МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТВІЙЧУК В.А., ВЕСЕЛОВСЬКА Н.Р.,
ШАРГОРОДСЬКИЙ С.А.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Монографія

Вінниця 2021

УДК 621.7(075.8)
В-38

Рекомендовано до друку Вченою радою
Вінницького національного аграрного університету
« 29 » червня 2021 р. (протокол № 12)

Рецензенти:

В.М. Булгаков – доктор технічних наук, професор, професор кафедри механіки Національного університету біоресурсів і природокористування України, академік НААН України, заслужений винахідник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, відмінник освіти України;
І.С. Алієв – доктор технічних наук, професор заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії;
В.Ф. Анісімов – доктор технічних наук, професор, професор кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету.

В-38 Математичне моделювання новітніх технологічних систем.: Монографія/ Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. – Вінниця: 2021. – 193 с., мова українська.

У монографії розглянуто сучасні методи і підходи до моделювання технологічних систем. Наведено основні визначення та поняття. Запропоновані нові підходи до розв’язання проблем, які виникають при розробці, розв’язанні та дослідженні математичних моделей механізмів, систем та процесів машинобудівного виробництва.

УДК 621.7(075.8)
В-38

ISBN 978-966-949-855-7

© В.А. Матвійчук , 2021
© Н.Р. Веселовська, 2021
© С.А. Шаргородський, 2021

ЗМІСТ

Вступ 7

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ 8

1.1. Завдання розрахунків і математичного моделювання при розробці й дослідженні обладнання 8

1.2. Види моделей і види моделювання 10

1.3. Класифікація математичних моделей 15

1.3.1. Види об'єктів, описуваних математичними моделями 15

1.3.2. Види процесів і їх математичних моделей 17

1.3.3. Склад математичних моделей об'єктів 17

1.4. Види математичного моделювання 19

1.5. Основні етапи математичного моделювання 21

1.6. Допущення 25

1.7. Побудова та реалізація моделюючих алгоритмів роботи об'єктів 27

1.8. Алгоритмічні мови програмування й математичні пакети 31

1.9. Планування комп'ютерних експериментів 36

1.10. Адекватність і точність математичної моделі 39

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ MATHCAD У ЗАВДАННЯХ МОДЕЛЮВАННЯ 44

2.1. Основні відомості про систему Mathcad 44

2.2. Моделювання роботи кривошипно-шатунного механізму 46

2.3. Моделювання роботи одноциліндрового поршневого насоса 50

2.4. Моделювання поршневого компресора 53

2.5. Моделювання роботи гідростатичної трансмісії. 61

2.5.1. Аналіз ефективності застосування гідравлічних об’ємних передач у трансмісіях тракторів 62

2.5.2. Розробка математичної моделі ГСТ-90 63

2.5.3. Дослідження впливу параметрів гідропривода та сільськогосподарської машини на характеристики роботи системи 78

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ DEFORM 3D У ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ. 93

3.1. Початок роботи в Deform 3D 95

3.2. Робота з препроцесором системи Deform 3D 98

3.3. Моделювання процесу штампування 103
3.4. Робота з постпроцесором 105
3.5. Створення математичної моделі позиціонування інструментів для пластичного деформування за допомогою Deform - 3D. 113
3.5.1. Створення математичної моделі позиціонування верхнього інструмента. 113
3.5.2. Нижній інструмент 114
3.5.3. Встановлення переміщення інструмента 114
3.5.4. Задання початкової температури об'єкта 115
3.5.5. Задання властивостей матеріалу 116
3.5.6. Введення параметрів розрахунків 117
3.5.7. Позиціонування об'єктів 118
3.5.7.1. Позиціонування перетаскуванням миші 119
3.5.7.2. Позиціонування опусканням 119
3.5.7.4. Позиціонування інтерференцією 121
3.6. Задання відносин між об'єктами при створенні моделі. 122
3.7. Створення бази даних 125
3.8. Розрахунки поковки та постпроцесор 126
3.8.1. Запуск розрахунків 126
3.8.2. Обробка результатів 126
3.8.3. Вибір кроку перегляду результатів математичного моделювання. 127
3.8.4. Змінні стану досліджуваного об’єкту. 128
3.8.5. Спостереження за точкою 128
3.8.6. Розрізи об'єктів 130
3.9. Розробка математичної моделі деталі «Квадратне кільце» 132
3.9.1. Створення нових об'єктів 133
3.9.2. Розбивка заготовки 134
3.9.3. Завдання граничних умов 134
3.9.4. Відносини між об'єктами 135
3.9.5. Завершення настроювань і запуск розрахунків 136
3.9.6. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз 138

