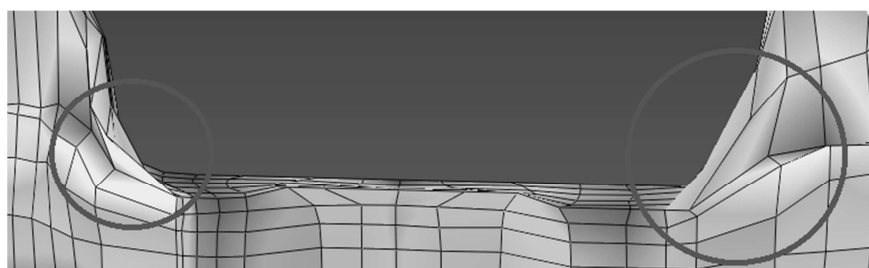
У результаті виконаного моделювання деталі «U-імплантат» з різними розмірами елементів і типами сітки виявлено критичні області заготовки, які вимагають детального проектування і аналізу:

- області для формування зубців (рис. 5.52);



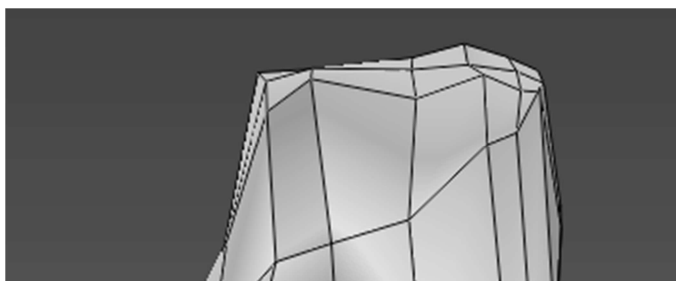
*Рисунок 5.52 – Области для формування зубців*

- області переходу в крила (рис. 5.53);



*Рисунок 5.53 – Области переходу в крила*

- край крила (рис. 5.54).



*Рисунок 5.54 – Край крила*

Значення накопиченого ступеня деформації під час деформування крила досягає 8, що підтверджує створення субмікроструктурної структури в матеріалі імплантату.

## **5.3 Розроблення САПР для проектування технологічного процесу механічного оброблення виробу на основі інтеграції з PowerMILL**

### **5.3.1 Загальні відомості про підхід до створення САПР для технологічного процесу оброблення виробу**

Для того щоб створити САПР для процесу формування технологічного процесу оброблення міжхребцевого імплантату, необхідно виділити основні дії, виконувані технологом. Для цього необхідно побудувати типовий технологічний процес у САМ-системі, а потім у САПР реалізувати інтерфейс, необхідний для розроблення цього процесу.

### **5.3.2 Створення технологічного процесу механічного оброблення виробу**

Формування елементів технологічного процесу оброблення деталі містить у собі ряд взаємозалежних пунктів.

Перш за все, необхідно завантажити деталь і заготовку, створити для них єдину систему координат і простежити за сумісністю цієї системи координат з верстатом. Вважається, що осі X і Y знаходяться в площині деталі, а Z розташована вертикально.

Другий етап – створення інструменту. Іноді ця робота потребує до себе особливої уваги й інструмент необхідно створювати, виходячи з конкретного випадку, а іноді просто вибрати його з бази заздалегідь створених інструментів. У разі створення міжхребцевого імплантату необхідно створити особливий інструмент, конічну сферичну фрезу з кутом кромки в 15 градусів, радіусом кромки в 0.1 мм і малим діаметром (рис. 5.55).

Третій етап потребує створення траєкторій так, щоб при закріпленні деталі на станині можна було варіювати їх положення і вони не перетиналися з елементами кріплення. У процесі виконання цього пункту було побудовано три траєкторії для оброблення задньої і дев'ять траєкторій – для передньої частини. При цьому траєкторії можуть знаходитися не в одній системі координат. Наприклад, для оброблення зубців необхідно було створити систему координат, яка знаходилася під кутом у 15 градусів відносно глобальної (рис. 5.56).

Окрім створення систем координат, необхідно вирішувати питання створення меж оброблення, оскільки не завжди оброблення поверхонь вистачало для успішного результату (рис. 5.57).

Четвертий етап – візуальна перевірка й створення так званого NC-файлу, який і є продуктом роботи САМ-системи. При створенні NC-файлів необхідно розуміти, як саме буде проходити процес оброблення, оскільки необхідно вказати послідовність запису траєкторій.

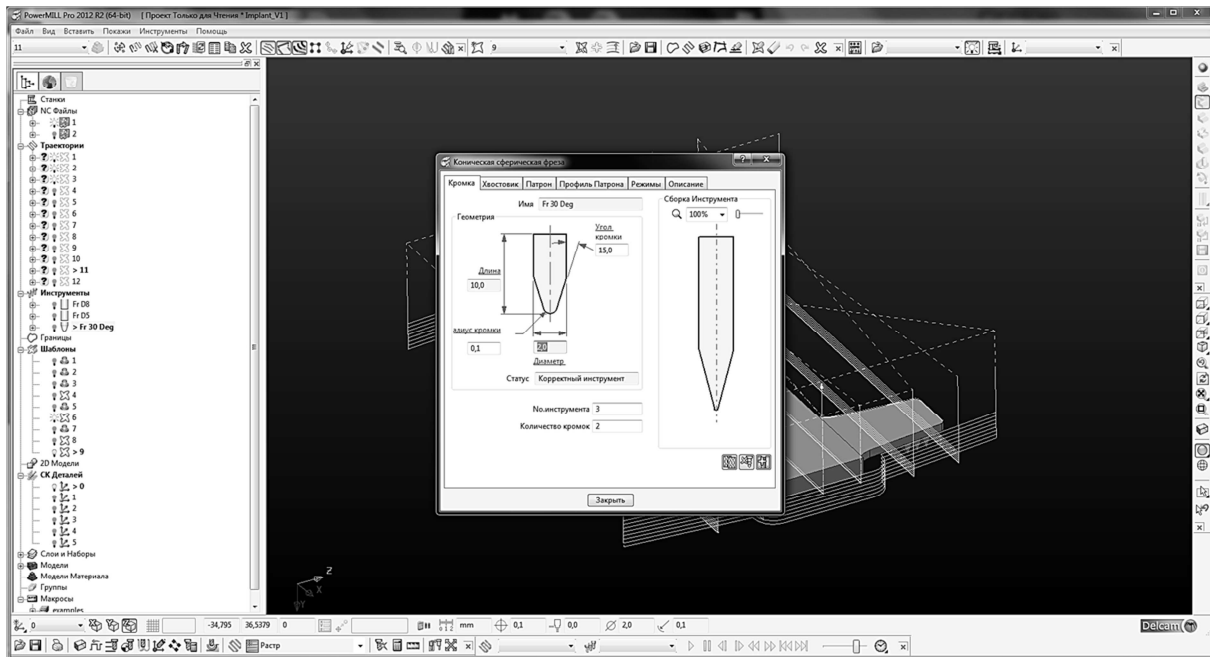


Рисунок 5.55 – Процес створення інструменту

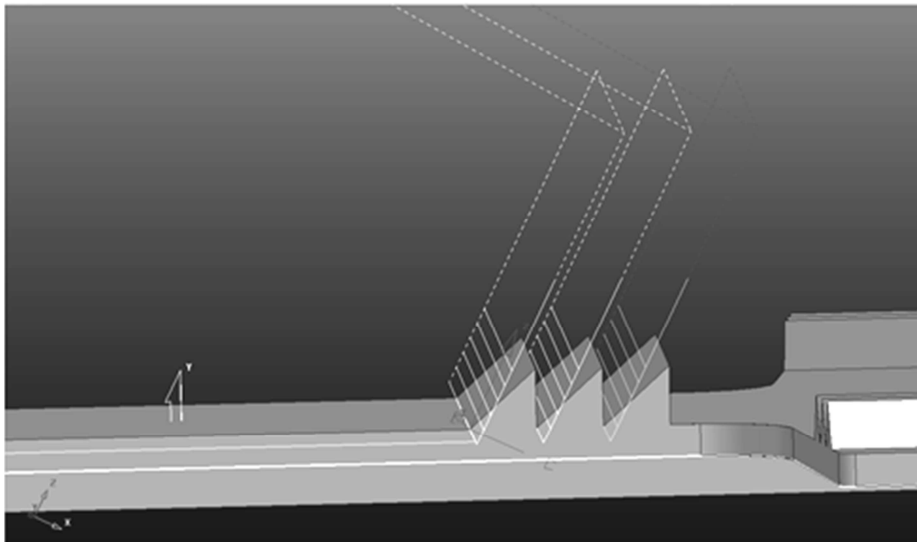
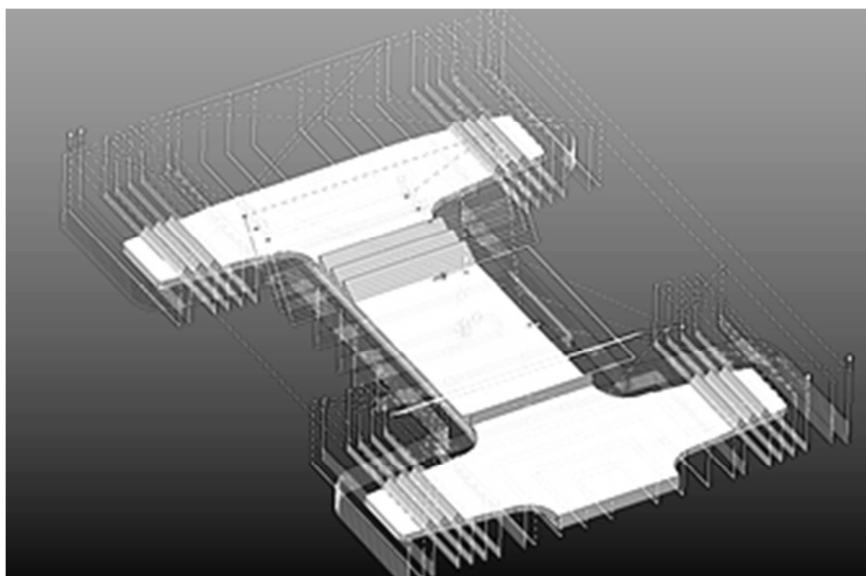


Рисунок 5.56 – Процес оброблення зубців імплантату



Рисунок 5.57 – Змінення меж оброблюваної області

У результаті виконання цієї роботи були побудовані всього два файли NC для оброблення передньої і задньої частин деталі. Як було описано вище, задня частина обробляється по трьом траєкторіям, а передня – по дев'яти. На рис. 5.58 показано візуалізацію відразу всіх траєкторій оброблення деталі.



*Рисунок 5.58 – Візуалізація траєкторій оброблення деталі*

### **5.3.3 Опис процесу реалізації програмного продукту**

На основі аналізу можливих варіантів інтеграції з PowerMILL розроблено САПР, яка може звертатися безпосередньо до API-інтерфейсу САМ-системи PowerMILL і далі за допомогою макросів виконувати необхідну роботу з проектування техпроцесу.

Передбачивши можливість інтеграції у свої програмні продукти, компанія Delcam розробила бібліотеку для платформи .Net під назвою PowerSolutionDotNETOle. Ця бібліотека має можливість звертатися до базових елементів програми PowerMILL і викликати їх. При розробленні проекту програми інтеграції необхідно було налагодити зв'язок програми з бібліотекою й отримати об'єкт класу цієї бібліотеки для подальшої роботи з ним. Під час виконання проектування програми було з'ясовано, що набір команд API PowerMILL схожий з тими командами, які записуються в макрос при його записі. Таким чином, для розроблення цього програмного забезпечення потребувалося істотно менше зусиль, оскільки зникла необхідність враховувати конструкцію запитів до бібліотеки PowerSolutionDotNETOle.

Тому в результаті налагодження зв'язку з бібліотекою і відкриття вікна PowerMILL залишилося лише виконати команду за допомогою методу execute класу PowerSolutionDotNETOle. Як було описано раніше, звернення до API відбувається аналогічними командами, як і в макросах. Тобто можна записати макрос, відкрити його за допомогою редактора макросів, узяти за-



писаний рядок і вставити його в метод execute класу PowerSolutionDotNETOle. Під час виконання цих операцій САПР звертається до ядра PowerMILL і передає йому динамічно створюваний макрос. Для ядра PowerMILL виконання цього рядка так само просте, як і виконання звичайного макросу, який можна вибрати прямо в інтерфейсі PowerMILL.

Інтеграція з САМ-системою PowerMILL реалізована за допомогою dll-бібліотеки PowerSolutionDOTNetOLE. Для виклику функцій PowerMILL, а також діалогових вікон PowerMILL застосовані макроси. Програмний продукт написаний на мові програмування С# [5; 6], яка забезпечила інтеграцію з PowerMILL.

У процесі розроблення САПР для забезпечення інтеграції з САМ-системою PowerMILL були поставлені такі завдання:

- можливість запуску вікна PowerMILL без інтерфейсу самої системи;
- можливість використання інструментів PowerMILL, посилаючись на них за допомогою програмних засобів САПР;
- можливість імпорту проекту в PowerMILL за допомогою САПР;
- можливість додавання інструментів у САПР безпосередньо під час роботи програми.

Черговим завданням для САПР було визначення й створення текстових файлів базових команд для PowerMILL. Для цього необхідно було виконати всі необхідні команди по черзі, записуючи при цьому макрос і привласнювати йому ім'я відповідної команди. На рис. 5.59 показано всі макроси, які були сформовані на початковому етапі проектування САПР. На рис. 5.60 показано приклад макросу.

Запустить_симулятор	07.03.2012 10:54	Текстовый докум...	1 КБ
Подводы_и_отводы	07.03.2012 10:52	Текстовый докум...	1 КБ
Позиционирование_СК_детали_созлас...	07.03.2012 10:37	Текстовый докум...	1 КБ
Редактировать_заготовку	07.03.2012 10:50	Текстовый докум...	1 КБ
Режимы_резанья	07.03.2012 10:51	Текстовый докум...	1 КБ
СК_датели_сверху_выбранных	07.03.2012 10:38	Текстовый докум...	1 КБ
СК_детали_в_центре_выбранных	07.03.2012 10:41	Текстовый докум...	1 КБ
СК_детали_внизу_выбранных	07.03.2012 10:50	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_дисковой_фрезы	07.03.2012 10:20	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_кон_скруг_фрезы	07.03.2012 10:06	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_кон_сфер_фрезы	07.03.2012 10:03	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_концевой_фрезы	07.03.2012 10:56	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_метчика	07.03.2012 10:23	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_несколько_СК	07.03.2012 10:27	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_сверла	07.03.2012 10:13	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_СК_детали_в_точке	07.03.2012 10:25	Текстовый докум...	1 КБ
Создание_СК_детали_по_трем_точкам	07.03.2012 10:31	Текстовый докум...	0 КБ
Создание_фрезы_со_смещ_кромкой	07.03.2012 10:21	Текстовый докум...	1 КБ
Создать_СК_детали_по_нормали_к_объ...	07.03.2012 10:35	Текстовый докум...	1 КБ
Стратегии_разработки	07.03.2012 10:53	Текстовый докум...	1 КБ

Рисунок 5.59 – Набір макросів на початковому етапі проектування САПР

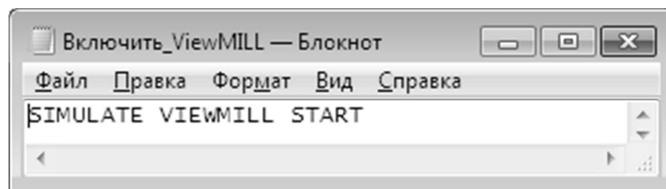


Рисунок 5.60 – Приклад макросу

Після створення макросів САПР повинна була посилатися на директорію, в якій знаходяться всі макроси. САПР отримувала список шляхів до файлів вказаного формату в цій директорії і формувала масив з шляхами до файлів і їхніми назвами (рис. 5.61).

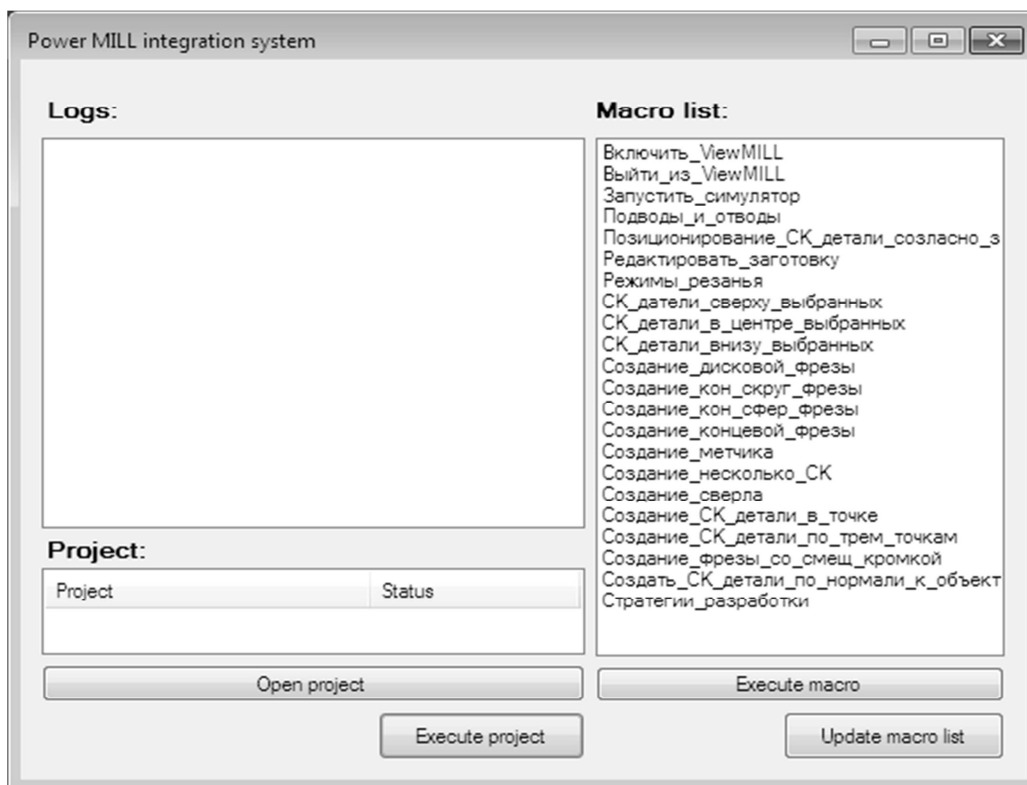


Рисунок 5.61 – Директорія зі списком макросів, які може виконувати програма

Окрім звернення до списку макросів, САПР може динамічно оновлювати цей список, безпосередньо під час своєї роботи. На рис. 5.62 показаний інтерфейс програми із завантаженим тестовим проектом.

На рис. 5.63 показано інтерфейс програми під час створення стратегії оброблення.

Приклад виконання операції 3D-вибірок:

- Імпорт проекту. Цю дію наведено на рис. 5.64.
- Створення інструменту. Ця дія представлена на рис. 5.65.
- Вибір стратегії обробки. Ця дія представлена на рис. 5.66.
- Створення меж для заданої стратегії. Цю дію наведено на рис. 5.67.
- Обчислення траєкторії оброблення. Цю дію наведено на рис. 5.68.

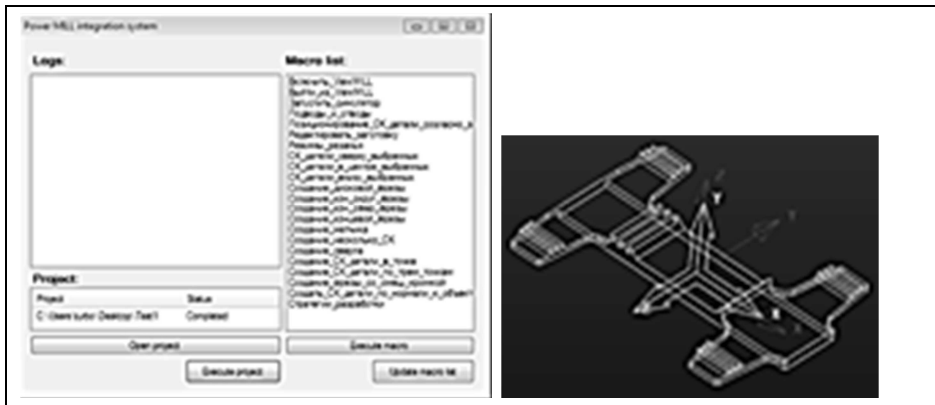


Рисунок 5.62 – Інтерфейс програми із завантаженням тестовим проектом

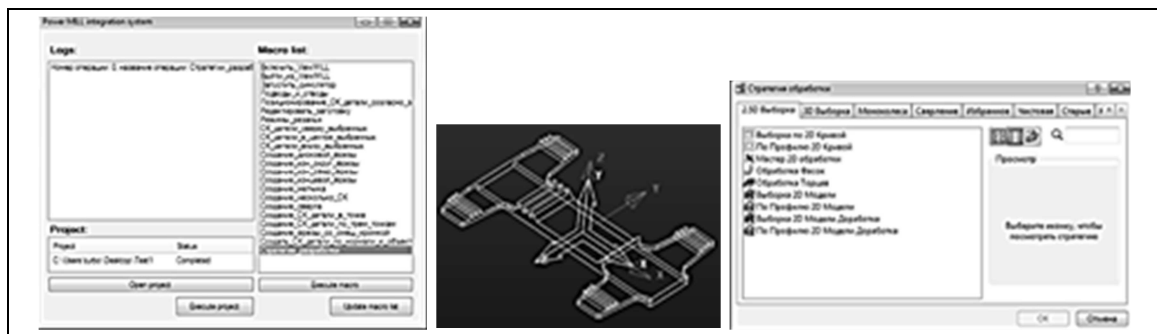


Рисунок 5.63 – Інтерфейс програми під час створення стратегії оброблення



Рисунок 5.64 – Импорт проекта

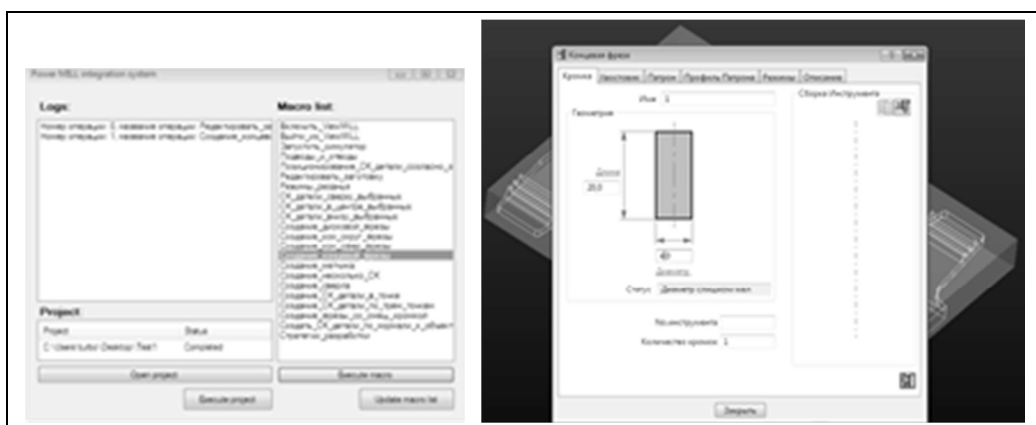


Рисунок 5.65 – Створення інструмента

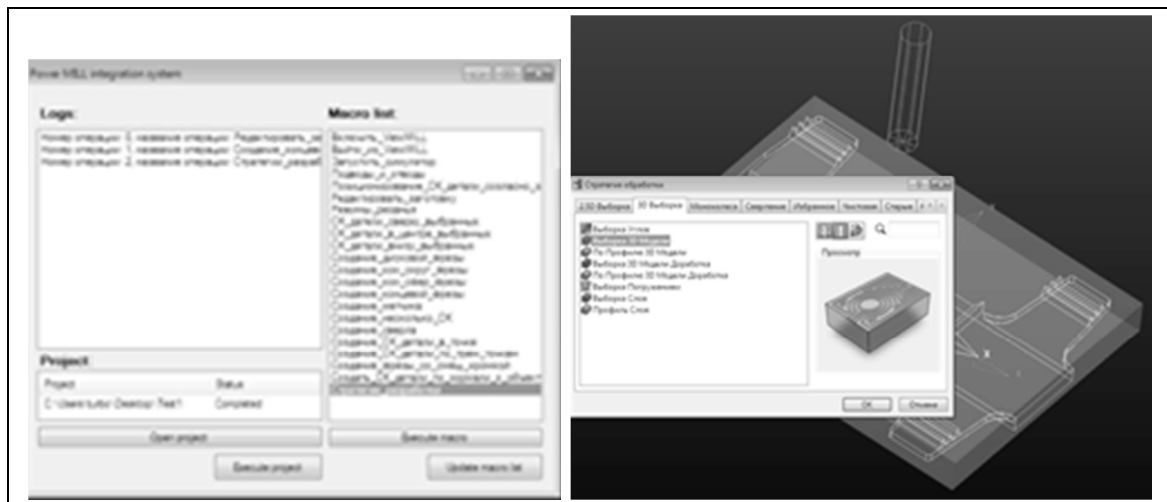


Рисунок 5.66 – Вибір стратегії оброблення

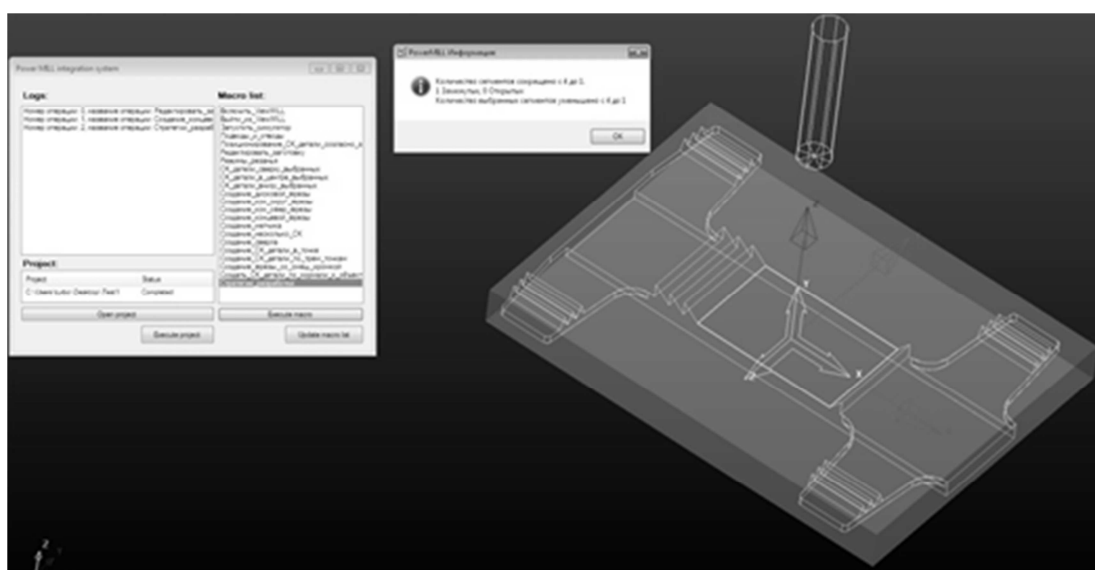


Рисунок 5.67 – Створення меж для заданої стратегії

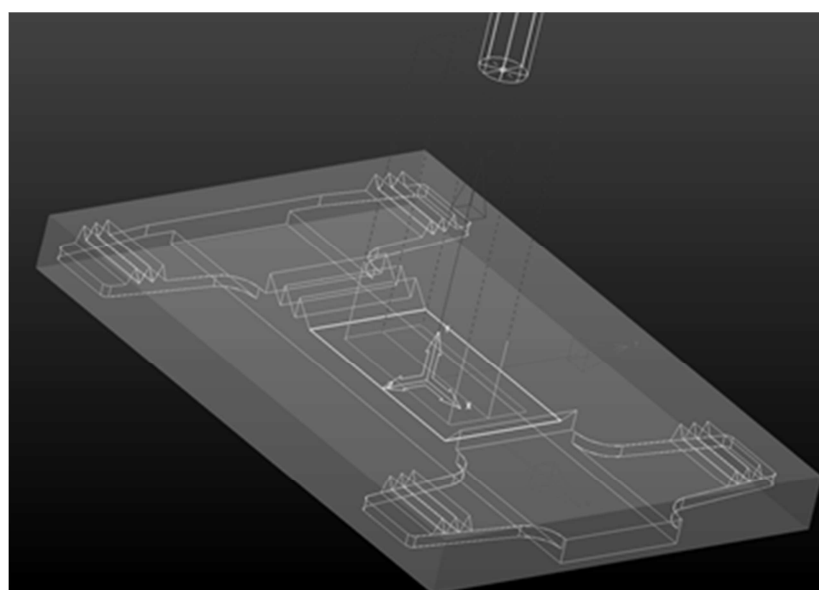


Рисунок 5.68 – Обчислення траєкторії оброблення

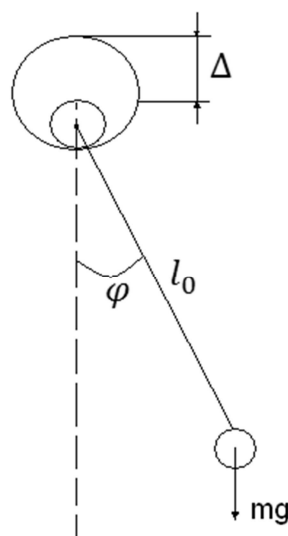
Таким чином, за допомогою програмного забезпечення фірми Delcam розроблено наскрізний технологічний процес отримання заготовки спинного імплантату. У пакеті PowerShape виконано проектування тривимірних моделей штампового оснащення для отримання поковки за три операції деформування. У пакеті ABAQUS SE проведено моделювання процесу отримання заготовки імплантату з технічно чистого титану VT1-0 за три операції деформування. У пакеті PowerMill розроблено технологічний процес отримання розгортки деталі імплантату з отриманої поковки. Розроблено програмне забезпечення САПР для інтеграції пакетів PowerShape і PowerMill.

У результаті створення САПР з'явилася можливість обмежити дії технолога, щоб уникнути помилок при реалізації технологічного процесу від людського чинника.

#### **5.4 Моделювання тертя в рухливих вузлах імплантатів і візуалізація коливального процесу в машині тертя**

Тертя відіграє важливу роль як при реалізації процесів пластичного деформування, так і при експлуатації отримуваних імплантатів. Коефіцієнт тертя визначається на машині тертя, при цьому важливе практичне значення має випадок, коли між опорою і роликом маятника є проміжок. Проміжок з'являється в процесі експлуатації пристрою з цим вузлом тертя і може істотно впливати на контактні тиски у вузлі. При використанні полімерів у вузлах імплантатів не можна перевищувати контактні тиски, оскільки це призводить до необхідності міняти вузол.

У рамках виконуваних досліджень було проведено моделювання машини тертя. Машина спрощено може бути наведена у вигляді маятника (рис. 5.69).



*Рисунок 5.69 – Розрахункова схема маятника*

Тут  $l = l_0 + \Delta(1 - \cos \varphi)$ .

Складемо рівняння Лагранжа 2-го роду [7]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_i, \quad (5.2)$$

де  $Q_i$  – узагальнена сила,

$T$  – кінетична енергія:

$$T = \frac{1}{2} J \omega^2;$$

$$J = ml^2,$$

де  $J$  – момент інерції,

тоді

$$T = \frac{ml^2 \dot{\varphi}^2}{2}; \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi};$$

$$Q = \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi},$$

де  $\Pi$  – потенційна енергія:

$$\Pi = mgl(1 - \cos \varphi).$$

Виразимо рівняння Лагранжа за допомогою введених позначень:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}; \quad (5.3)$$

$$T = \frac{m}{2} (l_0 + \Delta(1 - \cos \varphi))^2 \dot{\varphi}^2;$$

$$\Pi = mg(l_0 + \Delta(1 - \cos \varphi)) (1 - \cos \varphi).$$

Обчислення виконано наближеними методами [8] для таких початкових даних:

$$\omega_0 = 1 \text{ c}^{-1}; \quad g \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{c}^2}; \quad l_0 = 1 \text{ м}; \quad \Delta = 10 \text{ мм}.$$

Результати обчислень внесено до табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати обчислень інтеграла

$\varphi$	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\pi$	$2\pi$
$t$	0.083	0.126	0.171	1.017	2.035

Побудуємо графік підінтегральної функції, для чого обчислимо її значення в деяких характеристичних точках (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Значення в точках

$\varphi$	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$	$2\pi$
$f(\varphi)$	0.156	0.1617	0.169	0.1808	0.2214	0.3125	0.5899	2.2825	0.156

Крива на рис. 5.70 показує міру нерівномірності кутової швидкості для різних відхилень маятника від положення рівноваги. Площа під цією кривою – час руху маятника.

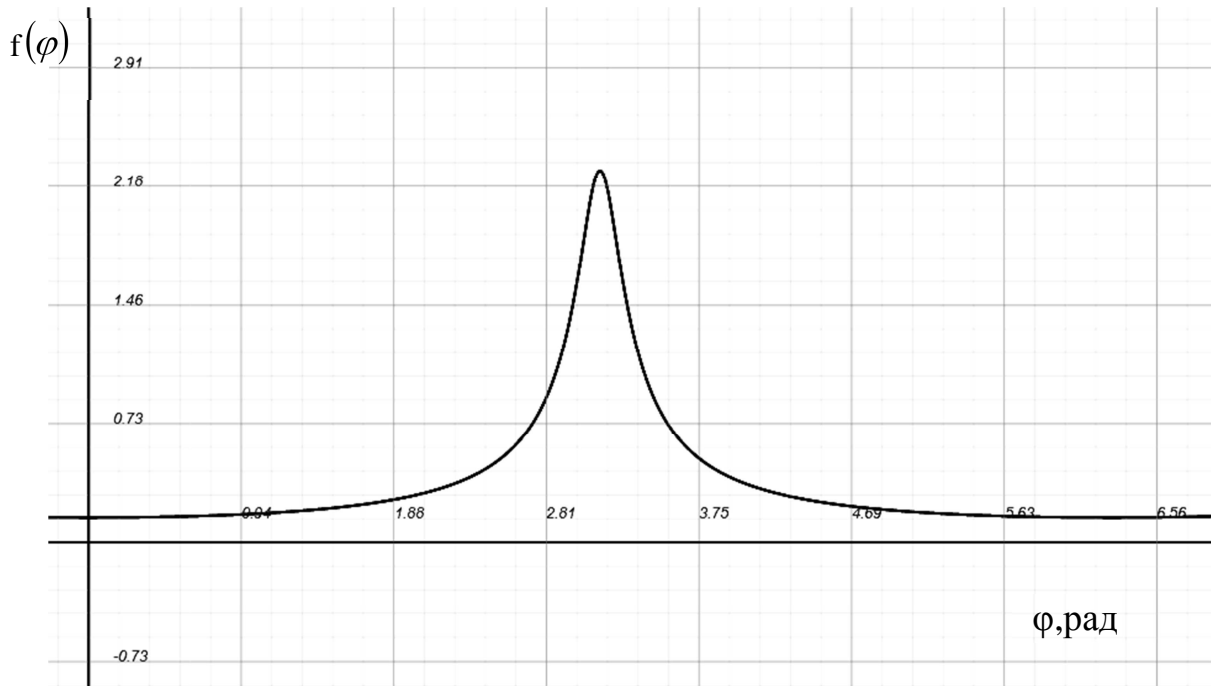


Рисунок 5.70 – Характер зміни підінтегральної функції

Виконано програмну реалізацію програмно-методичного комплексу для моделювання динаміки елементів рухомих вузлів різної геометричної форми, яка включає використання тривимірної геометричної моделі елементів, побудованої в середовищі 3D Max з наступним імпортом в Unity3D і скриптів на мові C# для опису моделі й керування її параметрами. Розроблено методику інтерактивного керування моделлю шляхом використання керівних графічних елементів (на прикладі математичного маятника з проміжком).

Побудована модель маятника реалізована в середовищі Unity3D і дозволяє наочно спостерігати за ходом коливань маятника, здійснювати інтерактивну взаємодію (впливати на параметри моделювання) і наочно отримувати результати моделювання. Можлива зміна розміру планки маятника (pendulum size) і розміру підвісу маятника (ball size) шляхом переміщення повзунків. Під час процесу моделювання на графік виводиться час руху (кожній точці відповідає кут повороту) (рис. 5.71).

Побудову опори моделі за розробленою математичною моделлю проведено в середовищі ABAQUS. Модель є роликотом з титану (ГОСТ 19807-91, табл. 5.6), який розташований у циліндричній канавці опори, виготовлений з хірулену (ISO 5834-2: 2011, табл. 5.7).

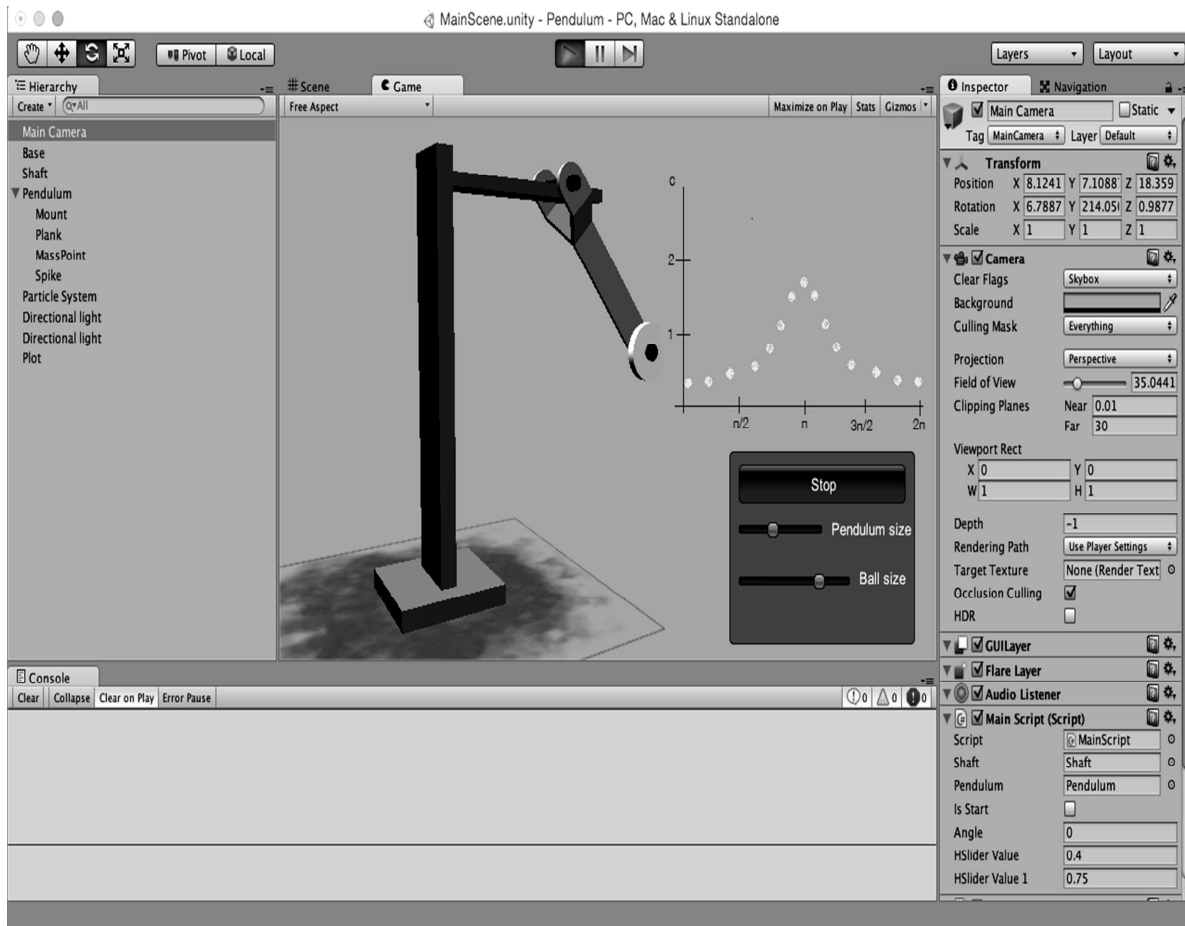


Рисунок 5.71 – Процес імітаційного моделювання в середовищі Unity3D

Таблиця 5.6 – Механічні характеристики титану ГОСТ 19807-91

$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\xi$ , %	$\Delta$ , %	НВ
400...450	300...420	60	30	131...163

Таблиця 5.7 – Механічні характеристики хірулену ISO 5834-2:2011

Властивість	Одиниці вимірювання	Вимоги	Значення
Межа плинності	МПа	21/19 min	21.4
Межа міцності	МПа	35/27 min	42.4
Ударостійкість	kJ/m <sup>2</sup>	NB	NB
Щільність	kJ/m <sup>3</sup>	927-944	929
Зольність	mg/kg	150 max	58

Опора нерухома, ролик пов'язаний з маятником вагою 2.5 кг, який коливається із згасальною амплітудою. Початкове відхилення маятника – 20°. Довжина маятника – 0.3 м. Характер руху: коливальні рухи.

До матеріальної точки маятника прикладена сила тяжіння, яка спрямована вниз. Так само від відхилення маятника до ролика прикладено два крутні моменти з величиною 750 Н\*мм. Коефіцієнт тертя прийняли 0.15.



Треба розрахувати вплив величини проміжку (деформації, що з'являється в опорі за рахунок руху маятника) на характер контактної напруги в опорі. Для розрахунку візьмемо значення радіусів опори, наведених у таблиці 5.8. Радіус ролика з титану прийнятий 5,0 мм.

Таблиця 5.8 – Значення радіусів опори з хірулену

Номер розрахунку	1	2	3	4
Радіус охопленої деталі, мм	5,0	5,01	5,1	5,2

Виконаємо побудову моделі опори маятника в середовищі Abaqus (рис. 5.72).

Ця модель містить 8936 вузлів і 7435 скінченних елементів. Навантаженням виступає складова сили тяжіння від маятника. Розрахунок ведеться для періоду часу, за який маятник проходить від положення максимального відхилення до нижнього положення.

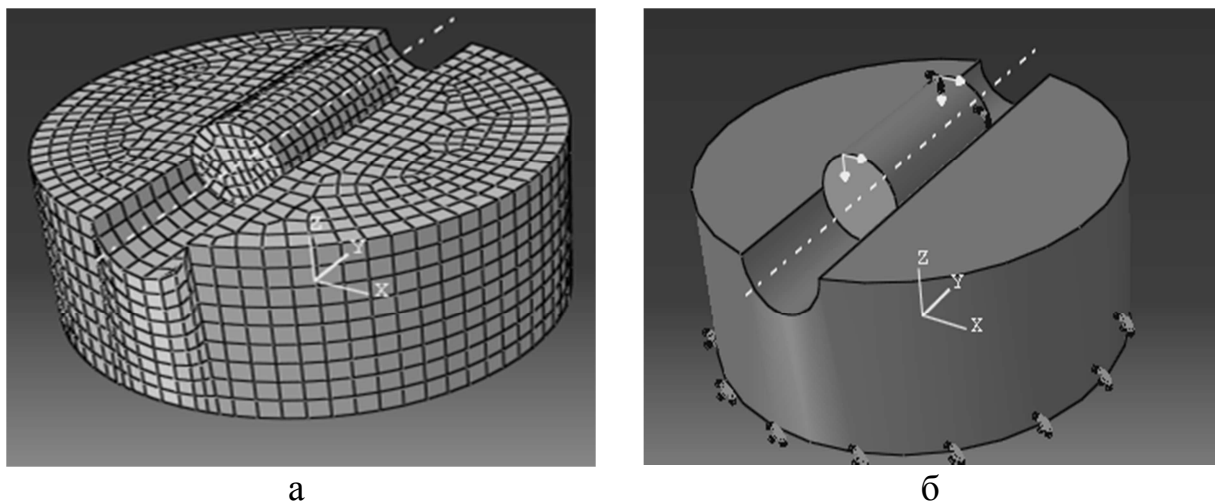


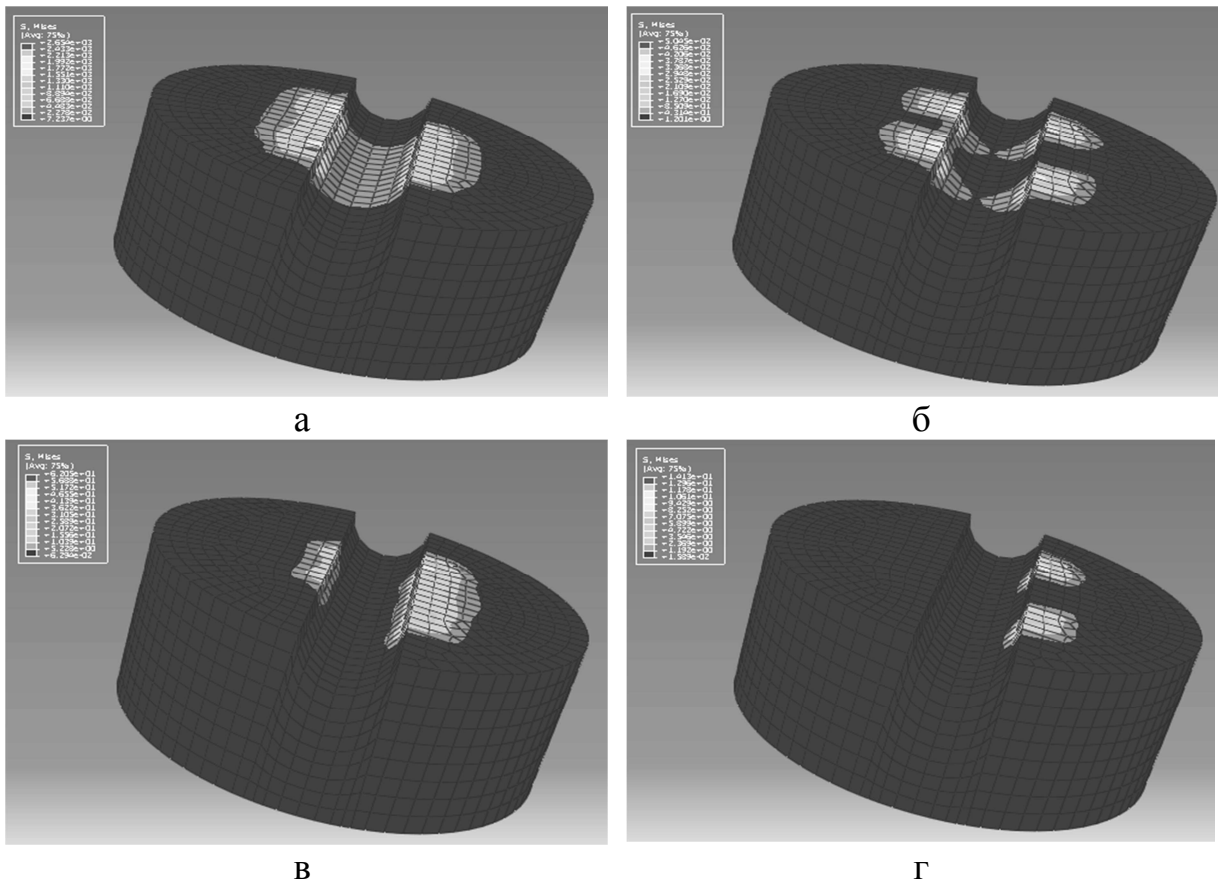
Рисунок 5.72 – Модель опори маятника з роликом в середовищі Abaqus у режимі скінченно-різницевої сітки (а) і із закріпленням (б)

В результаті моделювання були отримані значення еквівалентного напруження за Мізесом (рис. 5.73). Розрахунки були проведені послідовно зі збільшенням зазору.

Досліджували вплив геометричних параметрів елементів маятника на показники динаміки при таких початкових даних:

$$\omega_0^2 = 41 \text{ с}^{-2}; \Delta = 0.01 \text{ мм (0.0001 м)}; l = 300 \text{ мм (0.3 м)}; g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Розраховували значення фазової траєкторії маятника для  $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$  (табл. 5.9).



*a* –  $r=5$  мм; *б* –  $r=5,01$  мм; *в* –  $r=5$  мм; *г* –  $r=5$  мм

Рисунок 5.73 – Модель з різними радіусами  $r$  охопленої деталі

Таблиця 5.9 – Значення параметрів фазової траєкторії маятника

$\varphi$	$\omega^2$	$\omega$	$\varphi$	$\omega^2$	$\omega$	$\varphi$	$\omega^2$	$\omega$
0	41	6.4	150°	-83.37	9.13i	300°	7.65	2.76
30°	32.06	5.66	180°	-92.29	9.60i	330°	32.06	5.66
60°	7.65	2.76	210°	-83.37	9.13i	360°	41	6.4
90°	-25.67	5.06i	240°	-58.99	7.68i			
120°	-58.99	7.68i	270°	-25.67	5.06i			

З розрахованих значень видно, що для  $(0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ)$  і для  $(300^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ)$  маємо реальні коливання маятника (можливе відображення коливань у реальній площині), інші ж діапазони кута  $\varphi$  знаходяться в уявній площині (у природі не існують). Побудуємо графік фазової траєкторії маятника в полярних координатах (рис. 5.74).

Розрахуємо значення часу руху маятника для  $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$  (табл. 5.10).

З розрахунку видно, що значення часу коливання для діапазону  $0 \leq \varphi \leq \pi$  дорівнюють значенням для  $2\pi \geq \varphi \geq \pi$ . Екстремум функції знаходиться в точці  $\pi$ . Побудуємо графік часу руху маятника (рис. 5.75).

Для визначення залежності впливу величини проміжку на значення фазової траєкторії маятника зафіксуємо значення  $\varphi = 20^\circ$  і  $l = 0.3$  м і складемо таблицю розрахованих значень (табл. 5.11).

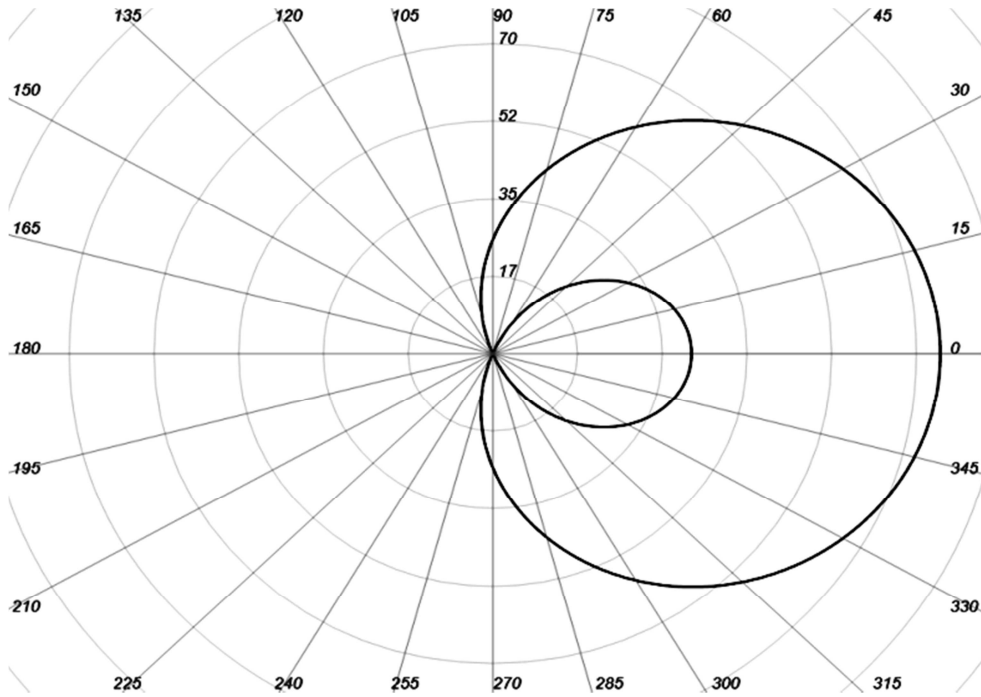


Рисунок 5.74 – Фазова траєкторія маятника у полярних координатах

Таблиця 5.10 – Значення часу руху маятника

$\varphi$	$f(\varphi)$	$\varphi$	$f(\varphi)$	$\varphi$	$f(\varphi)$
0	0.156	$5\pi/6$	0.657	$5\pi/3$	0.361
$\pi/6$	0.177	$\pi$	1,187	$11\pi/6$	0.177
$\pi/3$	0.361	$7\pi/6$	0.657	$2\pi$	0.156
$\pi/2$	0.452	$4\pi/3$	0.534		
$2\pi/3$	0.534	$3\pi/2$	0.452		

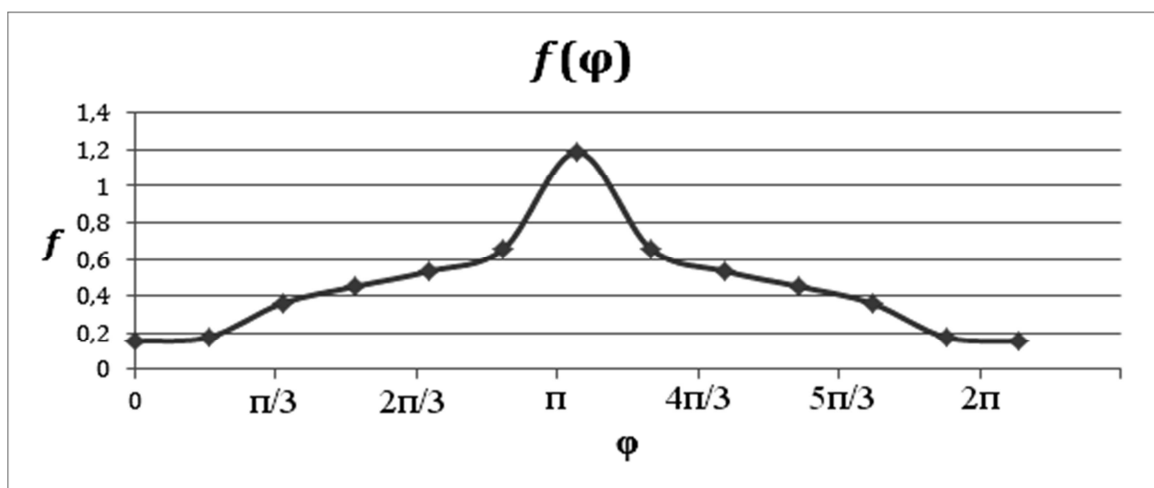


Рисунок 5.75 – Крива часу руху маятника

Таблиця 5.11 – Значення фазової траєкторії маятника при зміні величини проміжку

$\Delta$ , мм	0.000001	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1
$\omega^2$	36.9795	36.979	36.978	36.964	36.823	35.459

Побудуємо графік залежності фазової траєкторії від величини проміжку (рис. 5.76).