3.10. Розробка математичної моделі гарячого кування (перенос від печі до інструмента) 139
3.10.1. Встановлення параметрів розрахунків 140
3.10.2. Додавання нових об'єктів 140
3.10.3. Заготовка 140
3.10.4. Верхній штамп 141
3.10.5. Нижній штамп 141
3.10.6. Розбивка заготовки 141
3.10.7. Визначення граничних умов теплопередачі 144
3.10.8. Імпортування матеріалу заготовки 146
3.10.9. Початок виконання розрахунків 146
3.10.10. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз 146
3.11. Моделювання процесу кування. Затримка на нижньому штампі 148
3.11.1 Розбивка штампа та температурні граничні умови 148
3.11.2. Верхній штамп 148
3.11.3. Нижній штамп 149
3.11.4. Імпорт матеріалу штампа 149
3.11.5 Позиціонування заготовки 150
3.11.6. Встановлення параметрів розрахунків 151
3.11.7 Збереження завдання та запуск розрахунків 151
3.11.8. Відносини між об'єктами 152
3.11.9. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз. 152
3.12. Моделювання процесу що відбувається при ударі при куванні. 153
3.12.1. Установка параметрів розрахунків 153
3.12.2. Позиціонування верхнього штампу 154
3.12.3. Визначення граничних умов деформації 154
3.12.4. Заготовка 154
3.12.5. Верхній штамп 155
3.12.6. Нижній штамп 155
3.12.7. Установка переміщення штампа 155
3.12.8. Повторна установка відносин між об'єктами 156
3.12.9. Збереження завдання та запуск розрахунків 156

3.12.10. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.....157
3.13. Кування - заміна штампа та удар 2.....159
3.13.1. Заміна верхнього штампа для другого удару.....159
3.13.2. Визначення нових граничних умов для верхнього штампа.....160
3.13.3. Позиціонування верхнього штампа.....160
3.13.4. Перевизначення контакту.....161
3.13.5. Установка параметрів розрахунків.....161
3.13.6. Виконання розрахунків.....161
3.13.7. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.....162
3.14. Аналіз напруженого стану інструмента.....162
3.14.1. Установка параметрів розрахунків.....163
3.14.2. Додавання додаткових інструментів і видалення заготовки.....163
3.14.3. Верхній штамп.....163
3.14.4. Нижній штамп.....165
3.14.5. Визначення відносин між об'єктами.....166
3.14.6. Запуск розрахунків.....167
3.14.7. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.....167
3.15. Сутність основних параметрів напружено-деформованого стану в процесах обробки металів тиском.....169
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....173

Вступ

Останні десятиліття характеризуються все зростаючим впровадженням комп'ютерної техніки у виробничу діяльність та повсякденне життя. Тому підготовка магістрів та аспірантів, які досконало володіють комп'ютерною технікою для виконання серйозних теоретичних та практичних завдань є актуальною і необхідною. Застосування комп'ютерної техніки дозволяє глибше зрозуміти та засвоїти фізичну сутність досліджуваних процесів; вирішувати завдання, недоступні аналітичним методам; проводити необхідні розрахунки швидко та з високою точністю; знаходити оптимальні варіанти при створенні нових конструкцій устаткування тощо

При використанні комп'ютера для розв'язку різних завдань слід правильно визначити роль людини та призначення ЕОМ у цьому процесі. Виконувані людиною функції полягають у чіткому формулюванні мети дослідження, складанні вихідних рівнянь, початкових умов, складанні алгоритму та програми розрахунків, аналізу отриманих результатів, що становить основу математичного моделювання об'єктів, викладену в першому розділі. Роль комп'ютера зводиться до проведення обчислень і у наданні результату в аналітичному, числовому або графічному виді.

У частині застосування комп'ютера для виконання розрахунків і проведення досліджень із використанням математичної моделі можна виділити два підходи. Перший з них - традиційний, заснований на застосуванні програми розрахунків, складеної на одній із алгоритмічних мов високого рівня (Бейсик, Паскаль, С++ і ін.). При цьому користувач повинен не тільки розуміти суть розв'язуваного завдання, знати відповідні залежності й мати деяку уяву про загальні принципи складання програм, але й досить повно володіти мовою програмування. Сполучити ці різні знання та уміння в одній особі для студента ЗВО досить складно. Тому на практиці для розв'язку серйозних дослідницьких завдань звичайно організовується група, що включає як фахівців-механіків, так і програмістів.

Другий підхід, який став можливий лише в останні декілька років, заснований на застосуванні сучасних спеціальних математичних пакетів програм типу Mathematica, Mathlab, Derive, Mathcad і ін.