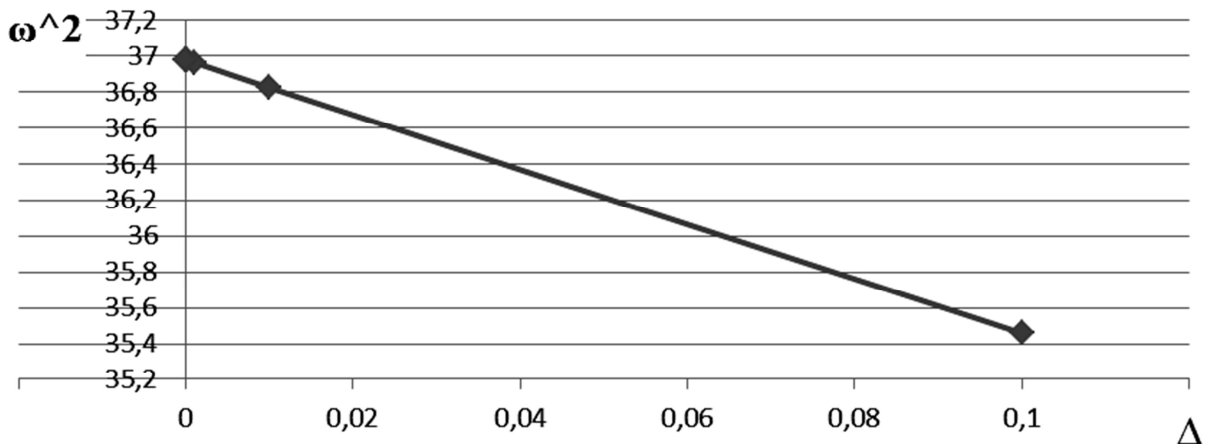


Рисунок 5.76 – Залежність фазової траєкторії від величини проміжку

З графіку залежності фазової траєкторії від величини проміжку видно, що при збільшенні величини проміжку прямо пропорційно збільшується значення фазової траєкторії маятника.

Для визначення впливу величини довжини планки маятника на значення фазової траєкторії маятника зафіксуємо значення  $\varphi = 20^\circ$  і  $\Delta = 0.0001$  м і складемо таблицю розрахованих значень (табл. 5.12).

Таблиця 5.12 – Значення фазової траєкторії при зміні довжини планки маятника

$l$ , м	0.03	0.04	0.05	0.1	0.3	1	3	30
$\omega^2$	0.787	10.838	16.87	28.934	39.793	36.978	40.598	40.96

З таблиці залежності фазової траєкторії від довжини планки маятника видно, що при збільшенні довжини планки маятника до 1 м відбувається різке збільшення значення фазової траєкторії, а на інтервалі від 3 до 30 м значення фазової траєкторії практично незмінне. Для визначення залежності впливу величини проміжку на значення часу руху маятника зафіксуємо значення  $\varphi = 20^\circ$  і  $l = 0.3$  м і складемо таблицю розрахованих значень (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 – Значення часу руху маятника при зміні величини проміжку

$\Delta$ , мм	0,01	0,03	0,05	0,08	0,1
$f$	0.165	0,1655	0.166	0.167	0.168

Побудуємо графік залежності часу руху маятника від величини проміжку (рис. 5.77).

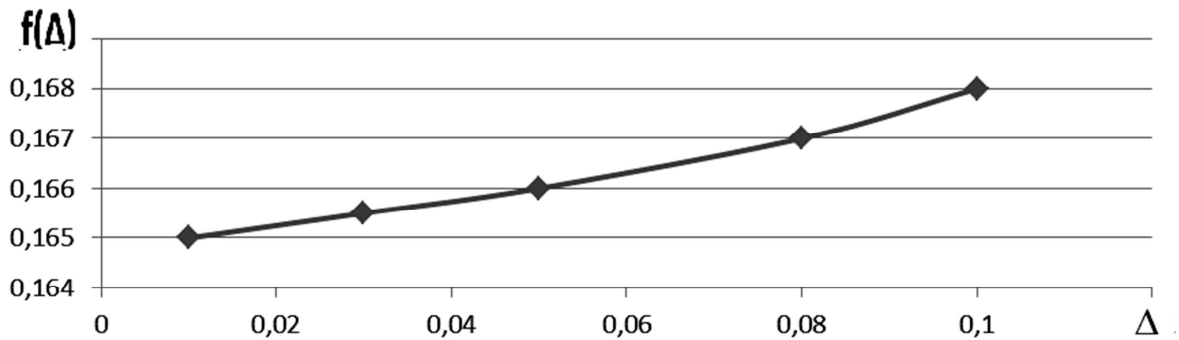


Рисунок 5.77 – Залежність часу руху маятника від величини проміжку

З графіку залежності часу руху маятника від величини проміжку видно, що при збільшенні величини проміжку відбувається експоненціально збільшення часу руху маятника.

Для визначення залежності впливу величини довжини планки на значення часу руху маятника зафіксуємо значення  $\varphi = 20^\circ$  і  $\Delta = 0.0001$  м і складемо таблицю розрахованих значень (табл. 5.14).

Таблиця 5.14 – Значення часу руху маятника при зміні величини довжини планки

l, мм	0.05	0.1	0.3	1	5	10
f	0.243	0.186	0.164	0.159	0.157	0.156

Із залежності часу руху маятника від довжини планки видно, що при незначному збільшенні довжини планки (до 1 м) відбувається експоненціальне зменшення часу руху маятника. Збільшення довжини планки маятника понад 1 м не впливає на зміну часу руху маятника.

Аналіз впливу геометричних параметрів маятника на показники динаміки коливального процесу показав:

- при збільшенні величини зазору прямо пропорційно збільшується значення фазової траєкторії маятника;

- при збільшенні довжини планки маятника до 1 м відбувається різке збільшення значення фазової траєкторії, а на інтервалі від 3 м і вище значення фазової траєкторії практично незмінне;

- при збільшенні величини проміжку відбувається експоненційне збільшення часу руху маятника;

- при збільшенні довжини планки до 1 м відбувається експоненційне зменшення часу руху маятника. Збільшення довжини планки маятника вище 1 м не впливає на зміну часу руху маятника.

Моделювання в САЕ-системі Abaqus показало, що при збільшенні проміжку верхні частини опори перестають працювати, а максимум напружень близький до торцевих країв ролика. Величина радіусу ролика прямо пропорційно впливає на зміну положення точок максимальних напружень від центру до країв ролика.

## 5.5 Застосування шаблону «Адаптер» для інтеграції програмних продуктів у комплексну САПР

Окрім об'єднання різних програмних компонентів в єдину інтегровану систему, необхідно розглянути також питання одночасного застосування програм однакового призначення. Наприклад, у процесі розроблення проектів на підприємствах використовують декілька САД- систем. Для їх спільного використання необхідно реалізувати в структурі ІСАПР ці можливості з урахуванням виконуваної роботи. Під час аналізу процесу інтеграції в комплексну САПР різних САД-систем були виділені такі прецеденти: вибір і завантаження САД-системи; пошук, попередній перегляд і відкриття проекту; запис або розгляд звіту про роботу; виведення інформації на екран або друк.

Конструктор вибирає САД-систему для кожного документа зі списку доступних систем. Для того щоб конструктор міг проглянути проект без використання САД-системи, йому необхідно вказати проект для перегляду. Якщо шлях до проекту коректний, виконується його попередній перегляд. Після цього, щоб відкрити проект, необхідно вказати шлях до відповідної САД-системи. У результаті успішного виконання цього прецеденту проект відкривається в САД-системі, у якій він був розроблений. Призначення класів цієї предметної області описане в табл. 5.15.

Таблиця 5.15 – Відповідальність класів, що забезпечують інтеграцію САД-систем

Клас	Роль класу
Система САПР	Основний клас, який забезпечує процес інтеграції різних САД-систем
Конструктор	Клас, який містить інформацію про користувача САПР
Проект	Клас, який містить інформацію про відкритий проект
Адаптер1, Адаптер2 та ін.	Класи, які забезпечують коректність використання інтерфейсів АРІ, що надаються САД-системою
АРІ (САД1, САД2 та ін.)	Інтерфейси, які містять методи конкретної САД - системи
Реєстратор	Клас, який формує інформацію про виконувані операції
Звіт про роботу	Клас, який містить інформацію про усі виконувані дії

Для вирішення цих завдань може бути використаний шаблон «Адаптер», що наведено на діаграмі класів (рис. 5.78) інтеграції САД-систем у комплексну САПР.

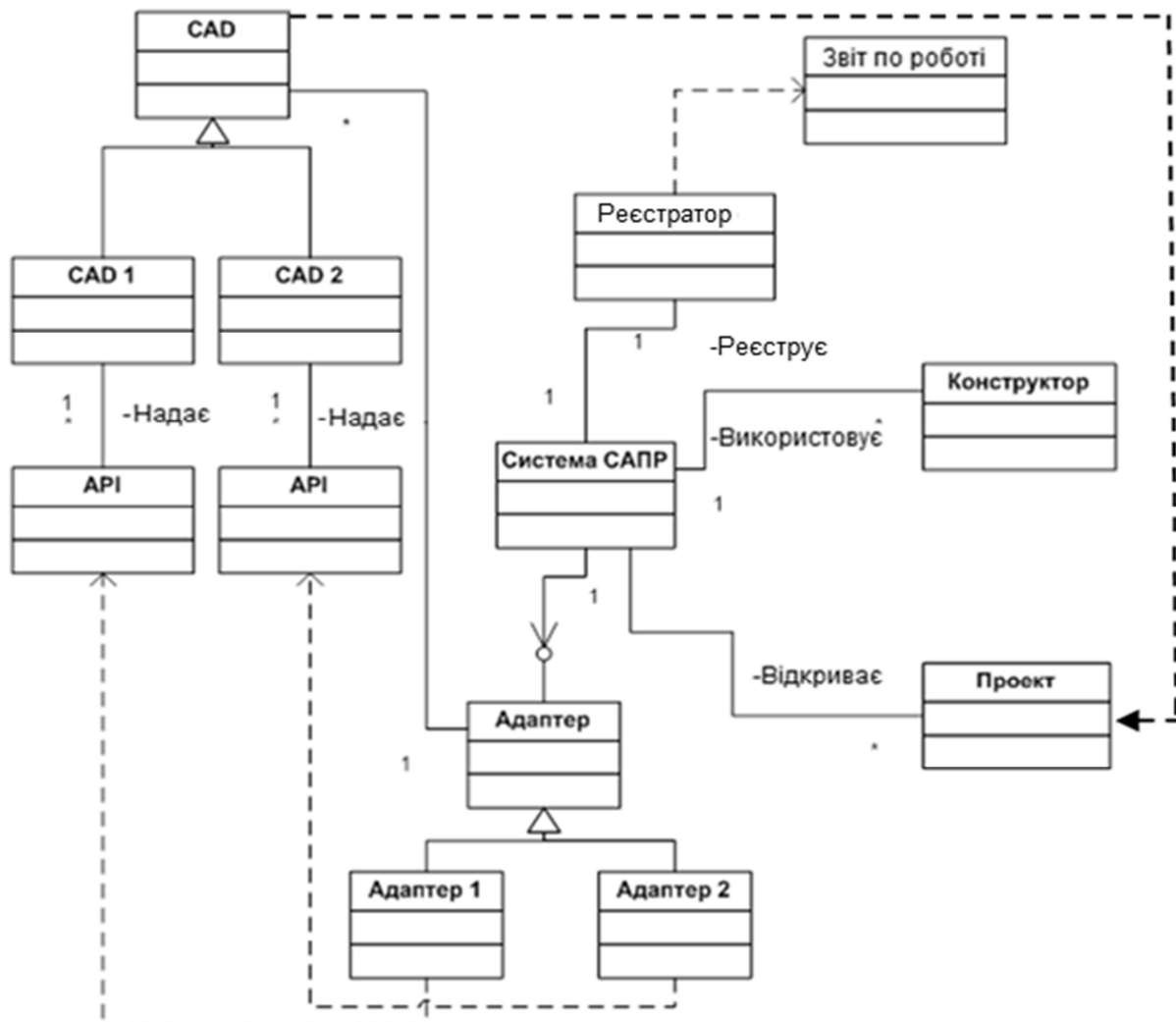


Рисунок 5.78 – Діаграма класів застосування шаблону «Адаптер» для інтеграції різних CAD-систем у комплексну САПР

## 5.6 Синтез конструкцій збірного різального інструменту на основі морфологічного аналізу й синтезу

Ефективність процесу проектування збірного різального інструменту, як і будь-якого технічного об'єкта, багато в чому визначається на етапі пошуку і відбирання ідей. Морфологічний аналіз і синтез є одним з широко вживаних комбінаторних методів оцінювання існуючих і пошуку нових рішень [9]. Основні положення методу наведено в пункті 1.9. Метод досить добре піддається формалізації, що дозволяє використати його при автоматизованому проектуванні [10].

Варіантом використання методу морфологічного синтезу є алгоритми пошуку оптимальних структурних схем технічних рішень по заданим експертом бальним оцінкам даних ознак за допомогою послідовної максимізації на нерівномірній решітці [11]. Вказаний метод морфологічного си-

нтезу відрізняється тим, що максимум знаходиться не на цілочисловій решітці значень ознак, а на решітці з нерівномірним кроком. До того ж вимагається не один раз вирішити завдання максимізації, а послідовно видати всі точки деякого гіперпросторового паралелепіпеда в порядку незбільшення цільової функції – прийнятого інтегрального критерію. Технічні об'єкти визначаються деякою реалізацією альтернатив для усіх ознак, яку надалі називатимемо «функціональним образом»:

$$a_{q_1}^1, a_{q_2}^2, \dots, a_{q_i}^i, \dots, a_{q_n}^n, \quad (5.4)$$

де  $n$  – кількість усіх ознак:  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ ;

$a_{q_i}^i$  – конкретна реалізація  $i$ -ї ознаки ( $a_{q_i}^i \in \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_{m_i}^i\}$ ).

Для кожного рішення (об'єкта типу (5.4)) однозначно визначається ціна – значення критерію якості:

$$K_0(a_{q_1}^1, a_{q_2}^2, \dots, a_{q_n}^n) = \sum_{i=1}^n B^i B_{q_i}^i, \quad (5.5)$$

де  $B^i$  – вагомість  $i$ -ї ознаки якості;

$B_{q_i}^i$  – бальна оцінка реалізації  $a_{q_i}^i$  серед усіх реалізацій для  $i$ -ї ознаки.

Зручним є подання об'єкта як точки  $x_q = (x_{q_1}^1, x_{q_2}^2, x_{q_n}^n)$   $n$ -вимірного Евклідова простору  $R^n$ , де

$$x_{q_i}^i = B^i B_{q_i}^i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5.6)$$

Для кожної точки  $x = (x^1, \dots, x^n)$  простору  $R^n$ , що розглядається, можна визначити її ціну як

$$K_0(x^1, \dots, x^n) = \sum_{i=1}^n x^i. \quad (5.7)$$

Добутки оцінок альтернатив у балах на вагомості відповідних ознак утворюють  $n$  множин чисел:

$$\{x_1^1, x_2^1, \dots, x_{m_1}^1\}, \{x_1^2, x_2^2, \dots, x_{m_2}^2\}, \dots, \{x_1^n, x_2^n, \dots, x_{m_n}^n\}, \quad (5.8)$$

де  $x_i^j \leq x_{i+1}^j$  для всіх  $i$  и  $j$ .

Ці числа можна взяти за основу побудови нерівномірної решітки  $X_0$  – точок  $n$ -вимірного Евклідова простору  $R^n$ :

$$X_0 := \{(x_{q_1}^1, x_{q_2}^2, \dots, x_{q_n}^n) : q_i \in \{1, \dots, m_i\}, i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (5.9)$$



Тоді ціна  $K_0$  буде оператором, тобто функціональним відображенням з  $R^n$ . Оператор  $K_0$  задає для кожної точки значення узагальненого критерію якості – ціну ( $R$  – множина дійсних чисел):

$$K_0(x) := \sum_{i=1}^n x^i. \quad (5.10)$$

Оскільки для аналізу кожного рішення і навіть для попереднього оцінювання можливості такого поєднання альтернатив вимагається деякий час, що витрачається експертом при роботі в «режимі діалогу», то ефективність процедури синтезу, передусім, залежить від правильної видачі варіантів у порядку послідовного зниження їх ціни – узагальненого критерію якості.

Прийmemo, що реалізації альтернатив ознак  $a_{ji}$  розташовані в порядку незменшення їх бальних оцінок, тобто

$$B_1^i \leq B_2^i \leq \dots \leq B_{m_i}^i, i = 1, \dots, n. \quad (5.11)$$

Усі можливі рішення – функціональні образи відповідають точкам, розташованим у паралелепіпеді (при  $n = 3$ ), наведеному на рис. 5.79, а максимум узагальненого критерію якості в точці

$$x_* := (x_{m_1}^1, x_{m_2}^2, \dots, x_{m_n}^n),$$

так що

$$K_0(x_*) = \max_{x \in x_0} K_0(x). \quad (5.12)$$

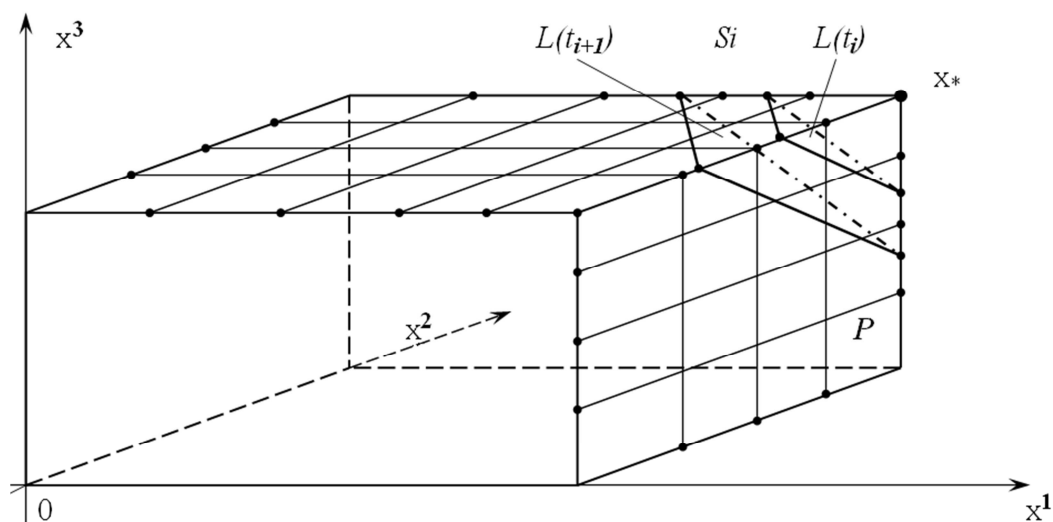


Рисунок 5.79 – Подання множини рішень у просторі трьох ознак

Розглянемо площину

$$L(t) = \{x \in R^n : K_0(x) = t\},$$

де  $0 < t \leq K_0(x_*)$ .

Потрібний алгоритм, який послідовно видаватиме точки  $x$  у порядку незростання значень  $K_0(x)$ :

$$\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_m}, \text{ де } m := \prod_{i=1}^n m_i,$$

так, щоб  $K_0(\overline{x_1}) \geq K_0(\overline{x_2}) \geq \dots \geq K_0(\overline{x_m})$ .

Для вирішення поставленого завдання запропоновано три алгоритми послідовної максимізації лінійного функціонала на нерівномірній решітці  $n$ -вимірної морфологічної таблиці.

Геометрично точки  $\overline{x_k}$  знаходяться на послідовно зрушуваних площинах  $L(t)$  зі значеннями параметра  $t$ , що змінюються від  $t = K_0(x_*)$  до  $t = K_0((x_1^1, x_1^2, x_1^n))$ . Таким чином, для будь-кого  $\overline{x_i}$  і  $\overline{x_j}$  визначені значення  $t_i = K_0(\overline{x_i})$ ,  $t_j = K_0(\overline{x_j})$ , так що  $\overline{x_i} \in L(t_i)$ ,  $\overline{x_j} \in L(t_j)$ .

Першою точкою шуканої послідовності є  $\overline{x_*}$ , так що  $\overline{x_i} \in L(t_i)$ ,  $\overline{x_j} \in L(t_j)$ .

Перший і другий алгоритми ґрунтуються на тому, щоб область – паралелепіпед  $P := \{x \in R^n : x_1^i \leq x_2^i \leq x_{m_i}^i, i = 1, \dots, n\}$ , що включає  $X_0$ , множина, розбита на шари:

$$S_i := \{x \in P : t_{i+1} \leq K_0(x) < t_i, i = 1, \dots, m\},$$

де  $t_1 = K_0(x_*)$ ,  $t_{i+1} = t_{i-\Delta}$ ;  $\Delta$  – деяка дискретизація ціни, що визначає товщину шару. Шар розміщується між площинами (див. рис. 5.79).

Перший алгоритм виконує перебір точок усередині шару  $S_i$  по осях. Другий – «сканування» уздовж шару. Недоліком першого алгоритму є не-

обхідність зберігання  $\prod_{i=1}^{n-1} m_i$  чисел. Результати оброблення кожного шару

для першого й другого алгоритмів потребують додаткового впорядкування, що в принципі не є проблемним для сучасної обчислювальної техніки.

Ефективнішим є третій «прямий» алгоритм, що безпосередньо видає точки  $\overline{x_k}$ ,  $k = 1, 2, m$ . Цей метод полягає в тому, що зберігається множина точок  $P(tk)$ , що безпосередньо лежать під площиною  $L(tk)$ . При русі площини  $L(tk)$ , що відповідає зменшенню параметра  $t$ , площина  $L(t)$  час від часу «натикається» (тобто перетинає) на одну або відразу декілька точок решітки  $\overline{x_k} \in x_0$ , саме в цій послідовності точки  $\overline{x_k}$  і потрібно видавати. Детально математичний апарат і обґрунтування вказаних алгоритмів викладено в роботі [11].

Вказані алгоритми були реалізовані раніше [12]. Програмне забезпечення дозволяє виконувати експрес-оцінювання можливих функціональних образів у наочному режимі, дозволяючи порівнювати результати кожного з трьох вживаних методів, що, у свою чергу, дає можливість додаткової генерації ідей при подальшому формуванні конструктивних образів.

Запропоновану методика використано при розробленні нових конструкцій торцевих фрез, синтезовані функціональні образи яких отримали досить високу оцінку для діапазону глибин фрезерування 7...12 мм. Перелік ознак, за якими виконувалося оцінювання, і їх вагомості було наведено в табл. 1.3. Значення альтернатив ділення зрізу по ширині й товщині у вигляді двовимірної морфологічної таблиці наведено в табл. 1.4. У результаті пошуку за рахунок погіршення одних і поліпшення інших альтернатив синтезовано образ  $a_4^1 a_2^2 a_4^3 a_2^4 a_1^5 a_1^5 a_3^7 a_7^8 a_1^9 a_1^{10} a_4^{11} a_1^{12} a_2^{13} a_8^{14} a_2^{15} a_5^{16} a_4^{17} a_1^{18}$ , що має досить високу узагальнену оцінку значення критерію якості 3,92 з теоретично можливих 5. Отриманий образ вдалося реалізувати у вигляді конструкції [13]. Корпус фрези містить продольні периферійні пази із закріпленими в них різальними вставками, що базуються у вісьовому напрямі на торцеву поверхню корпусу, яка виконана у вигляді кільця. У радіальному напрямі різальні вставки базуються на кільцевих поверхнях, розташованих концентрично центральному отвору корпусу. Таким чином, для всіх різальних вставок використовуються єдині бази, легко відновлювані на круглошліфувальній операції.

За аналізом можливості технічної реалізації синтезованого функціонального образу з більш високою оцінкою 4,07 було ухвалено рішення про застосування ступінчастої схеми різання (зміна значень альтернатив за ознаками ділення зрізу по товщині й ширині). Реалізацію конструкції наведено на рис. 5.80 [14]. Ділення зрізу відбувається за рахунок використання різних кутів у плані (60 і 75°) і різного вильоту ножів.

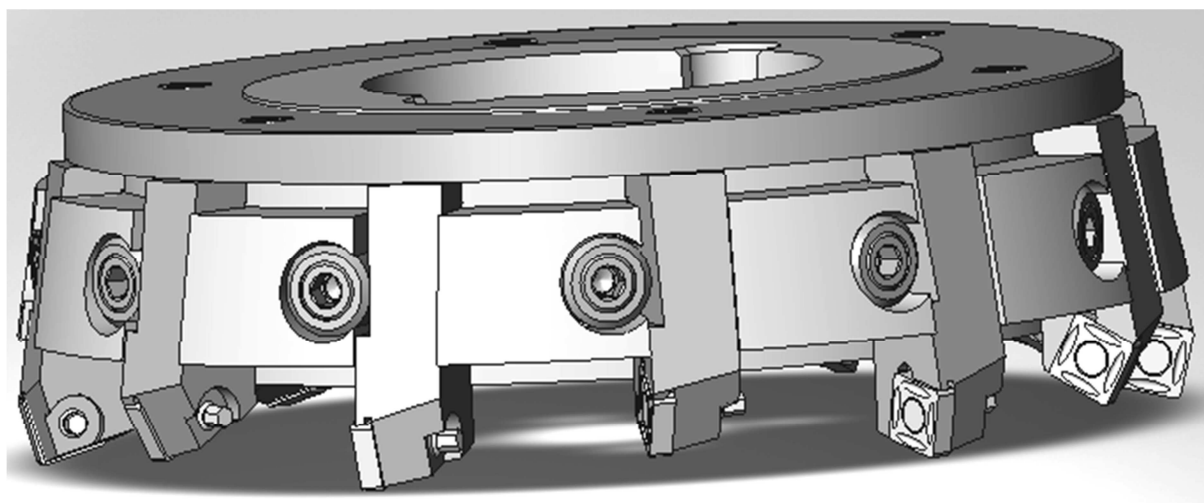


Рисунок 5.80 – Торцева фреза з діленням зрізу по ширині і товщині

## Висновки за розділом 5

1. Встановлено, що через наявність у деталі «U-імплантат» складної форми для її виготовлення знадобиться виконання розгортки цієї деталі в САД-системі. При проектуванні оснащення встановлено, що через складну форму деталі необхідні три типи пуансонів з відповідними формотвірними поверхнями для деформування металу в різних місцях заготовки. Розроблено методику дослідження технологічного процесу поетапного пластичного деформування з використанням САЕ-систем на основі універсального параметризованого макросу. При цьому для спрощення поетапних розрахунків у САЕ-системі матрицю, пуансони й заготовку слід об'єднувати в збірку [15].

2. Розроблена САПР проектування технологічного процесу пластичного деформування й оснащення дозволила провести автоматизоване проектування (САД-система Solidworks) і розрахунок (САЕ-система ABAQUS). Наявність у ядрі цієї системи інтерпретатора мови Python дозволила розробити скрипти для моделювання цього технологічного процесу й забезпечити циклічність роботи САЕ-системи ABAQUS при проведенні досліджень для вибору комбінації параметрів процесу пластичного деформування й оснащення. Таким чином автоматизовано отримання результатів моделювання.

3. У результаті дослідження технологічного процесу пластичного деформування й оснащення встановлено, що на результат моделювання впливають геометричні параметри заготовки, технологічні параметри, розмір скінченно-елементної сітки. Експеримент показав, що деформації й напруга в заготовці неоднакові за об'ємом, на їх розподілення впливають, передусім, форма й розмір матриці, пуансонів і послідовність деформування частин заготовки. Геометричні параметри початкової заготовки впливають на результат моделювання й визначають навантаження на штамп і його здатність видавлювати метал у порожнину штампа. Оскільки ширина заготовки фіксована, потрібно варіювати довжину й висоту заготовки для того, щоб метал повністю заповнив порожнину штампа.

4. Виконано програмну реалізацію ПМК для моделювання динаміки елементів виробів, який включає використання тривимірної геометричної моделі елементів, побудованої в середовищі 3d Max з подальшим імпортом в Unity3D, а також скриптів для опису моделі й керування її параметрами. Розроблено методику інтерактивного керування моделлю шляхом використання графічних елементів на прикладі математичного маятника із зазором в опорі, який моделює рухомий вузол імплантата. Особливості навантаження опори маятника за наявності зазорів досліджено в середовищі САЕ-системи ABAQUS.

5. За допомогою морфологічного аналізу здійснено оцінювання якості ряду відомих конструкцій торцевих касетних фрез, що дозволяє визначити оптимальні конструкції для заданих умов їх роботи.

6. Розроблено алгоритми послідовної оптимізації лінійного функціонала на нерівномірній сітці  $n$ -вимірної морфологічної таблиці, що підвищують ефективність пошуку оптимальних структурних схем технічних рішень.

7. Здійснено проектування й програмну реалізацію інформаційної системи, що використовує запропоновані алгоритми й задовольняє потребу в спеціалізованому прикладному програмному забезпеченні на початкових етапах проектування технічних об'єктів.

8. За допомогою запропонованої методики синтезовано нові функціональні образи конструкцій збірних торцевих фрез. При цьому можливе використання касет з різними пластинами в одному корпусі. Проведено випробування фрез у лабораторних і виробничих умовах.

### Список використаних джерел

1. U-имплантаты отечественного производства при стенозе поясничного отдела позвоночного канала (разработка и клиническое применение) / Падаченко Ю. Е. [и др.] // Украинский нейрохирургический журнал. – 2014. – № 2. – С. 36–41.

2. Nanostructured severe plastic deformation processed titanium for orthodontic mini-implants / Glaucio Serra [and al]. // Materials Science and Engineering C. – 2013. – Vol. 33 – P. 4197–4202.

3. Khennane Amar. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and ABAQUS. – CRC Press, 2013. – 486 p.

4. Gautam Puri, Python Scripts for ABAQUS: learn by example. – Charleston, 2011 – 747 p.

5. Вермель В. Применение PowerMILL в комплексной системе автоматизации «проектирование – производство» / В. Вермель, Е. Калитин, А. Шустов // САПР и графика. – 2000 – № 1 – С. 24–29.

6. Программное обеспечение токарно-фрезерных станков от компании DELCAM PLc // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. – 2008. – № 4. – С. 102–105.

7. Обухов А. Н. Поперечные перемещения подвешенной нити в случае, когда точка подвеса движется горизонтально по заданному закону./ А. Н. Обухов, В. А. Паламарчук // Научный вестник ДГМА. – 2014. – № 1 (13Е). – С.65–75.

8. Алексеев Е. Р. Решение задач вычислительной математики в пакете Mathcad 12 / Алексеев Е. Р. – М. : НТ Пресс, 2006, – 496 с.

9. Андрейчиков А. В. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения) / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Машиностроение, 1998. – 476 с.

10. Гузенко В. С. Направленный морфологический анализ и синтез инструмента для особо тяжелых условий резания / Гузенко В. С. // Надежность режущего инструмента. – Краматорск : КИИ, 1991. – Вып. 4 – С. 83–91.

11. Гузенко В. С. Морфологический синтез технических объектов с помощью последовательной максимизации на неравномерной решетке / В. С. Гузенко, Г. Г. Коткин, В. Л. Аносов // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем : в 2 т. – Краматорск : ДГМА, 1997. – Т. 1. – С. 3–22.

12. Разработка информационной системы для поиска функциональных схем объектов посредством оптимизации линейного функционала на неравномерной решетке / А. Ю. Мельников, В. Л. Аносов, Ю. В. Кушнир, В. В. Хорошайло // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2008. – № 3/2. – С. 57–64.

13 Патент № 23399А Украина, МКИ В23 С5/06. Торцовая фреза / Гузенко В. С., Мироненко Е. В., Аносов В. Л., Носков В. В. – № 95062964 ; заявлено 23.06.1995 ; опубликовано 31.08.1998,. Бюл. № 4 // Промислова власність. – 1998. – № 4.

14 Патент № 32129 Україна, МПК (2006) В23 С5/02. Фреза торцева зі ступінчастою схемою різання / Гузенко В. С., Бабін О. Ф., Аносов В. Л. – № u 2007 12614 ; заявлено 14.11.2007 ; опубліковано 12.05.2008, Бюл. № 9 // Промислова власність. – 2008. – № 9.

15 Моделирование процесса штамповки заготовок имплантатов с применением схем интенсивного пластического деформирования / Тарасов А. Ф., Алтухов А. В., Шейкин С. Е., Байцар В. А. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 139–150. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.09.

## РОЗДІЛ 6

### ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕННЯ DSL

#### **6.1 Методика розроблення DSL для підсистем спеціалізованих САПР на основі онтології предметної області й приклад її реалізації в програмно-методичному комплексі**

Ефективність виконання й релевантність результатів проектування складних машинобудівних виробів і технологічних процесів їх виготовлення істотно залежить від рівня погодженості дослідних і проектних дій фахівців різного профілю [1]. Ці фахівці беруть участь у заходах, що забезпечують різні фази життєвого циклу виробів. На кожному з етапів роботи використовуються різні програмні комплекси й системи: пакети символної математики, різноманітні CAD/CAE/CAM/PDM-системи для геометричного моделювання [2], розрахунків напружено-деформованих станів тощо, генерації маршрутів оброблення й програм для верстатів з ЧПК [3], керування проектами тощо. Також організуються інформаційні портали для комунікаційного підтримання процесів маркетингу, виробництва й реалізації продукції [4]. Необхідність інтеграції в рамках спеціалізованої САПР (зокрема, САПР виробів зі складною геометрією поверхні на прикладі САПР імплантів для медичних цілей [5]) вимагає враховувати онтологічну сумісність термінології й завдань проектування для різнорідних програмних комплексів.

Важливу роль під час виконання завдань з проектування виробів і розрахунків їхніх експлуатаційних параметрів має розроблення предметно-орієнтованих мов (Domain Specific Language – DSL) [6]. Використання онтологій різного рівня абстракції й розроблення на цій основі DSL для предметної області дозволить при проектуванні виробів оперувати високорівневими абстракціями предметної області для метаопису об'єкта проектування, а потім на основі відповідного розпізнавання понять (за допомогою генераторів у термінах технології DSL) виконувати побудову об'єкта проектування за допомогою автоматизованої системи.

За допомогою DSL конструктор або технолог, можливо, такий, що не має спеціальної підготовки в галузі програмування або використання конкретного програмного комплексу, отримає можливість формувати інструкції (скрипти) для проведення конструювання або розрахунків з використанням термінів, характерних для відповідної предметної області, у загальному випадку мовою, близькою до природньої.

Пропонується розроблення DSL для підсистем спеціалізованих САПР виконувати на основі видозміненої загальної онтології предметної області. Така онтологія дозволяє виділити концепти завдань, які розв'язу-

ються під час проектування, концепти процесів проектування, що використовують відповідні алгоритми, і концепти об'єктів (вхідних даних, результатів експериментів, проміжних результатів розрахунків), які цими алгоритмами обробляються. Також така онтологія сприяє узгодженню термінів і понять між фахівцями, що беруть участь у проектуванні й виготовленні виробів. На основі переліку концептів і предметно-орієнтованих зв'язків між ними виділяється контекстно-залежна граматики, яка є частковим випадком граматики Холмського та включає в себе множину термінальних і нетермінальних символів, набір правил виведення й початковий символ [7]. Усі ці елементи можуть бути отримані на основі видозміненої загальної онтології і з її ж допомогою є можливість верифікувати семантику виведення, який виконується на основі правил семантичного дерева. На основі побудованого дерева далі будується семантичний аналізатор (парсер). Процедури, які повинні викликатися за результатами розбору речень (парсингу), визначаються характером й алгоритмами вирішення завдання розрахунку або проектування, що призначається за допомогою DSL.

На основі запропонованої інформаційної технології розроблення й реалізації DSL на основі видозміненої загальної онтології предметної області розроблено й реалізовано DSL і відповідні інтерпретатори для вирішення ряду завдань у рамках високорівневого проектування виробів і процесів.

Розглянемо далі реалізацію запропонованої методики на прикладі розроблення й реалізації DSL, інтегрованої в програмно-методичний комплекс для автоматизації проектування реляційних баз даних на основі онтологічного підходу до інформаційного моделювання предметних областей.

### ***6.1.1 Концептуальний аналіз процесу інформаційного моделювання предметної області при проектуванні бази даних***

В основі інформаційного моделювання у вигляді ER-моделей (Entity-Relationship Model) лежать такі базові поняття, як сутність і зв'язок.

Сутність – концепт, за допомогою якого моделюється клас однотипних об'єктів. Сутність має ім'я, унікальне в межах модельованої системи. За рахунок того, що сутність відповідає деякому класу однотипних об'єктів, передбачається, що в системі існує множина екземплярів даної сутності. Об'єкт, якому відповідає поняття екземпляра сутності, має свій набір атрибутів – характеристик, що визначають властивості даного представника класу. При цьому набір атрибутів повинен бути таким, щоб можна було розрізняти конкретні екземпляри сутності. Набір атрибутів, що однозначно ідентифікують конкретний екземпляр сутності, називають ключовим. Одне із загальноприйнятих графічних позначень сутності – прямокутник, у верхній частині якого записане ім'я сутності, а нижче перераховуються атрибути, причому ключові атрибути позначаються, наприклад, підкресленням або символом «\*».



Зв'язок – бінарна асоціація, що показує, яким чином сутності співвідносяться або взаємодіють між собою. Зв'язок може існувати між двома різними сутностями. Він показує, як зв'язані екземпляри сутностей між собою. Якщо зв'язок установлюється між двома сутностями, то він визначає взаємозв'язок між екземплярами однієї та іншої сутності [8–11].

У різних нотаціях потужність (кратність) зв'язку зображується по-різному. Наприклад, позначення множинності може зображуватися шляхом поділу лінії зв'язку на три частини. Графічна інтерпретація зв'язку дозволяє відразу прочитати зміст взаємозв'язку між сутностями, вона наочна й легко інтерпретується. Зв'язки поділяються на три типи за множинністю: «один-до-одного» (1:1), «один-до-багатьох» (1:N), «багато-до-багатьох» (M:N). Зв'язок «один-до-одного» означає, що екземпляр однієї сутності зв'язаний тільки з одним екземпляром іншої сутності. Зв'язок 1:N означає, що один екземпляр сутності, розташований ліворуч по зв'язку, може бути пов'язаний з декількома екземплярами сутності, розташованими праворуч по зв'язку, а зв'язок «багато-до-багатьох» (M:N) означає, що один екземпляр першої сутності може бути пов'язаний з декількома екземплярами другої сутності, і, навпаки, один екземпляр другої сутності може бути пов'язаний з декількома екземплярами першої сутності.

Зв'язок кожного з цих типів може бути обов'язковим, якщо в цьому зв'язку повинен брати участь кожен екземпляр сутності, і необов'язковим, якщо не кожен екземпляр сутності повинен брати участь у цьому зв'язку. При цьому зв'язок може бути обов'язковим з одного боку й необов'язковим – з іншого. Обов'язковість зв'язку теж по-різному позначається в різних нотаціях. Прикладом позначення необов'язковості зв'язку є порожній кружечок на кінці зв'язку, а обов'язковість – перпендикулярною лінією, що перекреслює зв'язок, або зафарбованим кружечком на кінці зв'язку.

У результаті побудови моделі предметної області у вигляді набору сутностей і зв'язків одержуємо зв'язний граф. В отриманому графі необхідно уникати циклічних зв'язків – вони виявляють некоректність моделі [8–10].

ER-модель може аналізуватися розроблювачами, які будуть розробляти окремі додатки. Вона має однозначну інтерпретацію, на відміну від деяких пропозицій природної мови, і тому тут менш можливе непорозуміння з боку розроблювачів.

Для ER-моделі існує алгоритм однозначного перетворення її в реляційну модель даних, що дозволило надалі розробити множинну інструментальних систем, які підтримують процес розроблення інформаційних систем, що базуються на технології баз даних. І в усіх цих системах існують засоби опису інформаційної моделі розроблюваної БД із можливістю автоматичної генерації тієї даталогічної (фізичної) моделі, на якій буде реалізовуватися проект надалі.

Розглянемо особливості перетворення ER-моделі в реляційну модель даних.

а) Кожній сутності ставиться у відповідність відношення реляційної моделі даних. При цьому назва сутності й відношення можуть бути різні-

ми, тому що на назви сутностей можуть не накладатися додаткові синтаксичні обмеження, крім унікальності імені в рамках моделі. Назви відношень можуть бути обмежені вимогами конкретної СКБД, найчастіше ці імена є ідентифікаторами в деякій базовій мові, вони обмежені по довжині й не повинні містити пробілів і деяких спеціальних символів.

б) Кожен атрибут сутності стає атрибутом відповідного відношення. Перейменування атрибутів повинне відбуватися відповідно до тих самих правил, що й перейменування відношень. Для кожного атрибута задається конкретний припустимий у СКБД тип даних й обов'язковість або необов'язковість цього атрибута (тобто припустимість або неприпустимість NULL-значень для нього).

в) Первинний ключ сутності стає PRIMARY KEY відповідного відношення. Атрибути, що входять у первинний ключ відношення, автоматично одержують властивість обов'язковості (NOT NULL).

г) У кожне відношення, що відповідає підлеглий сутності, додається набір атрибутів основної сутності, що є первинним ключем основної сутності. У відношенні, що відповідає підлеглий сутності, цей набір атрибутів стає зовнішнім ключем (FOREIGN KEY).

д) Для моделювання необов'язкового типу зв'язку на фізичному рівні в атрибутів, що відповідають зовнішньому ключу, встановлюється властивість припустимості невизначених значень (ознака NULL). При обов'язковому типі зв'язку атрибути одержують властивість відсутності невизначених значень (ознака NOT NULL).

е) Внаслідок того, що в реляційній моделі даних підтримуються між відношеннями тільки зв'язки типу «один-до-багатьох», а в ER-моделі припустимі зв'язки «багато-до-багатьох», є необхідним спеціальний механізм перетворення, що дозволить відобразити множинні зв'язки, неспецифічні для реляційної моделі, за допомогою припустимих для неї категорій. Це робиться введенням спеціального додаткового сполучного відношення, що пов'язане з кожним вихідним зв'язком «один-до-багатьох», атрибутами цього відношення є первинні ключі відношень [9; 11].

Вхідними даними для бізнес-процесу «Проектування бази даних» є подання онтології предметної області (ПрО), яку необхідно одержати від фахівців. Бізнес-процес регламентується методологією проектування БД, вимогами до онтології й об'єктів ER-моделі, нотацією ER-діаграм, правилами генерації відношень з діаграми «сутність-зв'язок» і шаблоном опису таблиці БД. Дії, що відбуваються усередині бізнес-процесу, керуються користувачем-розроблювачем і комп'ютером зі встановленим відповідним програмним комплексом. У результаті проектування БД одержуємо на виході ER-модель, опис таблиць БД за шаблоном й схему зв'язків таблиць.

Структурно-функціональну модель нульового рівня для процесу «Проектування бази даних» наведено на рис. 6.1.

Для основної активності, наведеної на контекстній SADT-діаграмі (рис. 6.1), може бути проведена декомпозиція. Активність «Проектування бази даних» може бути подано у вигляді SADT-діаграми, що деталізує по-

передню, та складено з активностей більш низького рівня із внутрішніми зв'язками.

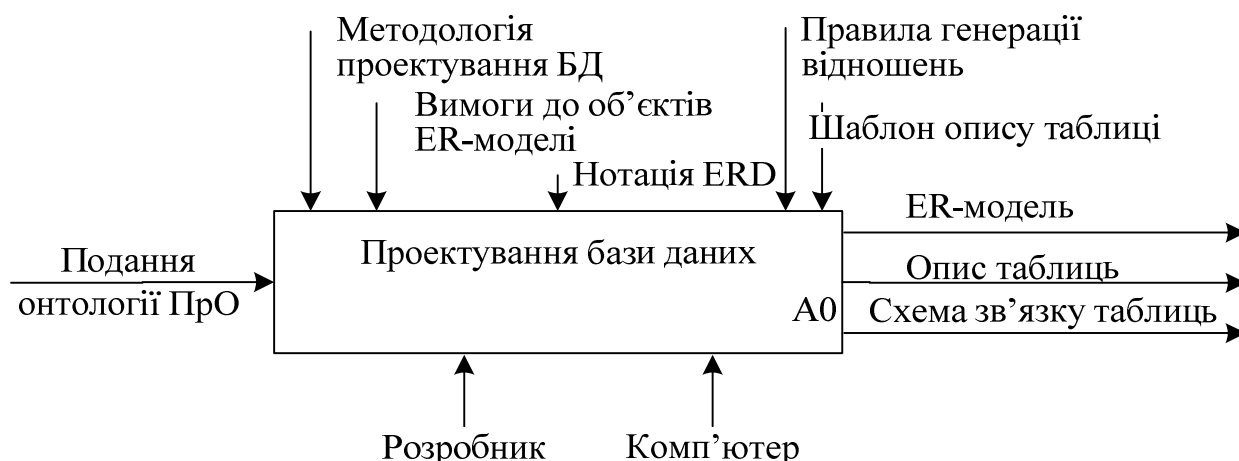


Рисунок 6.1 – Структурно-функціональна модель для бізнес-процесу «Проектування бази даних на основі онтологічного підходу»

Проектування бази даних виконується в три послідовні етапи. При декомпозиції процесу проектування бази даних ми отримуємо три основні активності SADT-діаграми 1-го рівня: «Концептуальне проектування», «Логічне проектування» й «Фізичне проектування».

Вхідні дані (подання онтології ПрО) спочатку потрапляють на перевірку. Додатково необхідна активність «Перевірка наявності зв'язку для кожної сутності ПрО», у якій перевіряється, чи всі сутності будуть відображені на ER-діаграмі. Для побудови ER-діаграми необхідно встановити кратність і класи приналежності сутностей для кожного зв'язку. Вводимо наступну активність «Перевірка зв'язків на наявність кратності й класу приналежності». Якщо кратність або клас приналежності не встановлені, то користувачеві необхідно їх установити в блоці активності «Встановлення параметрів зв'язку». Блоки перевірки регламентуються вимогами до об'єктів ER-моделі. Виходом перевірочних блоків активності є правильне подання онтології ПрО. Далі під поданням онтології ПрО будемо мати на увазі правильне подання онтології ПрО.

Блок концептуального проектування виконується розроблювачем після імпорту й перевірки онтології. Отримана на виході блоку активності «Концептуальне проектування» ER-модель направляється на вихід і подається на вхід блоку «Логічне проектування». Процес концептуального проектування регламентується нотацією ER-діаграм.

За поданням онтології ПрО й інформаційною моделлю у вигляді ER-діаграми можна побудувати набір відношень, які являють собою таблиці проектованої БД. Таким чином, на вхід блоку «Логічне проектування» надходить подання онтології ПрО й ER-модель, а на виході одержуємо набір відношень. На керування подаються правила генерації відношень. Набір відношень подається на вхід блоку активності «Фізичне проектування»,

у якому виконується опис таблиць проекрованої БД і побудова зв'язків таблиць. Під час опису таблиць БД, регламентованого шаблоном опису таблиці, розроблювач задає додаткові дані, такі як: тип (текстовий, цілочисловий, речовинний), розмір (для текстового поля) і призначення.

Блоки активності, зв'язані безпосередньо з процесом проектування, регламентовані додатково методологією проектування БД.

Таким чином, маючи деталізований опис процесу проектування БД, можемо побудувати структурно-функціональну модель першого рівня, яку наведено на рис. 6.2.

У результаті реалізації розглянутого бізнес-процесу побудована програмною системою ER-модель є доступною для аналізу програмістам-розроблювачам, які будуть розробляти окремі додатки. Відповідно, розроблювальна програмна система дозволить фахівцеві в предметній області самостійно спроектувати базу даних для розроблювача програмних додатків за описом предметної області у вигляді онтології.

### ***6.1.2 Розроблення предметно-орієнтованої мови для автоматизації процесу проектування баз даних***

Відомо, що мова предметної області, яка часто передається аббревіатурою DSL, – це урізана форма мови програмування, створена спеціально для вирішення певного виду проблем. У деяких співтовариствах програмістів під DSL прийнято розуміти тільки мови, створювані для вирішення конкретного завдання, але також можна використати термін DSL для опису мов, які можуть використовуватися для вирішення деякого обмеженого класу проблем [12].

Процес створення предметно-орієнтованої мови складається з декількох етапів:

- визначення абстрактного синтаксису;
- визначення конкретного синтаксису;
- визначення правил трансформації.

Абстрактний синтаксис описує поняття, використовувані в мові, у вигляді, придатному для машинного оброблення. Існує два способи задавання абстрактного синтаксису: у вигляді метамоделі й у вигляді контекстно-вільної (КВ) граматики.

Конкретний синтаксис мови – це подання понять абстрактного синтаксису, якими може маніпулювати користувач. Подання може бути текстовим, графічним або симбіозом двох перших.

Правила трансформацій – це правила, за якими абстрактне подання транслюється в здійсненне. Розрізняють два типи трансформацій: горизонтальні й вертикальні. Прикладом горизонтальної трансформації може служити автоматичний рефакторинг, можливість якого надається сучасними засобами розроблення.

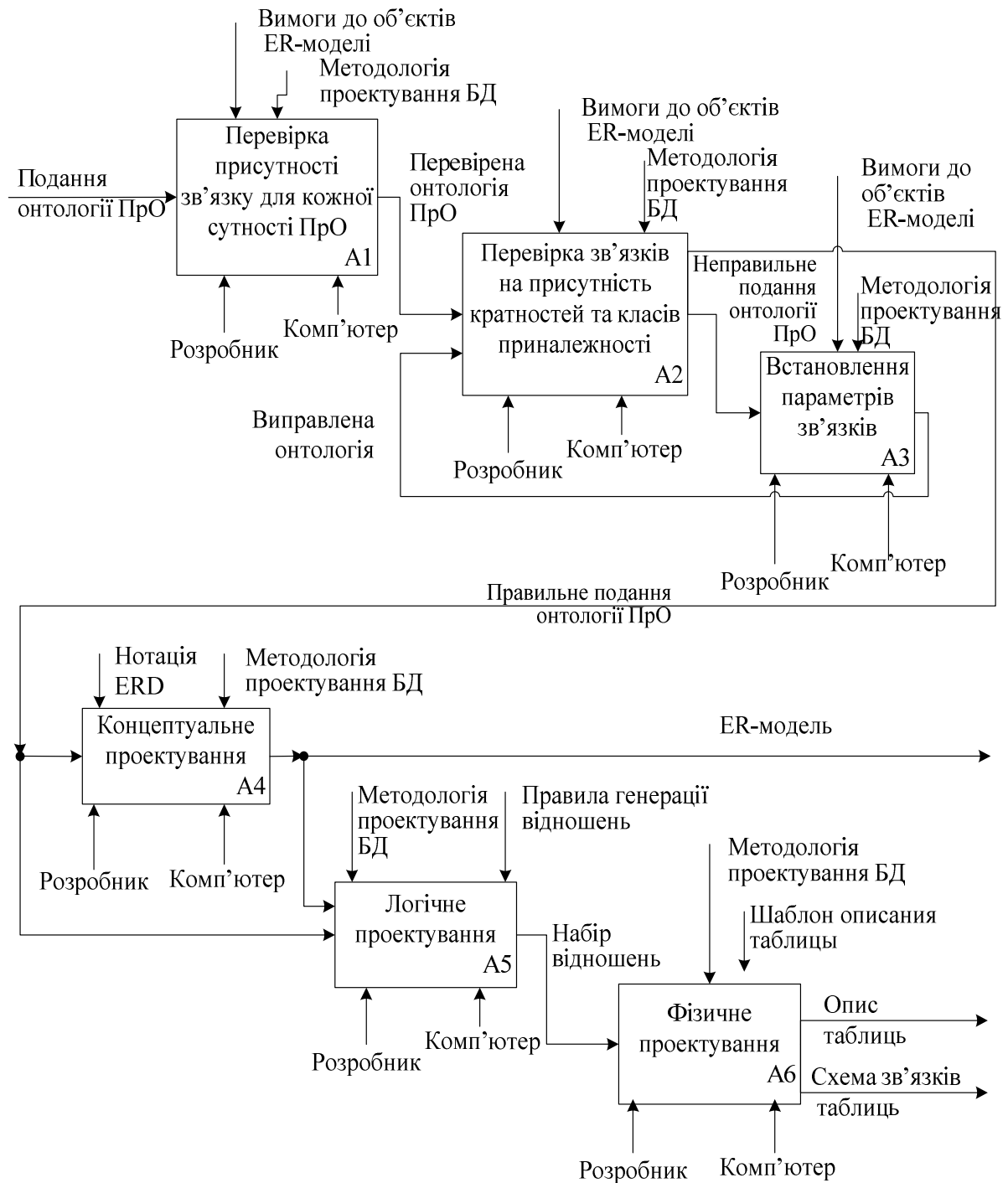


Рисунок 6.2 – Структурно-функціональна деталізована модель бізнес-процесу проектування бази даних на основі онтологічного підходу

Командою називають послідовність слів мови, яка розпізнається інтерпретатором і виконує певні завдання [12; 13].