Для того щоб пройти весь ланцюжок досліджень від постановки завдання до аналізу результатів розрахунків, показати прийоми поступового ускладнення та розширення завдання.

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Завдання розрахунків і математичного моделювання при розробці й дослідженні обладнання

При розробці нового обладнання або при модернізації вже існуючого обов'язково виконуються ті або інші розрахунки: технологічні, міцнісні, економічні тощо При цьому може бути доцільним виконання математичного моделювання роботи цього обладнання.

Під *розрахунками* розуміють дії по встановленню кількісної оцінки розглянутого параметра об'єкта або процесу та аналізу отриманого результату. Таке ж назва - розрахунки - має й документ, що містить результати цієї дії. Зміст розрахунків, виконуваних при розробці продукції (створенні обладнання) регламентується ГОСТ 2.106-68 «ЕСКД. Текстові документи». Згідно із цим стандартом розрахунки повинні містити: ескіз або схему виробу, що розраховується, завдання розрахунків (із вказівкою, що потрібно визначити), дані для розрахунків, умови розрахунків, розрахунки, висновок.

Завдання розрахунків полягає у визначенні числового значення, або параметра, якої-небудь характеристики або розміру об'єкта. Тобто завдання розрахунків - відповідь на запитання: яке значення параметра (діаметр вала, подачі...), яку витримає навантаження деталь тощо. При розрахунках шуканою величиною можуть бути й розміри об'єкта (товщина стінки, діаметр штанги, глибина підвіски насоса та ін.).

Математичне моделювання хоча й має багато загального із розрахунками, але відрізняється від них. У літературі приводяться кілька варіантів визначень математичного моделювання. Наприклад, професор М.В. Лур'є дає його в наступному формулюванні: *Математичне моделювання - це наука про побудову математичних завдань, розв'язок яких дозволяє одержати відповідь про параметри досліджуваного явища без того, щоб ставити натурні й тим більше промислові експерименти.*

Більш повним, на наш погляд, є наступне визначення, засноване на підході професора П.І. Пластинина [2]:

Математичне моделювання - комплекс дій, спрямований на одержання

інформації про об'єкт або про процеси, що протікають у ньому шляхом відтворення за допомогою математичної моделі явищ, що відбуваються, зі збереженням їх логічної структури, взаємозв'язків і розташування у часі.

Завданням математичного моделювання є дослідження особливостей модельованого реального об'єкта, у результаті чого можуть бути зроблені деякі висновки (наприклад, про границі області застосування цього об'єкта, про найбільш ефективне співвідношення його розмірів і т.п.). При цьому об'єкт повинен бути заданий (тобто його розміри попередньо задають).

При математичному моделюванні проводиться безліч обчислень параметрів робочого процесу, які можуть збігатися з окремими обчисленнями, виробленими при виконанні розрахунків.

До основних переваг методу математичного моделювання слід віднести наступні.

- Відповіді на багато питань при створенні машин, що виникають на ранніх етапах, (задуму, попереднього проектування), можна дати без застосування дорогого методу проб і помилок, тобто виключити з розробок дорогі пробні експерименти, варіанти нераціональних систем, схем і конструкцій. На стадії проектування можна, знов-таки без проведення додаткового експерименту, одержати необхідну інформацію про оптимальні розміри, співвідношення та конструктивні параметри машин та їх елементів.
- На ЕОМ можна моделювати поведінку об'єкта в будь-яких умовах, у тому числі й таких, які при практичному експерименті реалізувати не можна. Завдяки цьому розширюється діапазон умов, у яких перевіряється й досліджується який-небудь об'єкт.
- Скорочуються витрати на дороге обладнання, необхідне при експериментальному дослідженні. Так, дослідження роботи пневматичних систем у тропічних та арктичних умовах можна провести без кліматичної камери, у якій реальна пневматична система може бути поставлена у тропічні та арктичні умови.
- Для прогнозування поведінки технічних систем можна екстраполювати результати реальних експериментів за допомогою

математичної моделі. У цьому випадку дані, що отримані на реальній машині, можуть бути перенесені на інші машини.

- Скорочується тривалість випробувань системи або установки.
- Математичне моделювання дає можливість одержати інформацію, у якій виключений вплив деяких побічних явищ; часто дослідити такий вплив на реальному експерименті не можна.
- Математичне моделювання є джерелом інформації в тих випадках, коли з деяких причин провести дослідження реального об’єкта неможливо.

Хоча моделювання за допомогою ЕОМ є потужним засобом дослідження, його слід застосовувати далеко не у всіх випадках.