Онтологію завдань, процесів й об'єктів предметної області використання DSL розроблено для визначення переліку й взаємозв'язків його синтаксису та наведено на рис. 6.3. За її допомогою й буде складено конкретний синтаксис предметно-орієнтованої мови, тобто повний список команд DSL.

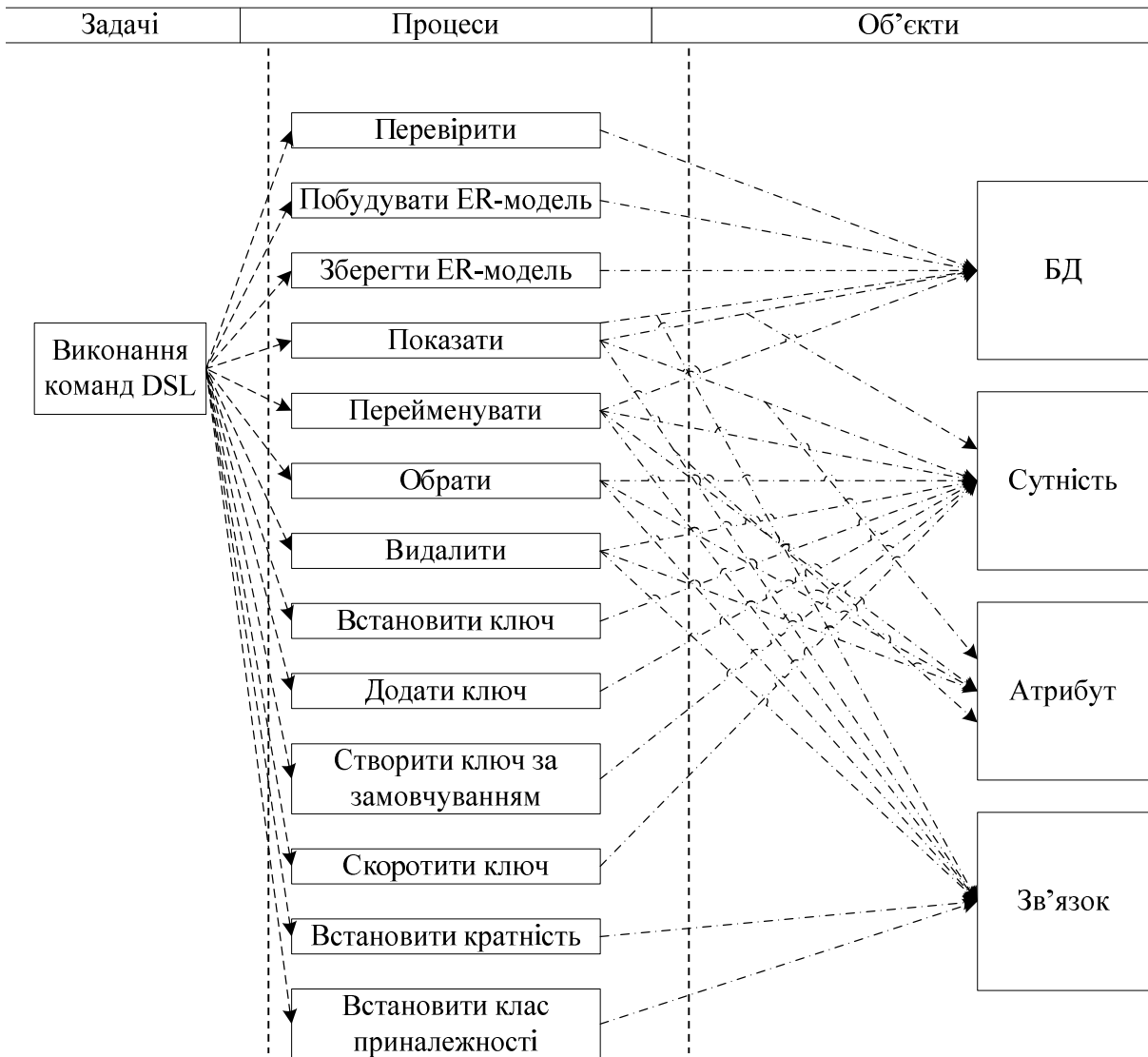


Рисунок 6.3 – Процеси й об'єкти виконання команд DSL для предметної області «Проектування баз даних»

### Визначення абстрактного синтаксису DSL

Синтаксис мови являє собою систему правил, відповідно до яких можна будувати «правильні» послідовності «літер». Кожне слово мови характеризується певною структурою, специфічною саме для цієї мови. Тоді необхідно, з одного боку, розробити механізми перерахування, або породження, слів із заданою структурою, а з іншого – механізми перевірки того, що слово належить цій мові.

Для дослідження синтаксису склався спеціальний математичний апарат – теорія формальних граматики, у якому мова розуміється вже не як засіб спілкування, а як множина формальних об'єктів – послідовностей символів алфавіту. Ці послідовності називають ланцюжками, і мову розуміють як множину ланцюжків [14]. Множина команд DSL є множиною таких ланцюжків.

Таким чином, опис абстрактного синтаксису, що використовується для предметно-орієнтованої мови, здійснюється за допомогою формальних граматики.

Граматика – це сукупність правил, які використовуються для побудови мови. Правила дозволяють замінити символи або рядки символів іншими символами або рядками символів.

Формальна породжувальна граматика  $G$  – це впорядкована система, обумовлена четвіркою об'єктів:  $G = (VN, VT, S, P)$ , де  $VN$  – кінцева множина нетермінальних символів (алфавіт допоміжних символів);  $VT$  – кінцева множина термінальних символів (алфавіт основних символів); елемент  $S \in VN$  – початковий символ (аксіома);  $P$  – кінцева множина правил, правил підстановлення (заміни) виду  $\alpha \rightarrow \beta$ , де обидві його частини є словами в об'єднаному алфавіті  $VN \cup VT$ , причому ліва частина правила обов'язково містить змінну (нетермінальний символ)  $i$ , принаймні, один перший елемент деякого правила є початковим елементом  $S$  [15]. Стрілка означає заміну першого входження слова  $\alpha$  на слово  $\beta$ . Нетермінали прийнято позначати великими літерами латинського алфавіту, термінали – малими літерами [16].

Множина всіх термінальних ланцюжків, які можна породити за допомогою множини правил  $P$  з аксіоми граматики, називається мовою, породжуваною граматиною  $G$ , і позначається  $G(L)$  [15].  $G(L)$  – це конкретний синтаксис DSL.

У процесі функціонування граматики можливі два варіанти:

а) перевіряти ланцюжки на приналежність їх до мови, породжуваної заданою граматиною;

б) одержувати ланцюжки, які належать до мови, породжуваної заданою граматиною.

Абстрактний синтаксис предметно-орієнтованої мови задамо у вигляді KB-граматики. Кожне правило такої граматики має вигляд  $A \rightarrow \alpha$ . Це означає, що певний нетермінальний символ може бути замінений ланцюжком символів незалежно від контексту. При цьому повинно бути хоча б одне правило, ліва частина якого – початковий символ граматики [16–17].

Визначимо елементи граматики, що описують складені команди DSL. Початковий нетермінальний символ позначимо « $S$ ». Складемо кінцеву множину правил для розпізнавання команд DSL. Для цього введемо деякі умовні позначки.

Команда DSL обов'язково укладена в круглі дужки. Уведемо нетермінал  $D$  для об'єднання всіх команд в одну множину.

$S \rightarrow (D)$  – правило взяття команди в круглі дужки.

У множині команд можна виділити три групи: команди, що мають у якості початку слово «БД» (умовно – термінал  $b$ ); команди, що виконують дії з об'єктами сутностей (умовно – термінал  $d$ ), і команди для виконання дій над параметрами зв'язків (умовно – термінал  $f$ ).

Параметр команди, для якого не має значення порядок символів з множини літер, цифр і символу « $_$ », позначимо англійською літерою  $W$ .

Для команд, що починаються з терміналу  $b$ , визначено такий набір ланцюжків продовження команди (нетермінал  $F$ ):

–  $F \rightarrow$  показати\_сутність (умовна позначка ланцюжка –  $g$ );

- $F \rightarrow$  показати\_зв'язок (умовна позначка – h);
- $F \rightarrow$  перевірити (умовна позначка – i);
- $F \rightarrow$  побудувати\_ER (умовна позначка – j);
- $F \rightarrow$  зберегти\_ER (умовна позначка – k);
- $F \rightarrow$  перейменувати="W" (умовна позначка – l="W").

Нетермінал W уже був описаний вище. Це будь-яка послідовність символів з множини літер українського й англійського алфавітів, цифр і символу «\_».

Правило для виконання команд, що починаються з ключового слова «БД», має такий вигляд:

$D \rightarrow$  b.?F

Команди, що мають у якості початку термінал d (сутність), мають як продовження такий список ланцюжків (нетермінал J):

- $J \rightarrow$  .?показати\_атрибут (умовна позначка – .?q);
- $J \rightarrow$  ="W" (умовна позначка – ="W");
- $J \rightarrow$  .?перейменувати="W" (умовна позначка – .?l="W");
- $J \rightarrow$  .атрибут? перейменувати ="W";
- $J \rightarrow$  .атрибут="W";
- $J \rightarrow$  .?встановити\_ключ="W" (умовна позначка – .?r="W");
- $J \rightarrow$  .?додати\_ключ="W" (умовна позначка – .?s="W");
- $J \rightarrow$  .?створити\_id (умовна позначка – .?t);
- $J \rightarrow$  .?ключ\_скоротити="W" (умовна позначка – .?u="W");
- $J \rightarrow$  .? видалити (умовна позначка – .?m);
- $J \rightarrow$  .атрибут? видалити.

Послідовність термінальних символів «.атрибут» умовно позначимо терміналом v і використаємо вже введені умовні позначки:

- $J \rightarrow$  v? перейменувати ="W" (умовна позначка – v?l="W");
- $J \rightarrow$  v="W" (умовна позначка – v="W");
- $J \rightarrow$  v?видалити (умовна позначка – v?m).

Ланцюжки, що передують нетерміналу W, об'єднаємо нетерміналом N:  $N = \{=, .?l=, .?r=, .?s=, .?u=, v?l=, v=\}$ . Тоді правила граматики по нетерміналу J набудуть такого вигляду:

- $J \rightarrow$  .?q;
- $J \rightarrow$  N"W";
- $J \rightarrow$  .?t;
- $J \rightarrow$  .?m;
- $J \rightarrow$  v?m.

Правило для виконання команд, що починаються з ключового слова «сутність», має такий вигляд:

$D \rightarrow$  dJ

Ланцюжки, що починаються терміналом f, продовжуються наступною множиною ланцюжків (нетермінал Q), причому деякі з них подібні до тих, які позначено нетерміналом J та які відразу подамо в умовних позначках:



- $Q \rightarrow = "W"$ ;
- $Q \rightarrow .?показати$  (умовна позначка -  $.?w$ );
- $Q \rightarrow .?l="W"$ ;
- $Q \rightarrow v?l="W"$ ;
- $Q \rightarrow v="W"$ ;
- $Q \rightarrow .?m$ ;
- $Q \rightarrow v?m$ ;
- $Q \rightarrow .?встановити_кратність="ДО"$  (умовна позначка -  $.?z="ДО"$ );
- $Q \rightarrow .?встановити_приналежність1="КП"$  (умовна позначка -  $.?x="R"$ );
- $Q \rightarrow .?встановити_приналежність2="КП"$  (умовна позначка -  $.?y="R"$ ).

К – нетермінал, що описує значення кратності (1:1 – умовно а; 1:N – умовно с; M:N – умовно е). КП позначимо нетерміналом  $R = \{об$  (умовно о), необ (умовно р) $\}$ .

Ланцюжки, що передують нетерміналу W, об'єднаємо нетерміналом U:  $U = \{=, .?l=, v?l=, v=\}$ . Тоді правила граматики для нетерміналу Q набудуть такого вигляду:

- $Q \rightarrow U "W"$ ;
- $Q \rightarrow .?w$ ;
- $Q \rightarrow .?z="K"$ ;
- $Q \rightarrow .?x="R"$ ;
- $Q \rightarrow .?y="R"$ ;
- $Q \rightarrow .?m$ ;
- $Q \rightarrow v?m$ .

Правило для виконання команд, що починаються з ключового слова «зв'язок», має такий вигляд:

$$D \rightarrow fQ$$

Усі виділені термінали зведено в таблицю (табл. 6.1).

*Таблиця 6.1 – Термінали DSL для концептуального проектування баз даних на основі онтології*

Термінали	
Условное обозначение	Запис конкретного синтаксису
<i>l</i>	<i>2</i>
b	БД
d	сутність
f	зв'язок
g	показати_сутність
h	показати_ зв'язок
i	перевірити
j	побудувати_ER

Продовження таблиці 6.1

1	2
k	зберегти_ER
l	перейменувати
q	показати_атрибут
r	встановити_ключ
s	додати_ключ
t	створити_id
u	ключ_скоротити
v	.атрибут
w	показати
z	встановити_кратність
x	встановити_приналежність1
y	встановити_приналежність2
m	видалити
a	1:1
c	1:N
e	M:N
o	об
p	необ

З урахуванням всіх уведених нетерміналів і допоміжних правил складено множину правил у короткій формі умовних позначок (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Правила граматики в умовних позначках

Правила
$S \rightarrow (D)$
$D \rightarrow b.?F$
$D \rightarrow dJ$
$D \rightarrow fQ$
$F \rightarrow g   h   i   j   k   l="W"$
$J \rightarrow .?q   .?t   N"W"   .?m   v?m$
$N \rightarrow U   .?r=   .?s=   .?u=$
$U \rightarrow =   .?l=   v?l=   v=$
$Q \rightarrow U"W"   .?w   .?z="K"   .?x="R"   .?y="R"   .?m   v?m$
$K \rightarrow a   c   e$
$R \rightarrow o   p$
$W \rightarrow \alpha W$ , где $\alpha \in \{A-Z, a-z, \_, A-Я, a-я, 0-9\}$

Дану множину правил для більшої наочності можна представити у вигляді синтаксичного дерева (рис. 6.4). Воно відображає послідовність розташування слів мови, так, щоб слова утворювали коректні з погляду спроектованої мови команди.

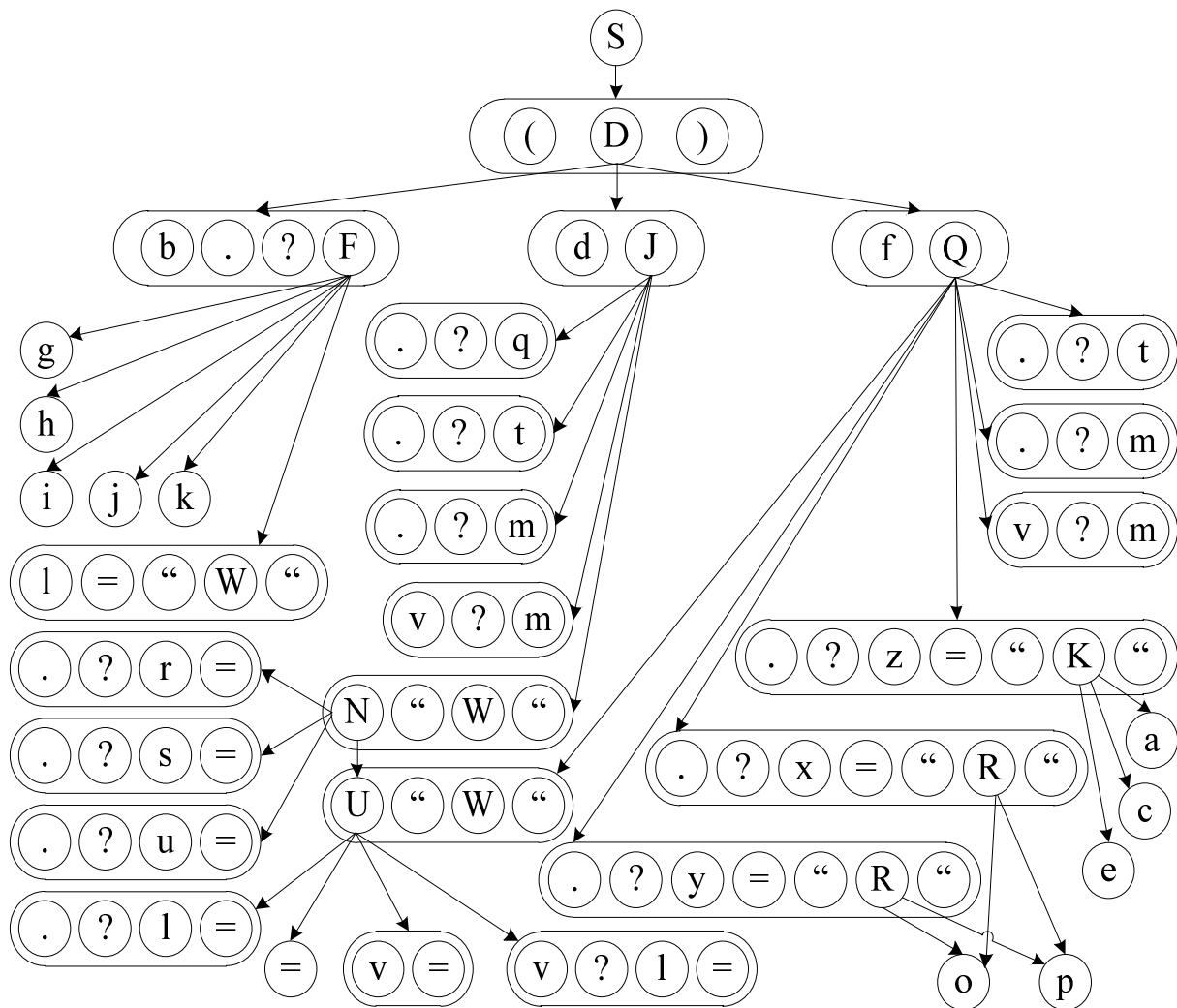


Рисунок 6.4 – Синтаксичне дерево DSL для концептуального проектування баз даних на основі онтології

Результатом виконання поблокового аналізу ланцюжка, що задає DSL-команду, є виконання введеної команди DSL (якщо ланцюжок складено правильно) або виведення повідомлення про те, що команду введено невірно.

#### Визначення конкретного синтаксису DSL

У предметній області проектування баз даних оперують конкретним набором понять. Skorистаємося побудованою онтологією об'єктів предметної області (рис. 6.3), щоб визначити частину синтаксису DSL, якою буде користуватися розроблювач БД у рамках цього програмного продукту.

Таким чином, уводимо в конкретний синтаксис предметно-орієнтованої мови такі слова, які далі будемо називати змінними команд:

- БД;
- сутність;
- атрибут;
- зв'язок;
- кратність;
- клас\_приналежності.

## Визначення конкретного синтаксису DSL

У предметній області проектування баз даних оперують конкретним набором понять. Скористаємося побудованою онтологією об'єктів предметної області (рис. 6.3), щоб визначити частину синтаксису DSL, якою буде користуватися розроблювач БД у рамках цього програмного продукту.

Таким чином, уводимо в конкретний синтаксис предметно-орієнтованої мови такі слова, які далі будемо називати змінними команд:

- БД;
- сутність;
- атрибут;
- зв'язок;
- кратність;
- клас\_приналежності.

Причому змінна «атрибут» означає й простий атрибут сутності, і ключовий.

Змінна «кратність» може набувати одне із трьох значень, які позначимо в такий спосіб: «1:1» – ступінь зв'язку «один-до-одного»; «1:N» – ступінь зв'язку «один-до-багатьох»; «M:N» – ступінь зв'язку «багато-до-багатьох». Змінна з ім'ям «клас\_приналежності», у свою чергу, може набувати значення «об» й «необ», що має на увазі обов'язковий клас приналежності й необов'язковий, відповідно.

Значення змінних позначаються подвійними лапками попереду й позаду, як зазначено вище для змінних «кратність» й «клас\_приналежності».

Визначимо коло завдань, яке буде доступне для вирішення користувачем цього програмного продукту й описане в DSL. Завдання позначаємо дієсловом. Можливе словосполучення, але в складі з дієсловом.

Загальний синтаксис команди DSL для виконання конкретного завдання має вигляд:

```
(найменування_змінної.[найменування_ змінної2] ?найменування_ завдання[="значення_змінної"])
```

Таким чином, початковим символом команд DSL є відкриваюча дужка «(», завершує команду закриваюча дужка «)».

Роздільником назв змінних і завдань у мові є символ «.». Символ позначення початку назви завдання – знак питання «?». Параметри «назва\_змінної2» й «значення\_змінної» є необов'язковими для всіх завдань. Останній параметр може складатися з літер українського й англійського алфавітів, цифр і символу «\_».

У якості назви змінної беруться слова-змінні, описані вище. Назви конкретних завдань концептуального проектування бази даних на основі онтології визначимо далі.

За рахунок того, що для проектування бази даних певної предметної області за допомогою цього програмного продукту вхідними даними є онтологія, з якої розроблювач може бути не знайомий, визначимо завдання перегляду окремих частин онтології. При імпорті онтології ініціюються об'єкти класів, відповідальні за зберігання даних про БД й її елементи. Тому завдання перегляду частин онтології описані як перегляд уже елементів БД.

Синтаксис для перегляду сутностей і зв'язків у певній онтології:

(БД.?показати\_сутність)

(БД.?показати\_зв'язок)

Аналогічно виконується виведення відомостей про кожний зв'язок.

Команда перегляду атрибутів для сутностей, команда перегляду інформації про зв'язки, а саме назв сутностей, що беруть участь у ній, кратності й атрибутів при ній, якщо такі є, наведено нижче:

(сутність.?показати\_атрибут)

(зв'язок.?показати)

Для виведення атрибутів по кожній сутності значення змінної «сутність» не повинне бути порожнім рядком «», воно встановлюється за замовчуванням.

Аналогічно виконується виведення відомостей про кожний зв'язок.

Для виконання операцій над конкретним елементом БД спочатку виконуємо команду привласнення значення змінної, відповідальної за цей елемент.

Синтаксис такої команди:

(найменування\_змінної="значення\_змінної")

Приклад команди, що виконує перегляд атрибутів конкретної сутності, у тому числі й ключових, має такий вигляд:

(сутність="Сутність\_А")

(сутність.?показати\_атрибут)

При цьому «Сутність\_А» – назва деякої сутності в проєктованій на основі онтології базі даних, а «показати\_атрибут» – назва завдання.

Для зв'язку з назвою «Керує» ця команда виглядає аналогічно:

(зв'язок="Керує")

(зв'язок.?показати)

Передбачимо завдання «перейменувати» для таких елементів, як БД, сутність, зв'язок, атрибут. При цьому нові імена задаються для проєктованої бази даних, тобто в онтології все імена залишаються без змін.

Синтаксис команд перейменування виглядає так:

(назва\_змінної.?перейменувати="Нове\_ім'я")

При цьому значення змінної не повинне бути порожнім рядком. За замовчуванням тільки змінна БД має значення з назвою онтології, змінні «сутність», «зв'язок», «атрибут» мають значення «», тому перш, ніж перейменувати елемент бази даних, необхідно виконати команду привласнення.

Для перейменування атрибута необхідно вказувати сутність, яку характеризує цей атрибут.

Таким чином, наведемо команди перейменування:

а) (БД.?перейменувати="Ім'я\_БД")

б) (сутність="Сутність\_А")

(сутність.?перейменувати="Ім'я\_сутності")

в) (зв'язок="Керує")

(зв'язок.?перейменувати="Веде")

г) (сутність="Сутність\_А")

(сутність.атрибут="Атрибут\_1")

(сутність.атрибут?перейменувати="Ім'я\_атрибута")

Якщо атрибут, який необхідно перейменувати, відноситься до атрибутів зв'язку, то приклад написання команди такий:

```
(зв'язок="Веде")
```

```
(зв'язок.атрибут="Атрибут_з1")
```

```
(зв'язок.атрибут?перейменувати="Атрибут_зв'язку_1")
```

Можливий такий варіант, що укладач онтології через недосвідченість у проектуванні баз даних не вкаже ключову властивість сутностей. За замовчуванням при імпорті онтології, ініціюються об'єкти класів, відповідальні за зберігання даних про БД й її елементи, при цьому ключовим атрибутом призначається порядковий номер «id\_number».

У розробленій мові DSL передбачено можливість встановлення ключового атрибута з існуючих за допомогою команди «встановити\_ключ», при цьому відбувається заміна атрибута «id\_number». Якщо необхідно створити складений ключ, то виконується завдання «додати\_ключ».

Синтаксис команд має вигляд:

```
(сутність.?встановити_ключ="Ім'я_атрибута")
```

```
(сутність.?додати_ключ="Ім'я_атрибута")
```

«Ім'я\_атрибута» тут указує на ім'я вже існуючого для конкретної сутності атрибута.

Якщо ключ складений й у нього є атрибут, установлений за замовчуванням «id\_number», то при виконанні команди «встановити\_ключ» відбувається його заміна на зазначений.

Якщо відбулася заміна ключа, встановленого за замовчуванням «id\_number», але все-таки ідентифікатор необхідний, можливо створити його заново:

```
(сутність.?створити_id)
```

При виконанні команди до складу ключа входить атрибут «id\_number», що був установлений спочатку. Якщо при виконанні команди виявиться, що «id\_number», установлений за замовчуванням, не був раніше замінений, то цей ключ залишиться без змін.

Якщо необхідно скоротити складений ключ, то виконуємо таку команду:

```
(сутність.?ключ_скоротити="Ім'я_атрибута-ключа")
```

«Ім'я\_атрибута-ключа» вказує на ім'я атрибута, що перебуває в складі ключа. При виконанні команди зазначений ключовий атрибут переходить у простий атрибут. Якщо ключ нескладений, він залишається без змін.

У процес автоматизованого проектування бази даних входить перевірка вхідних даних. Уводимо команди DSL для виконання перевірки наявності зв'язків для кожної сутності, взятої з онтології, і перевірки зв'язків на наявність усіх необхідних значень параметрів (клас приналежності, ступінь зв'язку) і встановлення значень, якщо це необхідно.

Обидві перевірки виконуються за командою

```
(БД.?перевірити)
```

Прийmemo позначення кратності зв'язку «K» – це значення кратності, що прописується користувачем як «1:1» або «1:N», або «M:N».

Якщо необхідно змінити кратність зв'язку, то можна скористатися такою командою:

(зв'язок.?встановити\_кратність="К")

За замовчуванням для сутностей, що беруть участь у бінарних зв'язках бази даних, параметр класу приналежності не визначено. За необхідності встановити цей параметр до початку проектування бази даних варто виконати такий ряд команд:

(зв'язок.?встановити\_з1="КП")

(зв'язок.?встановити\_з2="КП")

де «КП» – це один із двох можливих варіантів класу приналежності «об» або «необ».

Бінарний зв'язок пов'язує дві сутності, для кожної з яких необхідно встановити свій клас приналежності. Зрозуміти, яка сутність перша, а яка друга, можна, виконавши описану вище команду «показати» для конкретного зв'язку.

Для зв'язку, у якому бере участь більше ніж дві сутності, клас приналежності встановлюється за замовчуванням як необов'язковий.

Запуск команди для встановлення значення класу приналежності можна пропустити, тому що при проектуванні БД у кожному разі виконується перевірка вхідних даних.

Результатом концептуального проектування є побудова ER-діаграми. Для виконання цієї дії передбачено таку команду:

(БД.?побудувати\_ER)

Зберегти побудовану ER-модель можна, скориставшись командою

(БД.?зберегти\_ER)

Уведемо команди для видалення сутності та зв'язку з проектованої бази даних, а також для видалення атрибутів.

Для цього передбачимо такі команди:

(сутність.?видалити)

(зв'язок.?видалити)

Відповідно, для атрибутів:

(сутність.атрибут?видалити)

(зв'язок.атрибут?видалити)

При написанні команд варто бути уважними при заповненні значень змінних, щоб уникнути помилок у роботі програми.

### ***6.1.3 Розроблення програмно-методичного комплексу для проектування баз даних з використанням предметно-орієнтованої мови***

Користувачем системи є розроблювач баз даних. Для вирішення проблеми проектування бази даних поставимо такі завдання:

імпорт онтології;

проектування БД;

виконання команд DSL;  
збереження результатів.

Онтологія повинна бути розроблена в програмному середовищі OntoStudio. Під час імпорту онтології здійснюється послідовний розбір файлу \*.obl створеної онтології предметної області, для якої потрібне проектування бази даних. Результатом імпорту є створення екземплярів класів для кожної сутності, атрибута, зв'язку, які зазначені у файлі.

Проектування БД здійснюється в три етапи: концептуальне, логічне й фізичне проектування. У програмно-методичному комплексі завдання логічного й фізичного проектування розглядаються як можливі рішення для подальшого розширення розробленої системи. Крім цього, у процес автоматизованого проектування БД необхідно включити перевірку вхідних даних, що полягає в перегляді екземплярів усіх раніше створених для бази даних класів на наявність усіх необхідних значень параметрів (клас приналежності, ступінь зв'язку) для побудови моделей БД й встановлення відсутніх значень.

Виходом концептуального проектування є зображення побудованої ER-моделі, тому необхідна реалізація завдання збереження результату.

Для вирішення поставлених завдань виділимо такі прецеденти:

- імпорт онтології;
- виконання команд DSL;
- перевірка вихідних даних;
- перевірка наявності зв'язку для кожної сутності Про;
- перевірка зв'язків на наявність кратності й класу приналежності;
- встановлення параметрів зв'язку;
- проектування БД;
- концептуальне проектування;
- логічне проектування;
- фізичне проектування;
- збереження результатів;
- збереження ER-діаграми;
- збереження опису таблиць БД;
- збереження схеми зв'язків таблиць БД.

*Розроблення діаграми класів для предметної області «Проектування бази даних» з використанням предметно-орієнтованої мови*

Формалізоване подання інформації у вигляді діаграм класів, які одержано на основі аналізу бізнес-процесу, показує структурні відносини між поняттями заданої для розроблення програмної системи предметної області.

До понять предметної області «Проектування бази даних» відносяться такі: «База даних», «Сутність», «Зв'язок», «Атрибут». Кожному поняттю відповідає окремий клас. За рахунок того, що проектування бази даних здійснюється на основі онтологічного підходу, потрібна наявність класів «Онтологія» (відповідає за операції з файлом формату \*.obl – формат опису онтології інструментом OntoStudio) і «Інтерпретатор», що виконує переклад онтології на поняття баз даних. Класи «Сутність» і «Зв'язок» містять атрибути й обидва включені в клас «База даних», тому зробимо їх



спадкоємцями нового класу «Елемент БД» для спрощення діаграми, при цьому спадкоємці зв'язані між собою асоціацією «зв'язує». Клас «Атрибут» є базовим для спадкоємців «Простий\_атрибут» і «Ключ», який у свою чергу підрозділяється на «Первинний» і «Вторинний». Таким чином, одержано діаграму класів, наведену на рис. 6.5.

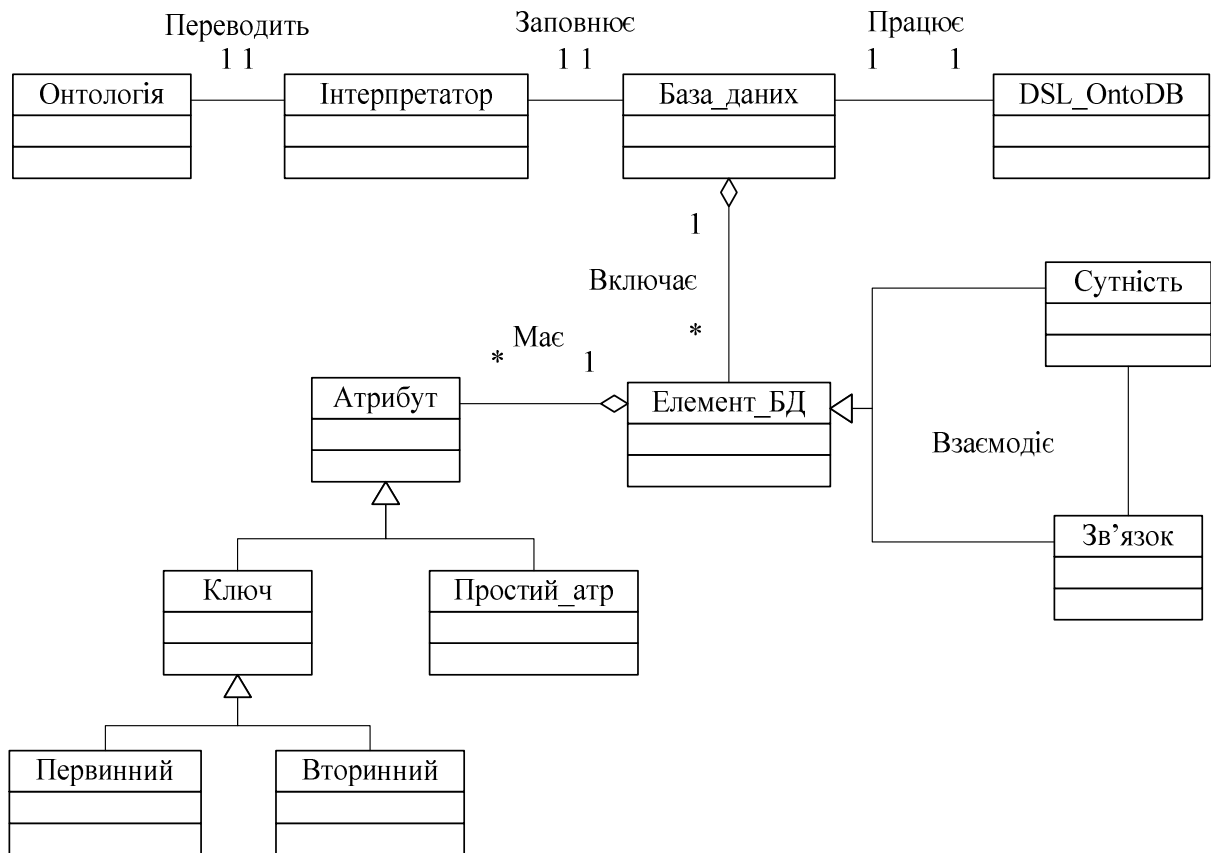


Рисунок 6.5 – Діаграма класів предметної області «Проектування баз даних»

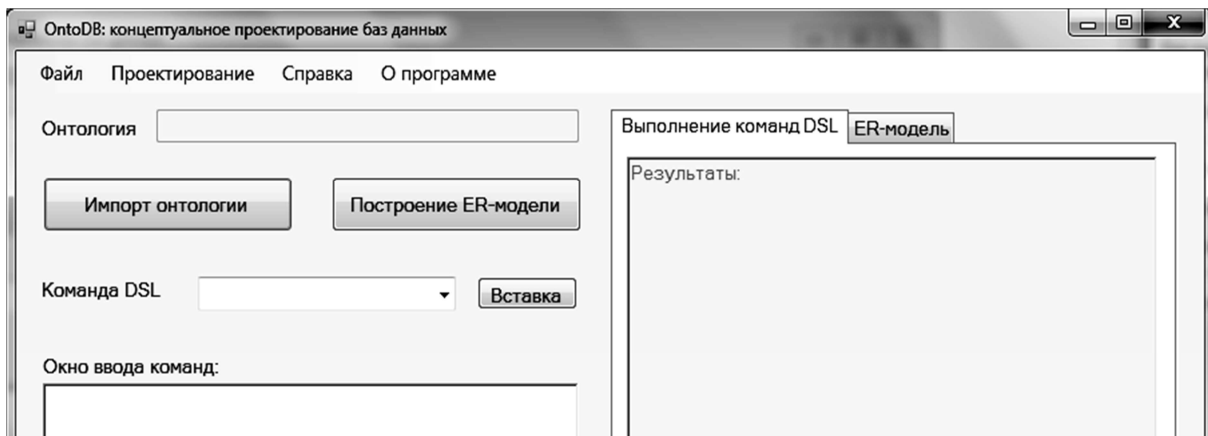
*Розроблення структури інтерфейсу ПМК для проектування баз даних з використанням онтології й DSL*

Інтерфейс програмного забезпечення містить у собі такі елементи:

- головне меню;
- текстове поле для відображення імпортованої онтології;
- кнопка для виведення діалогового вікна відкриття (імпорту) файлу онтології;
- кнопка для запуску процесу побудови опису ER-моделі;
- текстове поле зі списком, що випадає, для введення команд DSL для проектування БД; кнопка для вставлення обраної команди DSL у вікно введення команд і проведення дій за відповідною командою; багаторядкове текстове поле для ведення журналу введення команд DSL для проектування БД;
- закладка з багаторядковим текстовим полем для подання текстового результату виконання команд DSL для проектування БД;

зкладка з багатостроковим текстовим полем для подання опису ER-моделі.

Інтерфейс головної форми програмно-методичного комплексу для проектування баз даних із використанням онтології й предметно-орієнтованої мови наведено на рис. 6.6.



*Рисунок 6.6 – Інтерфейс головної форми програмно-методичного комплексу для проектування баз даних з використанням DSL*

Вхідними даними для розроблюваного програмного продукту, що дозволяє виконувати концептуальне проектування бази даних з використанням предметно-орієнтованої мови, є онтологія у вигляді файлу формату \*.obl.

Для роботи над онтологією використовується інструмент OntoStudio.

Коротко розглянемо структуру онтології, з якою оперує OntoStudio. Ядром онтології є ієрархія концептів (класів – у редакторі OntoStudio). Ієрархічні відносини відповідають типу «род-вид» і використовуються в механізмах спадкування. Для опису інших, неієрархічних, типів зв'язків між концептами призначені бінарні відносини. Концептам приписуються атрибути, розглянуті як відносини певного типу між концептом і значенням.

У якості прикладу вхідних даних ПМК побудуємо онтологію понять предметної області «Школа», при цьому розглянемо аспект обліку всіх учнів школи. Було виділено три концепти предметної області «Школа» в аспекті обліку учнів: «Учень», «Клас» і «Класний керівник». Кожний з них має свої атрибути. Для концепту «Учень» установлене відношення «Вчиться» з концептом «Клас», що має свої атрибути: «Дата вступу» й «Дата закінчення». Установлено інверсне відношення «Поєднує». Для концепту «Клас» установлене відношення «Призначений» з концептом «Класний керівник», що має як атрибут параметр «Дата призначення». Також установлене інверсне відношення «Призначається».

Проілюструємо приклад створення онтології, описаної вище, за допомогою інструмента OntoStudio.

У проєкті створюємо онтологію «<http://www.Школа.org/> Учні\_в\_школі». Ім'я онтології повинне бути унікальним у глобальному прос-

торі імен, воно задається у вигляді URL, але це не посилання на веб-сторінку. Інформація про онтології зберігається у файлі «Учні\_в\_школі.obl».

Використовуючи навігатор онтології Ontology navigator, що має вигляд дерева, створюються концепти ПрО в галузі «Classes». Для кожного концепту визначаються його атрибути й відношення на вкладці Entity properties у таблиці. До неї заносяться ім'я атрибута, його тип (наприклад, string, date, int), мінімальна й максимальна потужність для одного екземпляра концепту. Відношення в інструменті OntoStudio визначається як атрибут концепту, у якості типу атрибута встановлюється ім'я того концепту, з яким будується це відношення.

Вкладку визначення атрибутів концепту «Учень» наведено на рис. 6.7.

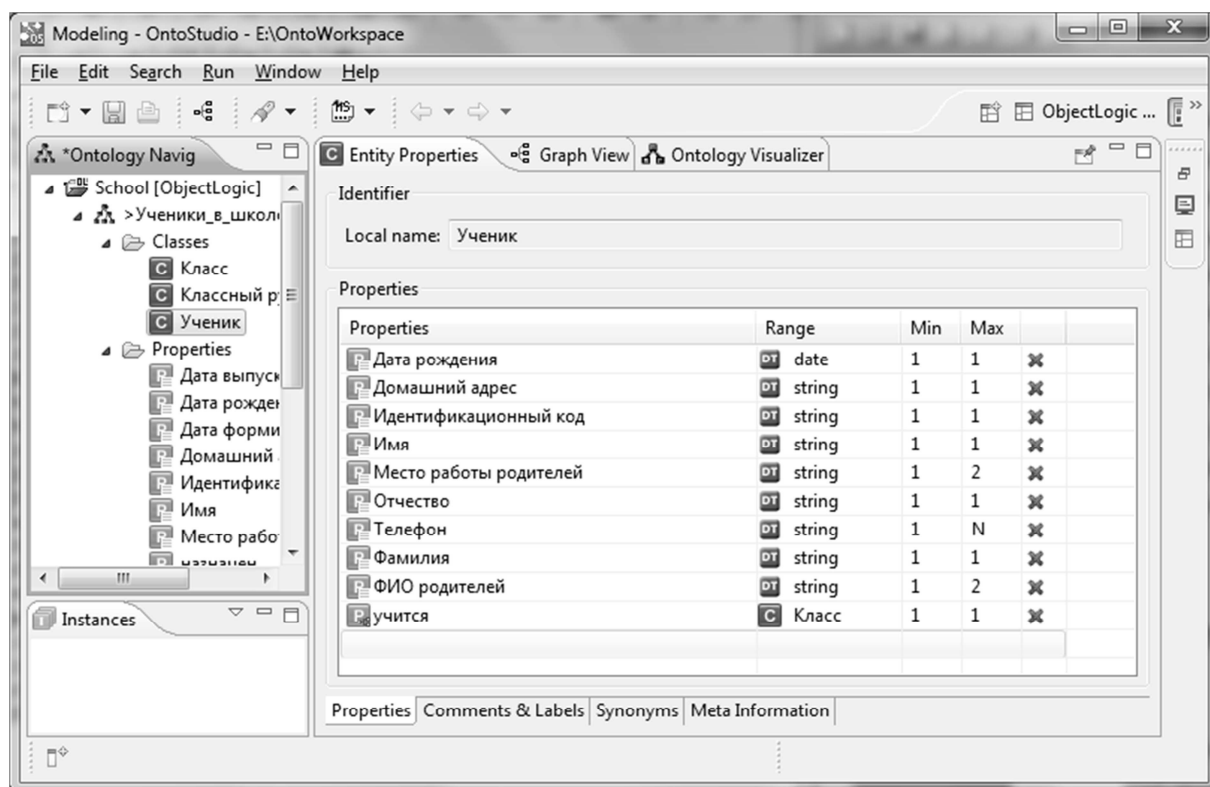


Рисунок 6.7 – Атрибути концепту «Учень» предметної області «Школа»

Атрибути відношення встановлюємо через дерево онтології: обираємо галузь Properties, для атрибута з ім'ям відношення створюємо його атрибут.

Дерево онтології зі списками концептів (галузь Classes), атрибутів і відношень (галузь Properties) наведено на рис. 6.8.

Після створення концептів, їхніх атрибутів і відношень між концептами, редактор OntoStudio дозволяє створювати екземпляри концептів (визначати інтерпретацію концептів онтології) і дані зазначених екземплярів. Даними екземпляра є атрибути й посилання (відношення) на екземпляри інших концептів. Після заповнення онтології екземплярами концептів і формування їхніх даних стає можливим здійснювати виконання запитів.

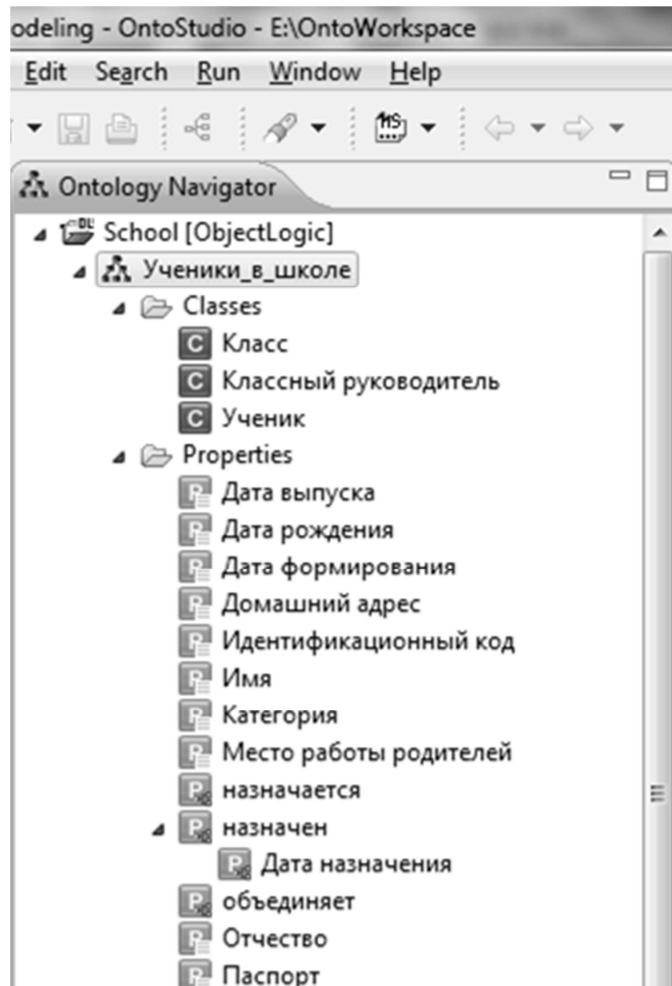


Рисунок 6.8 – Дерево онтології «Учні\_в\_школі»

Але для тестового випробування ПМК достатньо вже побудованої ієрархії концептів, атрибутів і відношень.

Редактор OntoStudio містить засоби для створення мережі понять, щоб наочно продемонструвати концепти й відношення між ними. У дереві навігації правою кнопкою миші натискаємо на ім'я онтології й обираємо з контекстного меню пункт Visualize Ontology. У мережу, що буде подано на відповідній вкладці, можна також включити атрибути концептів (рис. 6.9).

*Результати роботи програмного продукту «OntoDB: концептуальне проектування бази даних»*

Основним завданням розробленого ПП є виконання опису ER-моделі (початкового етапу проектування баз даних) на основі даних, отриманих з онтології, імпортованої у вигляді файлу з розширенням \*.obl.

Імпорт онтології можна виконати двома способами: за допомогою підпункту «Імпортувати онтологію» пункту «Файл» головного меню програми (рис. 6.10) або натисканням на кнопку «Імпорт онтології».

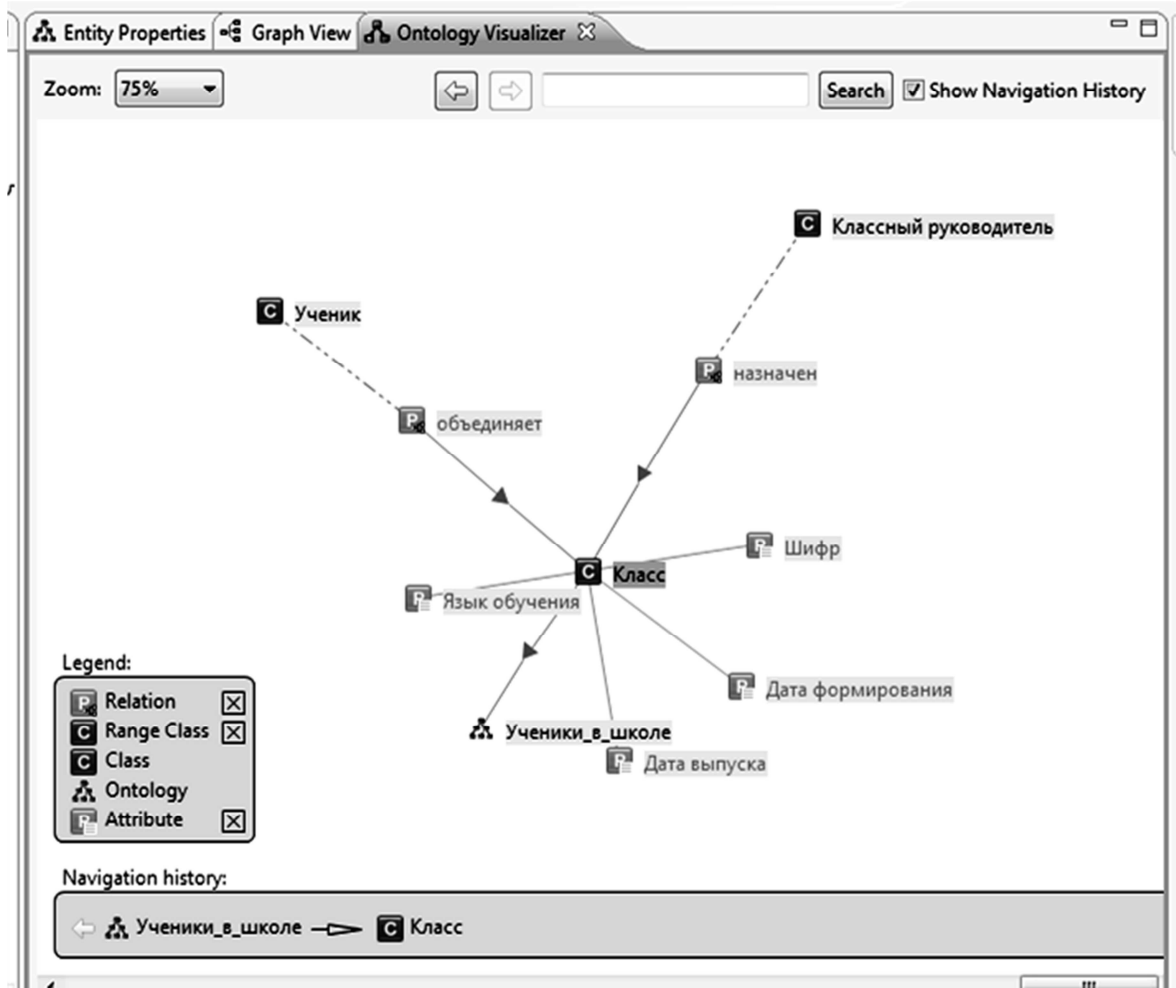


Рисунок 6.9 – Мережа понять предметної області «Школа» в аспекті обліку учнів

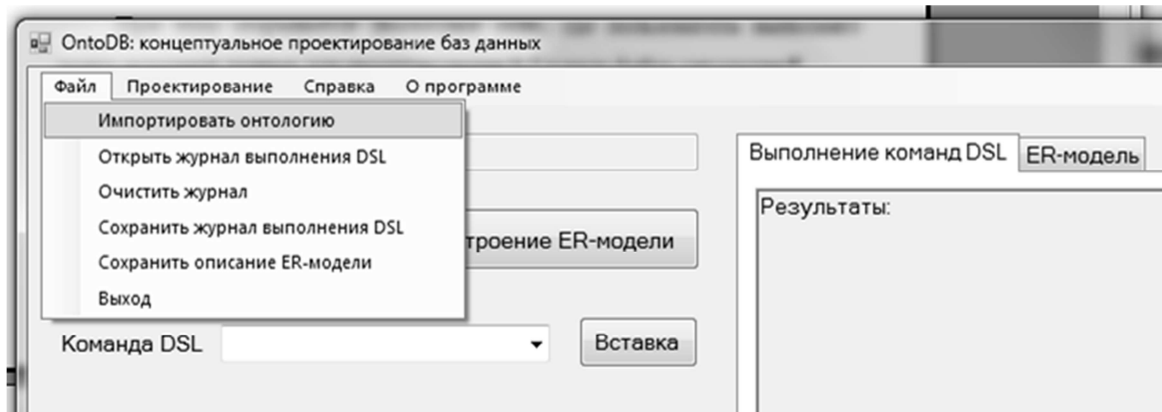


Рисунок 6.10 – Пункт «Файл» головного меню ПП «OntoDB»

При цьому відкривається діалогове вікно, де користувач виконує пошук вхідних даних для проектування БД у вигляді файлу онтології.

У результаті вибору файлу з розширенням \*.obl у текстове поле для відображення імпортованої онтології міститься рядок із вказівкою шляху по директоріях. На цьому етапі відбувається ініціалізація об'єктів елементів БД у результаті послідовного аналізу поданого файлу.

Про успішне завершення імпорту онтології свідчить повідомлення, що з'являється, яке наведено на рис. 6.11.

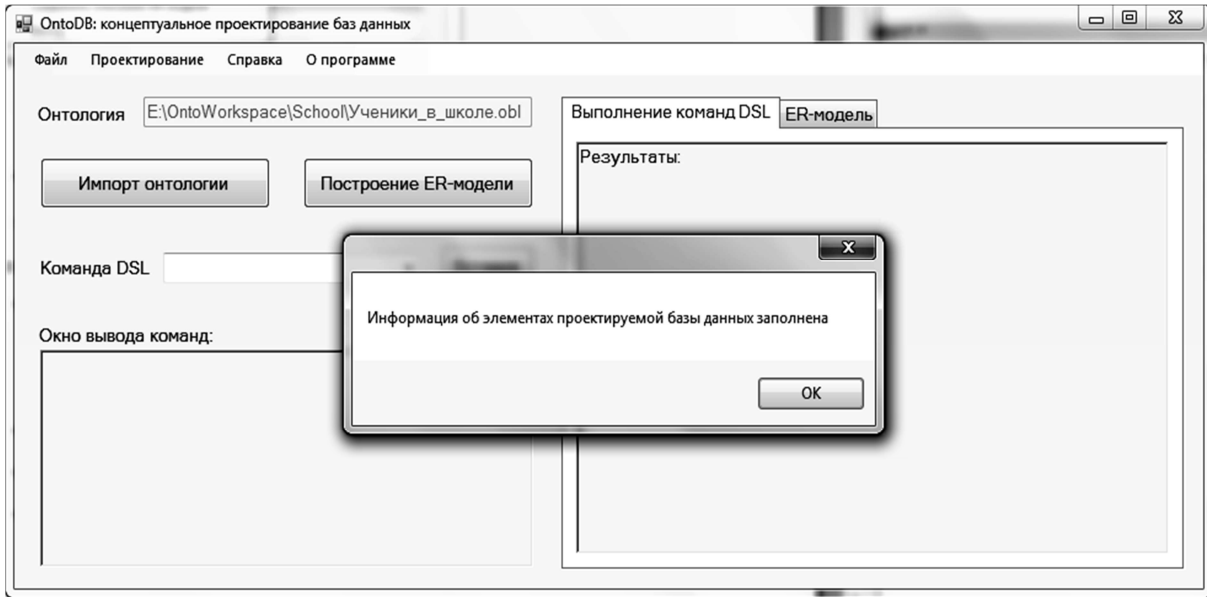


Рисунок 6.11 – Повідомлення про завершення імпорту онтології

Коли відомості про елементи проектованої БД отримано, можна одержати опис ER-моделі. Для цього можна натиснути кнопку «Побудова ER-моделі», вибрати підпункт «Проектування» – «Концептуальне проектування» – «Побудувати ER-модель» або ввести команду DSL (БД.?побудувати\_ER).

Якщо онтологія ще не імпортована в програмний продукт, то при ініціації виконання дій із БД буде з'являтися відповідне повідомлення (рис. 6.12).

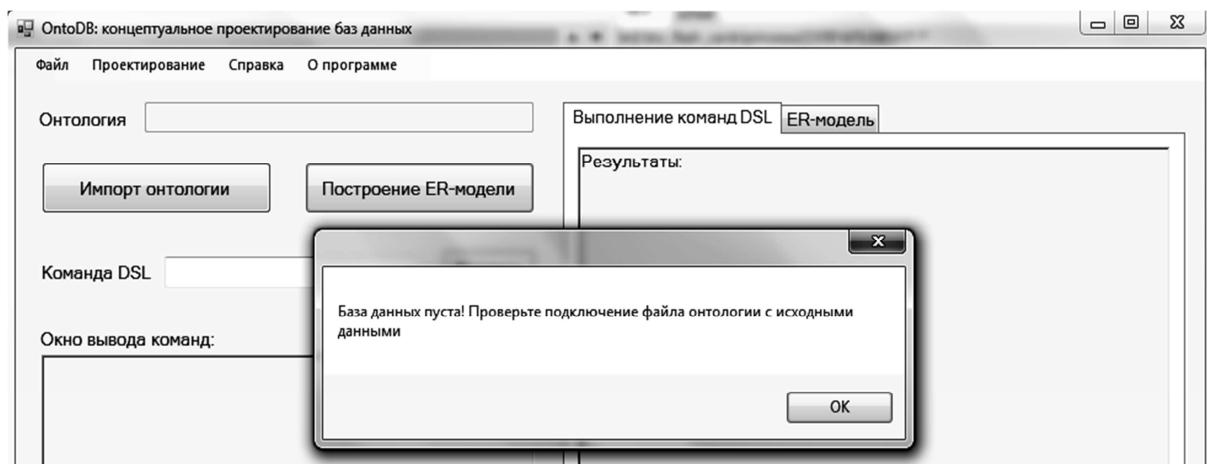


Рисунок 6.12 – Повідомлення про відсутність імпортованих вихідних даних

Перед виконанням опису ER-моделі відбувається перевірка вхідних даних: перевірка наявності зв'язку для кожної сутності предметної області,

описаної в онтології; перевірка зв'язків на наявність кратності й класу приналежності.

Якщо не всі сутності є учасниками зв'язків БД, то вони не беруть подальшої участі в процесі проектування й інформація про них видаляється.

Якщо під час перевірки виявляється відсутність параметрів зв'язку, то опис ER-моделі не виконується. Замість цього користувач одержує повідомлення з інформацією про відсутні параметри. Встановлення таких параметрів можна виконати за допомогою відповідних команд DSL:

(зв'язок.?встановити\_кратність="К")

(зв'язок.?встановити\_приналежність1="КП")

(зв'язок.?встановити\_приналежність2="КП")

При цьому треба не забути встановити ім'я зв'язку, для якого потрібне виконання додаткових дій за допомогою команди (зв'язок="W").

При успішному завершенні перевірки опис ER-моделі з'являється в багаторядковому текстовому полі на закладці «ER-модель». Приклад такого опису наведено на рис. 6.13. Його можна зберегти, вибравши підпункт головного меню «Файл» – «Зберегти опис ER-моделі», після чого вказати директорію й ім'я файлу. За замовчуванням призначено розширення текстового файлу \*.er.

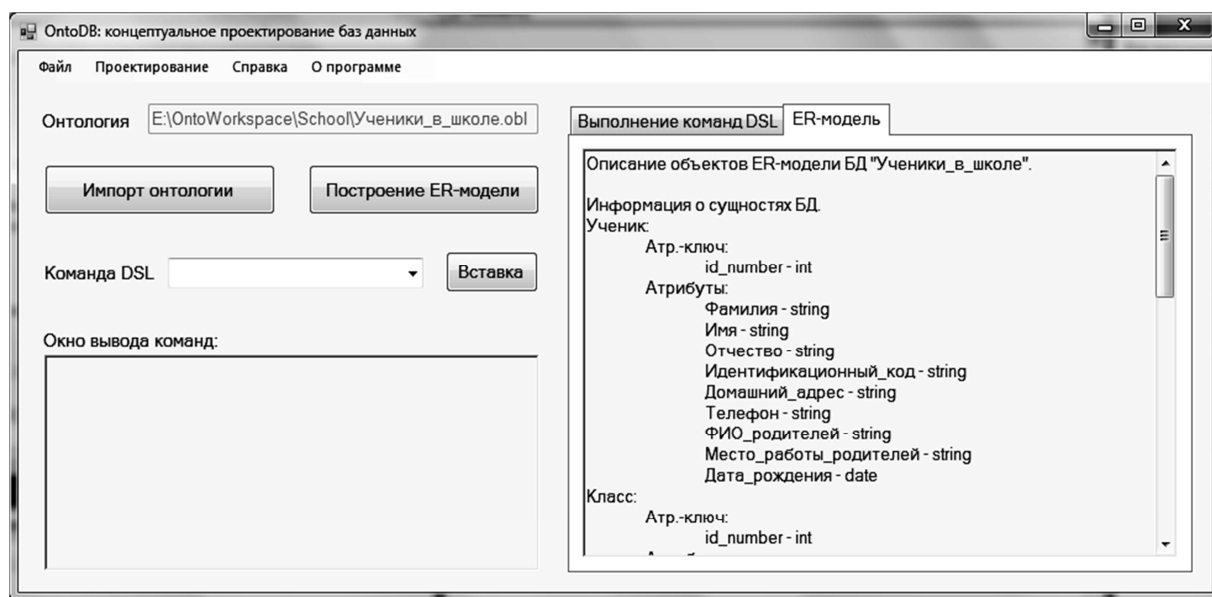


Рисунок 6.13 – Приклад результату виконання опису ER-моделі БД

Якщо опис моделі ще не складено, тобто текстове поле на закладці «ER-модель» порожнє, діалогове вікно для збереження не відкриється. Користувач буде проінформований про те, що опис відсутній.

Розроблений програмний продукт OntoDB включає DSL, поданий 27 командами, результати виконання яких записуються в багаторядкове текстове поле на закладці «Виконання команд DSL».

При написанні команд у текстове поле списку, що випадає, формується підказка для коректного введення (рис. 6.14).

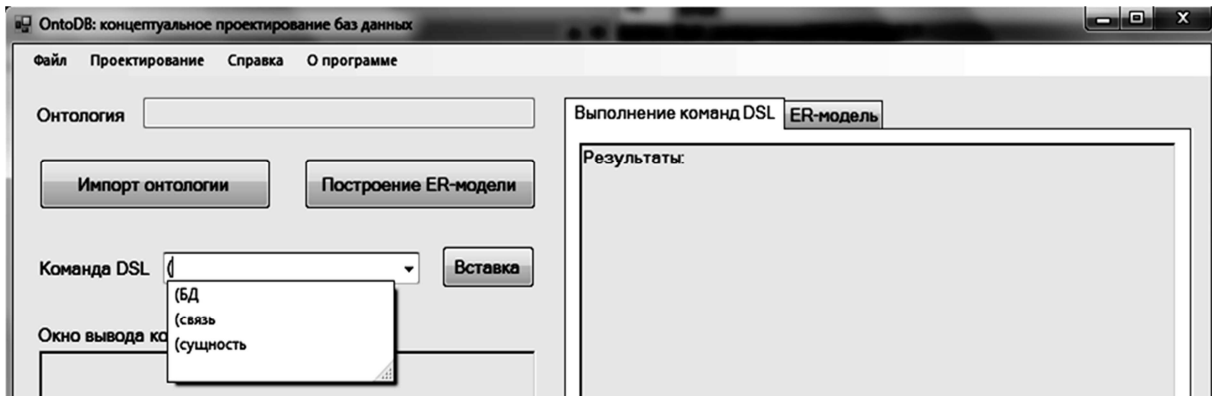


Рисунок 6.14 – Формування підказки для коректного уведення команд DSL

У головному меню передбачено підпункти для відкривання й збереження журналу виконання DSL (\*.lgdsl), а також для очищення текстового поля цього журналу.

Головне меню містить підпункт «Файл» – «Вихід» для ініціації завершення роботи програми.

Виконаємо команди перегляду сутностей і зв'язків БД, які були ініційовані під час імпорту на основі аналізу рядків файлу онтології:

(БД.?показати\_сутність)

(БД.?показати\_зв'язок)

Результат виконання відображається у відповідному текстовому полі (рис. 6.15).

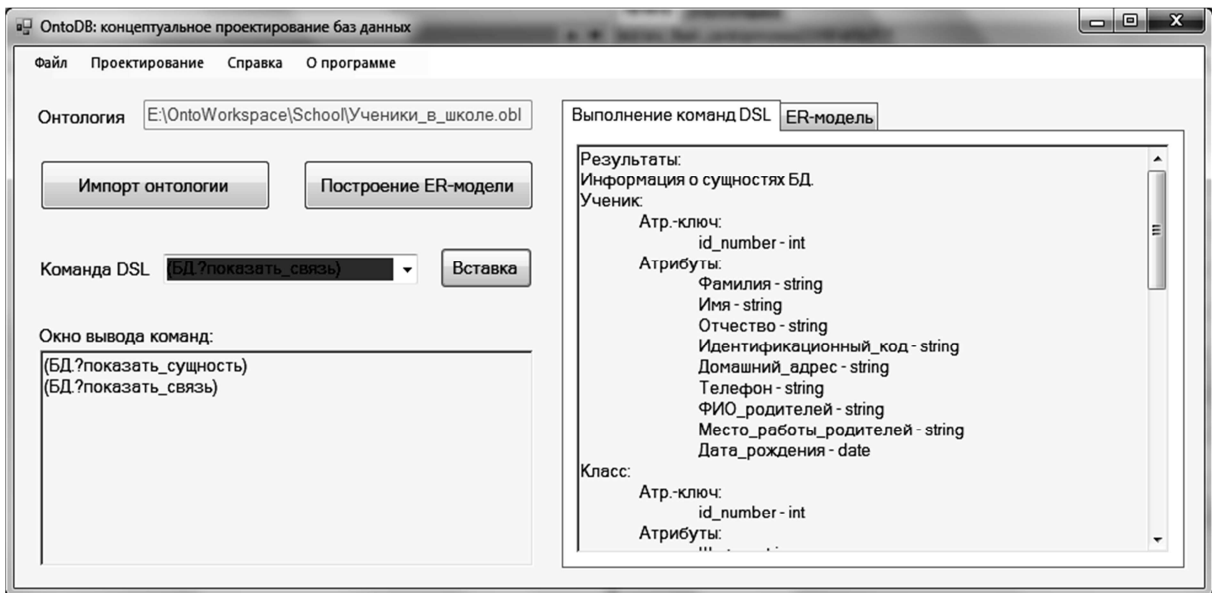
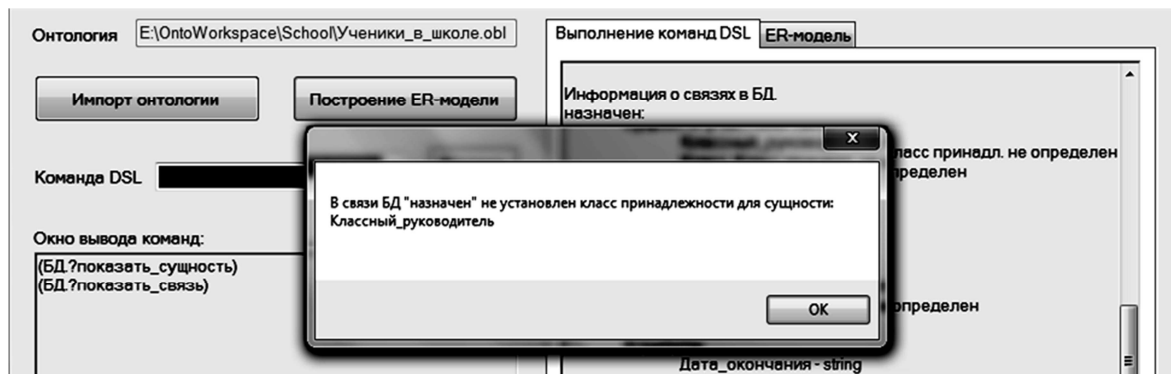


Рисунок 6.15 – Вид головної форми інтерфейсу ПП із результатами виконання команд DSL

Завершимо етап проектування побудовою опису ER-моделі.

Натискаємо на кнопку «Побудова ER-моделі». Одержуємо повідомлення, наведене на рис. 6.16.





*Рисунок 6.16 – Повідомлення про недостатність параметрів для виконання побудови ER-моделі*

Виконуємо команди DSL для встановлення відсутнього параметра класу приналежності. Для цього виконуємо команди (зв'язок="призначений") (зв'язок.?встановити\_приналежність2="необ"). Після натискання на кнопку «Побудова ER-моделі» опис моделі з'являється у відповідному полі.

Робимо висновок, що використання онтологічного підходу в цій роботі застосовано до автоматизації проектування баз даних, а розроблений DSL дозволяє виконувати операції над уже інтерпретованими об'єктами БД.

У якості напрямків подальших досліджень можна виділити такі:

- автоматизація графічної побудови ER-моделі як результату концептуального проектування баз даних;
- використання при проектуванні баз даних онтологій форматів RDF, OWL, XML;
- розширення предметно-орієнтованої мови (DSL) для завдань логічного й фізичного проектування.

## **6.2 Вибір технологій динамічного обміну даними для компонентів інтегрованої САПР у багатозадачних операційних системах**

У сучасних САПР складних виробів, таких, наприклад, як механічні конструкції зі складною геометрією робочих поверхонь, при проектуванні виробу й технологічних процесів його виготовлення потрібна організація багатомодульного програмного комплексу з різномірною функціональністю його модулів і бібліотек функцій [18]. При цьому ставляться різні вимоги до форматів даних, що оброблюються та візуалізуються у рамках відповідних інформаційних технологій і алгоритмічного забезпечення [19]. У розглянутих предметно-орієнтованих САПР частина модулів або їхніх компонентів зазвичай вже реалізовані на досить високому рівні розроблювачами, що є лідерами у відповідних сегментах ринку програмного забезпечення.

Для вирішення конкретного науково-технічного завдання розроблювачам предметно-орієнтованих САПР необхідно зосередитися на розробленні алгоритмів розрахунків, проектування й виготовлення обмеженого класу виробів зі складною геометрією. При цьому до складу САПР потрібно інтегрувати необхідні для підтримання рішення науково-технічного завдання модулі й компоненти [20].

Вирішення питання комплексування програмного забезпечення на основі статичного обміну даними шляхом запису й читання з файлів даних, що перебувають у відповідних форматах зберігання, за допомогою системних викликів операційних систем є найгіршим, тому що знижує продуктивність програмного комплексу й апаратно-програмної платформи в цілому. Такий механізм обміну може привести до тупиків і нескінченних очікувань потоків, що змагаються за ресурси, до виникнення виняткових ситуацій або помилок при конвертації типів даних [21]. Часто виникає необхідність розроблення додаткових модулів – драйверів доступу й конверторів типів. Правильним рішенням є динамічний обмін даними між процесами, які функціонують паралельно і забезпечують роботу САПР.

Метою цього підрозділу роботи є аналіз й обґрунтування вибору існуючих технологій динамічного обміну даними в багатозадачних операційних системах для компонентів інтегрованої САПР, на прикладі реалізації таких технологій в операційних системах (ОС) лінійки Windows.

Розглянемо склад інтегрованої САПР, наведений у вигляді фрагмента класифікаційної схеми її компонентів на рис. 6.17.



Рисунок 6.17 – Склад інтегрованої САПР у вигляді фрагмента класифікаційної схеми її компонентів

Кожен запущений додаток, що є екземпляром виконуваного файлу, наприклад, CAD-системи типу SolidWorks, системи інженерних розрахунків типу ANSYS, пакета символічної математики й моделювання типу MatLAB або СКБД типу MySQL, є з погляду ОС процесом (іноді – декількома), у рамках якого паралельно виконуються кілька потоків.

Відомо [22], що в багатозадачних ОС, у тому числі у Windows, процеси мають ізольовані адресні простори виділеної їм пам'яті, тому передавання покажчиків на структури даних від процесу до процесу не має сенсу. Обмін даними між процесами вимагає застосування спеціалізованих технологій і об'єктів ОС.

Розглянемо онтологію технологій ОС, що забезпечують динамічний обмін даними між процесами (потокami різних процесів) і об'єктів, що забезпечують цей обмін. На рис. 6.18 наведено її елементи.

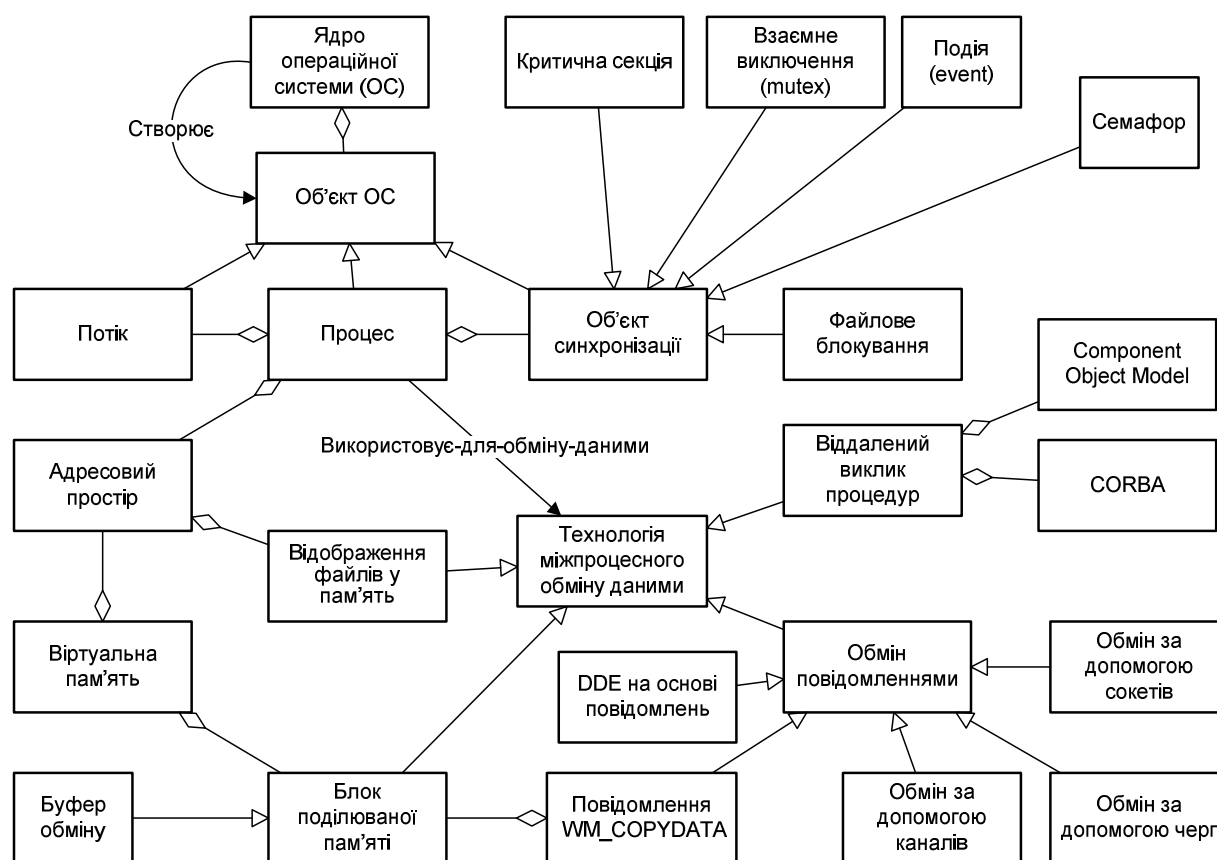


Рисунок 6.18 – Онтологія об'єктів операційної системи й технологій динамічного обміну даними між паралельно виконуваними процесами

До розглянутих у складі наведених на рис. 6.18 технологій включено технології трьох великих груп [23]: на основі використання механізму віртуальної пам'яті ОС (блоки поділюваної процесами пам'яті, відображення файлів у адресний простір пам'яті процесів (memory-mapped files)); на основі обміну повідомленнями (обмін даними за допомогою каналів (pipes), сокетів, черг повідомлень); з використанням віддаленого виклику процедур (remote procedures call – RPC), на якому засновані, зокрема, технології

Component Object Model (COM) і CORBA. Ці різновиди технологій динамічного обміну даними доповнено також характерними для Windows механізмами: dynamic data exchange – DDE, заснованим на технології обміну повідомленнями; посиланням й обробленням повідомлення WM\_COPYDATA, під час якого ОС організує для потоків, що обмінюються, блок поділюваної пам'яті; використанням буфера обміну (clipboard).

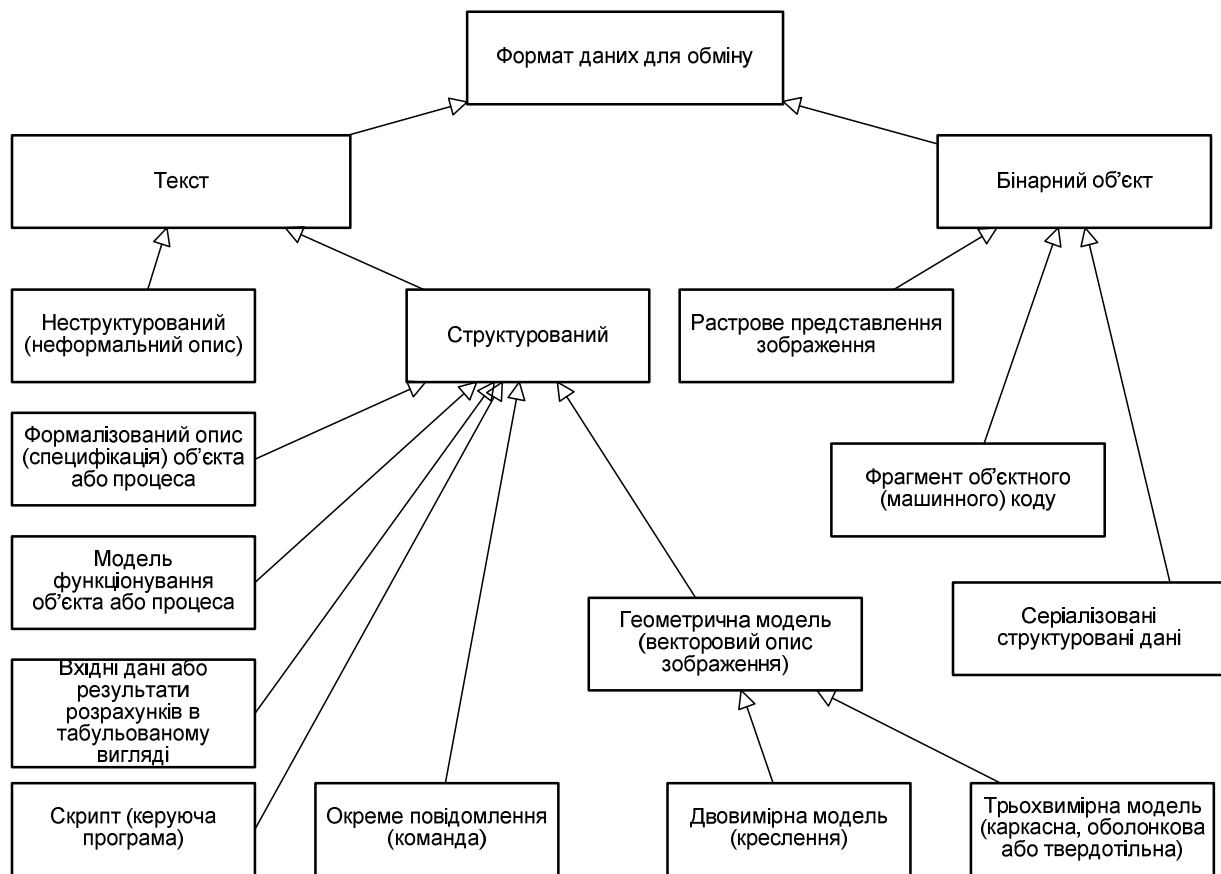
Крім того, важливою функціональною можливістю, що надається сучасними ОС, є запуск із поточного процесу (наприклад, інтеграційного модуля предметно-орієнтованої САПР) дочірнього процесу й обмін даними з ним за допомогою стандартних засобів консолі введення-виведення.

Також для обміну даними між батьківським і дочірнім процесами можливе використання безіменних каналів. Канали такого типу не мають засобів найменування, тому доступ до них можливий тільки за допомогою успадкованих процесами дескрипторів [24]. Однак для використання такої технології динамічного обміну дочірній процес повинен мати засіб читання-запису в цей канал, що може бути передбачено тільки розробниками інтегрованої САПР. Таким чином, ці способи обміну можливі лише для знову розроблювальних модулів.

Часто важливою складовою частиною інтегрованої САПР може бути додаток, який через технічні причини, обумовлених політикою розробників або операційним оточенням програмного комплексу, не має API у вигляді бібліотек динамічного компонування або СОМ-інтерфейсу. Для такого додатка прийнятною формою взаємодії з ним є посилання повідомлень діалоговому вікну (вікнам) додатка з інтеграційного модуля. Повідомлення можуть бути надіслані шляхом системних викликів, наприклад, за допомогою функцій WinAPI SendMessage або PostMessage або за допомогою високорівневих бібліотечних функцій засобу розроблення (або методів класів з відповідної ієрархії) [25].

Реалізація технологій поділюваної пам'яті для завдань інтеграції модулів і динамічного обміну даними між додатками може бути виконана й з використанням буфера обміну. Достоїнством такого підходу є відсутність необхідності в спеціальних заходах з боку процесу-сервера, що виконується асинхронно з процесом-клієнтом. Для реалізації відповідного обміну можна застосувати технологію обміну повідомленнями, розглянуту раніше.

У кожній з технологій є особливості організації, достоїнства й недоліки застосування, фізичні обмеження на обсяг даних або пропускну здатність каналу обміну, необхідність в об'єктах синхронізації загального призначення або наявність убудованих механізмів синхронізації. Вибір тієї або іншої технології динамічного обміну даними між паралельно виконуваними процесами визначається не тільки особливостями функціонування апаратно-програмної платформи, використовуваної для організації інтегрованої комплексної САПР. Вибір технології повинен бути зроблений на основі особливостей формату переданих даних, їхнього обсягу й частоти обміну даними. На рис. 6.19 наведено таксономію можливих форматів і семантики даних для динамічного обміну між компонентами САПР.



*Рисунок 6.19 – Таксономія можливих форматів і семантики даних для динамічного обміну між компонентами САПР*

Необхідно відзначити, що технології обміну за допомогою сокетів, каналів, DDE, RPC дозволяє виконувати обмін даними або функціональністю в локальній мережі [24]. Це є важливою особливістю при розподіленій архітектурі САПР.

Така таксономія представляє розмаїтість структур і типів даних, якими можуть обмінюватися компоненти інтегрованої САПР. Так, для інформаційного підтримання конструкторів і технологів під час аналізу прототипів або аналогів, вибору з ряду альтернатив потрібен інтенсивний обмін неструктурованими текстовими описами й растровими або векторними зображеннями. Результатом аналізу може стати формалізований опис (специфікація) об'єкта або процесу у вигляді тексту або у вигляді діаграми (векторної графіки), що повинен бути переданий у вигляді ескізів або IDEF-діаграм у різні модулі САПР для подальшого пропрацювання й деталізації.

Для проведення розрахунків або подальшого моделювання можуть бути передані вхідні дані або результати розрахунків у табульованому вигляді як структурований текст. Від CAD-системи іншим модулям САПР будуть потрібні згенеровані геометричні моделі об'єкта проектування у вигляді тривимірної моделі (каркасної, оболонкової або твердотільної) або у вигляді двовимірної моделі, тобто кресленника. Модель функціонування об'єкта або процесу у вигляді структурованого тексту може бути використана для проведення розрахунків й імітаційного моделювання. Прикладом

таких моделей є описи SIMULINK- або ANFIS-моделей у MatLAB. Об'єктом обміну також можуть бути двійкові файли спеціалізованих форматів (файли моделей, розроблених у AutoCAD, SolidWorks, PowerSHAPE), звертання до API програмних комплексів як за допомогою технології COM, так і шляхом виклику бібліотечних функцій або функцій драйверів. Можливе також передавання скриптів (керівних програм) у виконавчі модулі САМ-систем або подавання окремих команд програмам з використанням DDE або окремих повідомлень.

Таким чином, ухвалення рішення про застосування тієї або іншої технології обміну повинне базуватися на глибокому знанні можливостей і технологічних особливостей реалізації таких технологій, на функціональних можливостях й інформаційних потребах кожного компонента інтегрованої САПР і на результатах проектування потоків даних у рамках такої САПР.

Правильна організація потоків даних між компонентами САПР має на увазі умову, що не повинні виникати такі явища: нестача ресурсів (пам'яті, дискового простору, блокування необхідних об'єктів), відсутність необхідних вхідних даних, небажаний вплив різних операцій введення-виведення й транзакцій один на одного. Це вимагає синхронізації роботи потоків різних процесів, що в сучасних ОС виконується з використанням спеціальних об'єктів очікування (у Windows – це критичні секції (critical section), взаємні виключення (mutex), події (event), семафори (semaphore) і файлові блокування (files lock)) [23; 25]. Також об'єктами очікування можуть бути дочірні потоки й процеси (потік може очікувати їх завершення). Безпосереднє очікування на об'єктах синхронізації в потоці виконується з використанням системних викликів (для Windows – це виклик функцій WaitForSingleObject й WaitForMultipleObjects) [25; 26]. Очікування потоку закінчується, якщо об'єкт синхронізації переходить у сигнальний стан.

Особливості синхронізації за допомогою деяких з розглянутих об'єктів для потоків різних процесів розглянуті у вигляді схем, наведених на рис. 6.20, .21.

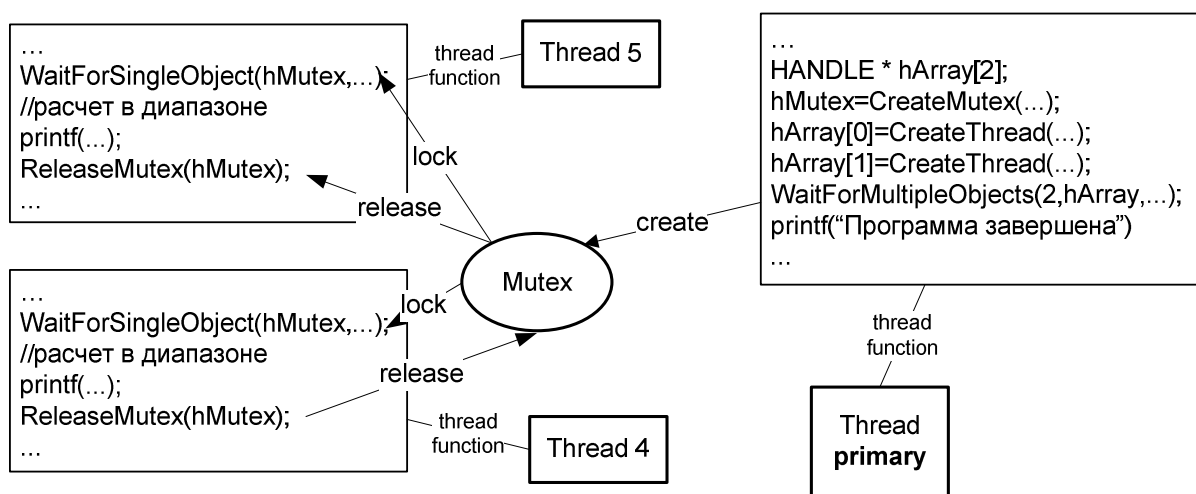


Рисунок 6.20 – Схема створення й взаємодії потоків і взаємного виключення

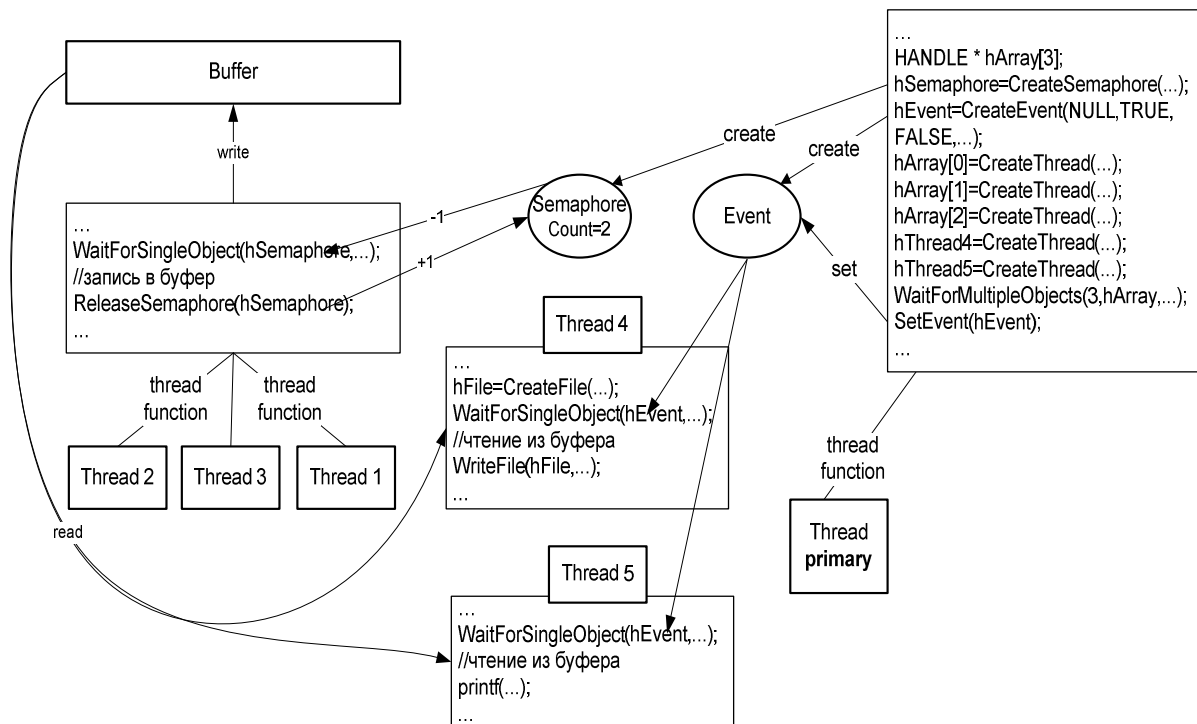


Рисунок 6.21 – Схема створення й взаємодії потоків, події й семафора

Далі на схемі, наведеній на рис. 6.22, показано практичні приклади синхронізації між потоками різних процесів (компонентів САПР) під час обміну даними з використанням файлу, відображуваного в пам'ять.

Аналіз цих схем із фрагментами листінга показує таке: взаємне виключення може бути використане для блокування будь-якого ресурсу на час його використання одним потоком; подія дозволяє подати сигнал на продовження роботи відразу групі потоків, що очікують на цьому об'єкті; семафор дозволяє обмежити кількість потоків, що працюють одночасно, за умови звертання цих потоків до такого семафора.

## Висновки за розділом 6

1. Пропонується виконувати розроблення предметно-орієнтованих мов (Domain Specific Language – DSL) для підсистем спеціалізованих САПР на основі видозміненої загальної онтології предметної області. Реалізовано приклад використання онтологічного підходу й DSL для розроблення програмно-методичного комплексу проектування реляційних баз даних. При цьому розроблено онтологію об'єктів області проектування баз даних і на її основі – DSL для виконання операцій процесу концептуального проектування баз даних. Розроблено логічну модель програмно-методичного комплексу, виконано реалізацію й дослідження можливостей програмного комплексу.

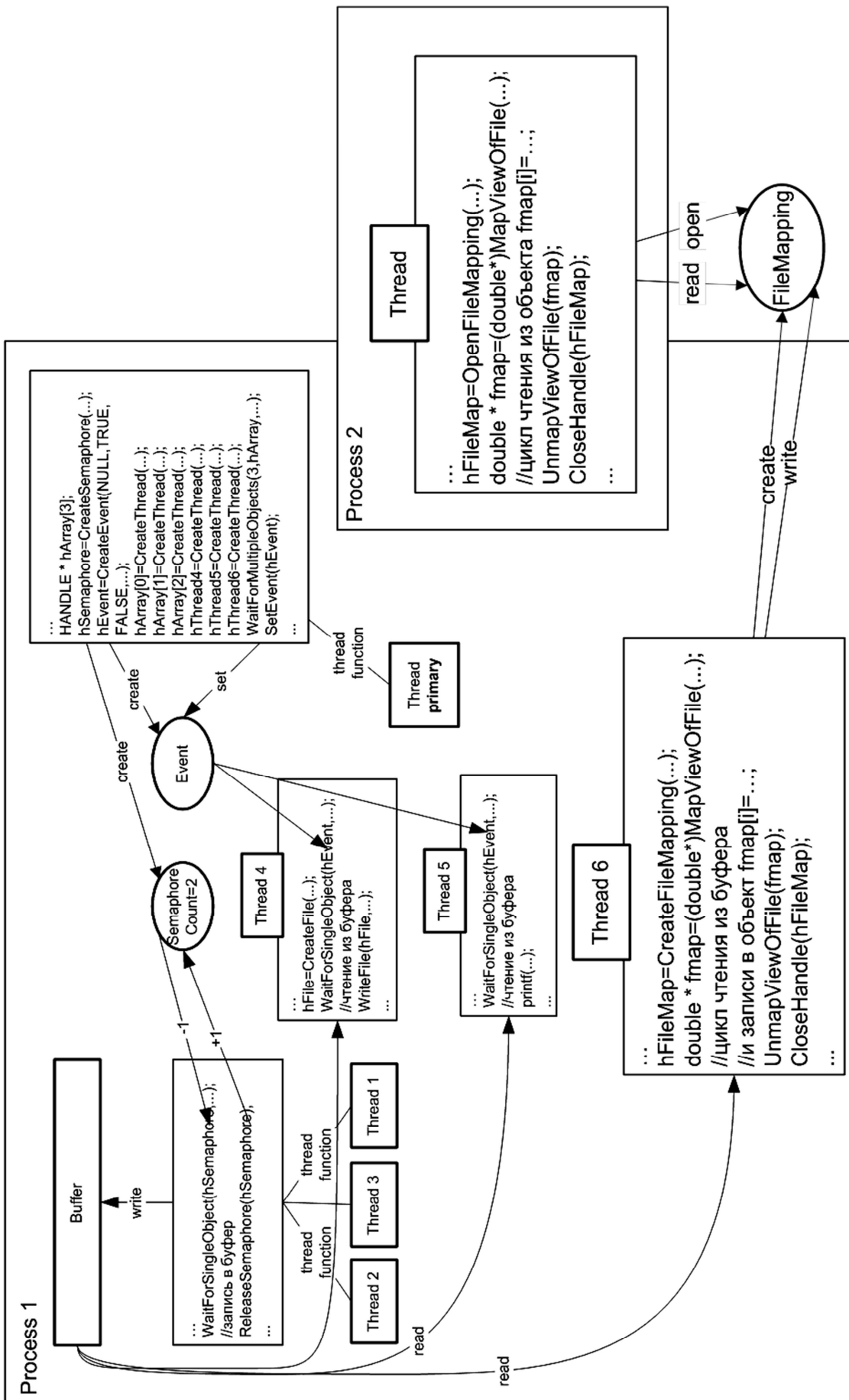


Рисунок 6.22 – Схема створення й взаємодії потоків, процесів й об'єкта файлового відображення



Результати дослідження показали, що використання онтологічного підходу під час розроблення DSL дозволило обґрунтовано визначити необхідний перелік службових слів і виразів, що забезпечило відповідну виразність мови для доступу до потрібної функціональності програмного комплексу.

2. Аналіз існуючих технологій і форматів обміну даними між процесами та програмними комплексами показав, що вибір технології динамічного обміну даними між паралельно виконуваними процесами визначається такими критеріями: функціональними можливостями й інформаційними потребами кожного компонента інтегрованої САПР; результатами проектування потоків даних у рамках такої САПР; особливостями функціонування апаратно-програмної платформи, використовуваної для організації інтегрованої комплексної САПР; особливостями формату переданих даних, їхнього обсягу й частоти обміну.

3. Правильна організація потоків даних між компонентами САПР повинна забезпечувати продуману й адекватну синхронізацію роботи потоків різних процесів, що в сучасних ОС виконується з використанням спеціальних об'єктів очікування. Така синхронізація повинна виключити явища взаємного блокування та змагань за ресурси, а також гарантувати доступ до необхідного для компонентів САПР інформаційного забезпечення.

### Список використаних джерел

1. Kozík T. Preparing and managing the remote experiment in education / T. Kozík, M. Šimon // ICL 2012: 15th International Conference on Interactive Collaborative Learning. – Villach, Austria: CORDIS, 2012. – P. 1–4.

2. Arras P. CAM-offline preparation and checking of tool path for first-time right manufacturing complex shapes / P. Arras, C. Peeters, C. Verheyen // In Kadnar, M. (Ed.), New trends in design and technical documentation creation (Nitra, Slovak Republic, 23 May 2013). – Nitra : Slovak university of agriculture, 2013. – P. 14–18.

3. Van Merode D. Use of state of the art ECAD design tools in high innovative studies / D. Van Merode, P. Arras, J. Van Bauwel // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: 12-th Intern. Conf. «CADSM'2013», 19-23 February 2013, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine : proc. – Lviv, 2013. – P. 72–79. – ISBN 978-617-607-393-2.

4. Arras P. State of the art mechanical design requires state of the art solutions / P. Arras, C. Peeters, D. Van Merode // Innovatsion Texnologiyalar. – 2012. – V. 3. – P. 3–8.

5. Braem A. Coatings for long lasting bone implants / A. Braem, J. V. Humbeeck // 10th Annual Research Meeting of KU Leuven MRC. – Leuven: MRC, 2016. – P. 7–8.

6. Сагайда П. И. Методика и информационная технология проектирования грамматик DSL на основе онтологического описания предметной области / П. И. Сагайда, Ю. П. Тютюнник // Advanced Information Systems and Technologies: тези доповідей I міжнародної науково-практичної конференції. – Суми : Видавництво СумДУ, 2012. – С. 182–183.

7. Свердлов С. З. Языки программирования и методы трансляции : учебное пособие / С. З. Свердлов. – СПб : Питер, 2007. – 638 с.

8. Конолли Т. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Т. Конолли, К. Бегг ; пер. с англ. Р. Имамутдиновой, К. Птицына. – 3-е издание. – М. : Вильямс, 2003. – 1440 с. : ил. – Парал. тит. англ.

9. Джексон Г. Проектирование реляционных баз данных для использования с микроЭВМ / Джексон Г. ; пер. с англ. А. Н. Елькова. – М. : Мир, 1991. – 252 с. : ил.

10. Кренке Д. Теория и практика построения баз данных / Кренке Д. – 8-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 800 с. : ил. – (Серия «Классика computer science»).

11. Хансен Г. Базы данных: разработка и управление / Г. Хансен, Дж. Хансен. – М. : Бином, 1999. – 560 с.

12. Хомоненко А. Д. Базы данных : учебник для вузов / Хомоненко А. Д. ; под ред. А. Д. Хомоненко. – СПб : Корона принт, 2000. – 416 с.

13. Фаулер М. Предметно-ориентированные языки программирования / Фаулер М. – М. : Вильямс, 2011. – 576 с. – (Addison–Wesley Signature Series)

14. Предметно-ориентированный язык программирования (domain-specific programming language, dsl) [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://dok.opredelim.com/docs/index-16582.html>. – Загл. с экрана.

15. Белоусов А. И. Дискретная математика : учеб. для вузов / А. И. Белоусов, С. Б. Ткачев ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 3-е изд., стер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – Вып. XIX. – 744 с. – (Серия Математика в техническом университете)

16. Андерсон Джеймс А. Дискретная математика и комбинаторика : пер. с англ. / Андерсон Джеймс А. – М. : Вильямс, 2004. – 960 с. – Парал. тит. англ.

17. Соболева Т. С. Дискретная математика : учебник для студ. вузов / Соболева Т. С. ; под ред. А. В. Чечкина. – М. : Академия, 2006. – 256 с. – (Серия Прикладная математика и информатика).

18. Разработка ИСАПР с применением методов инженерии знаний. Решение практических задач : монография / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Короткий, О. А. Лябик, С. В. Таран, С. А. Тарасов – Краматорск : ДГМА, 2012. – 216 с.

19. Тарасов А. Ф. Применение онтологий для повышения интеллектуальности информационных систем / А. Ф. Тарасов, П. И. Сагайда // Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2012. – С. 205–208.
20. Сагайда П. И. Онтологический подход к проектированию баз данных информационных систем / П. И. Сагайда // Современное образование и интеграционные процессы : сб. науч. работ междунар. науч.-метод. конф. – Краматорск : ДГМА, 2012. – С. 313–318.
21. Гордеев А. В. Системное программное обеспечение / А. В. Гордеев, А. Ю. Молчанов. – СПб. : Питер, 2001. – 736 с.
22. Бекон Дж. Операционные системы / Дж. Бекон, Т. Харрис. – К. : ВНУ ; СПб. : Питер, 2004. – 800 с.
23. Шеховцов В. А. Операційні системи / В. А. Шеховцов. – К. : ВНУ, 2005. – 2005. – 576 с.
24. Харт Дж. В. Системное программирование в среде Win32 / Дж. В. Харт. – М. : Вильямс, 2001. – 464 с.
25. Столингс В. Операционные системы / В. Столингс. – М. : Вильямс, 2002. – 848 с.
26. Сагайда П. И. Выбор технологий динамического обмена данными для компонентов интегрированной САПР в многозадачных операционных системах / П. И. Сагайда // Качество образования: управление, сертификация, признание : сб. науч. работ междунар. науч.-метод. конф. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 133–140.

## ВИСНОВКИ

Основним завданням цієї роботи є удосконалення методичної та інформаційної підтримки наскрізного технологічного процесу проектування й виготовлення заготовок, оснащення і деталей складної форми типу імплантатів. Удосконалення процесу проектування здійснюється за рахунок розроблення спеціалізованих САПР як комплексів, які складаються з універсальних CAD/CAE/CAM-систем для моделювання й додаткових спеціалізованих програмних систем. При виконанні роботи отримано такі основні результати.

1. Виконано застосування методу морфологічного аналізу й синтезу до формування й оцінювання конструктивних образів об'єктів на прикладі різального інструменту, що дозволило отримувати їх експрес-оцінку на початкових етапах проектування. Реалізація методу відрізняється попереднім експертним оцінюванням вагомостей критеріїв якості за ознаками, а також альтернатив у порядку їх значущості, що забезпечує прискорення процесу розроблення нових конструкцій.

2. Виділено послідовні етапи наскрізного процесу проектування й виготовлення виробів і необхідного для цього технологічного оснащення, розроблено алгоритм проектування виробів складної геометрії типу імплантатів: з листових заготовок для щелепно-лицьової хірургії, брекет-систем за даними сканування, «U-імплантатів» із застосуванням схем інтенсивного пластичного деформування. Визначено послідовність і завдання використання CAD/CAE/CAM-систем на різних етапах автоматизованого проектування та виготовлення виробів.

3. Виконано дослідження проблем моделювання з використанням CAD/CAE-систем комбінованих багатоетапних технологічних процесів деформування для створення субмікрокристалічної структури матеріалів заготовок для імплантатів, зокрема проблеми пошуку маршруту деформування для створення необхідного розподілу деформацій в об'ємі заготовки.

4. Для отримання заготовок медичних імплантатів запропоновано і вивчено новий технологічний процес інтенсивного пластичного деформування за схемою реверсивного зсуву в умовах плоского деформованого стану, який дозволяє суттєво підвищити механічні характеристики матеріалів заготовок. Розроблено методику дослідження технологічного процесу поетапного пластичного деформування з використанням CAE-систем на основі універсального параметризованого макросу.

5. Розроблено методику параметричного проектування штампового оснащення для реалізації методу інтенсивного пластичного деформування за схемою реверсивного зсуву, а також для отримання медичних імплантатів для щелепно-лицьової хірургії.

6. На основі аналізу існуючих підходів і можливостей інтеграції з промисловими CAD/CAM/CAE-системами (CAD-системи PowerSHAPE і Solidworks, CAM-система PowerMILL, CAE-система ABAQUS) розробле-

но зовнішні модулі й створено комплексні інтегровані САПР для проектування: геометричних моделей імплантатів і технології виготовлення шаблонів для формоутворення поверхні імплантату пластичним деформуванням поліуретаном, брекет-систем, технологічного процесу пластичного деформування й оснащення.

7. Для проектування технологічних процесів оброблення на верстаках з ЧПК розроблено САПР на основі інтеграції з САМ-системою PowerMILL. Розроблено також структуру бази даних САПР технологічних процесів механооброблення, що дозволяє накопичувати досвід технологів для подальшого його використання для підвищення інтелектуальності САПР.

8. За допомогою морфологічного аналізу зроблено оцінку якості ряду відомих конструкцій торцевих касетних фрез, синтезовано нові функціональні образи конструкцій збірних торцевих фрез. Розроблено алгоритми послідовної оптимізації лінійного функціонала на нерівномірній сітці  $n$ -вимірної морфологічної таблиці, що підвищують ефективність пошуку оптимальних структурних схем технічних рішень. Проведено випробування розроблених фрез у лабораторних і виробничих умовах.

9. Розроблено онтологію об'єктів проектування баз даних і на її основі – DSL для виконання операцій концептуального проектування баз даних підсистем спеціалізованих САПР. Розроблено та досліджено прототип програмно-методичного комплексу для автоматизації процесу проектування баз даних. Обґрунтовано вибір технології динамічного обміну даними між компонентами САПР і їх синхронізації у рамках взаємодії між процесами.

*Наукове видання*

**ТАРАСОВ Олександр Федорович,  
АЛТУХОВ Олександр Валерійович,  
САГАЙДА Павло Іванович та ін.**

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
І ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ  
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ САД/САМ/САЕ-СИСТЕМ**

**Монографія**

Редагування, комп'ютерне верстання

О. М. Болкова

Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 13,95.  
Обл.-вид. арк. 17,37. Тираж 300 пр. Зам. № 7.

**Видавець**

Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1633 від 24.12.2003

**Виготівник**

ЦТРІ «Друкарський дім»  
84306, м. Краматорськ, вул. Олекси Тихого, 1-б,  
тел.: (06264) 6-73-34, (066) 076-76-21.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 5071 від 23.03.2016