На ухвалення рішення про використання методу математичного моделювання об'єкта на ЕОМ впливають особливості дослідницького завдання, матеріальні можливості використання машинного часу, наявність експериментальних даних, необхідних для побудови математичної моделі, достатнє уявлення про фізику основних процесів і явищ.

Можна назвати деякі критерії доцільності застосування методу моделювання об'єктів на ЕОМ, якими слід керуватися при виборі відповідного методу розв'язку завдання, що постає перед дослідником:

- неприйнятність або відсутність аналітичних методів розв'язку завдання; непридатність усіх інших методів розв'язку;
- упевненість в успішному створенні моделі розглянутої системи;
- наявність операції, машини або елемента, тобто наявність експериментальної інформації, необхідної для створення математичної моделі;
- можливість використання математичної моделі для процесу дослідження, для чисельного експерименту.

Для дослідження властивостей розроблюваного об'єкта можуть застосовуватися різні види моделювання, і математичне є лише одним з них.

1.2. Види моделей і види моделювання

Моделювати можна якийсь *об'єкт* у статиці або *процес* функціонування об'єкта.

Об'єкт (від латинського - предмет) - усе те, на що спрямована людська діяльність). Кожний об'єкт складається з безлічі більш дрібних об'єктів і в той же час входить у більший об'єкт.

У кожний момент часу стан об'єкта може бути описаний набором параметрів (чисел) a, b, c, d ..., тобто стан Z є деякою функцією Ф, аргументами якої є ці параметри:

$$Z_1 = \Phi(a_1, b_1, c_1, d_1, ...);$$

•••

$$Z_i = \Phi(a_i, b_i, c_i, d_i, ...). \quad (1.1)$$

Значення цих параметрів можуть змінюватися в часі або в просторі. Так, стан газу в робочій порожнині циліндра поршневого компресора описується набором із трьох параметрів: тиск, температура, питомий об’єм. Послідовну зміну станів об'єкта в часі називають *процесом.*

Модель - це замінник об'єкта-оригіналу, що забезпечує вивчення деяких властивостей цього оригіналу. Іноді дається більш точне визначення моделі, наприклад:

«Під моделлю розуміється уявна або матеріально реалізована система, яка, відображаючи та відтворюючи об'єкт дослідження, здатна замінити його так, що її вивчення дає нам нову інформацію про цей об'єкт» [2].

Моделювання - дія по створенню та використанню моделі для одержання інформації про найважливіші властивості об'єкта-оригіналу. Моделювання є основним методом досліджень у всіх галузях знань і обґрунтованим методом оцінок характеристик складних об'єктів.

Усі моделі можуть бути розділені на кілька видів за різними ознаками, насамперед - на матеріальні та абстрактні (див. рис 1.1).

Матеріальні моделі являють собою речовинне відтворення досліджуваного об'єкта, є реально існуючими предметами й виконуються з деяких матеріалів.

Матеріальні моделі діляться на *геометрично подібні, фізично подібні та аналогові.*

Рисунок 1.1 - Види моделей

До геометрично подібних моделей ставляться натурні моделі, макети, креслення. Натурні моделі й макети служать для оцінки зручності користування реальним об'єктом, раціонального розміщення обладнання на деякій площі або в деякому просторі, аналізі ергономічності, естетичності та ін.

Фізично подібні моделі створюються для відтворення та дослідження досліджуваних процесів. Прикладом дослідження за допомогою фізично подібної моделі є вивчення поведінки фюзеляжу літака або окремого його елемента, виконаних у деякому масштабі, в аеродинамічній трубі.

Прикладами випадку, коли модель і фізично, і геометрично подібна, є діючий експериментальний зразок устаткування.

В аналогових моделях використовується електрогідравлічна та електроакустична аналогія. Відомо, що гідравлічним аналогом електричної напруги є тиск, струму - витрата, електричного опору - гідравлічний опір. Тому перехідні процеси та коливання робочої рідини або газу у трубопровідних

системах можна вивчати на аналоговій моделі, що виконана з електричних елементів: конденсаторів, опорів, провідників тощо

Абстрактні моделі не є реально існуючими предметами. Вони існують в уяві дослідника у вигляді якихось образів, що подумки представляються, або у вигляді формул, знаків, схем, зображених на папері.

Можна виділити два основні види абстрактних моделей - *образні та знакові,* і похідні від них - *образно-знакові.*

Образні моделі не є реально існуючими предметами, а існують у розумі дослідника, побудовані із чуттєво-наочних елементів. (Модель ідеального газу - пружні кулі). Для образних моделей важливо певна подібність із реальним об'єктом.

Знакові моделі характеризуються досить малою подібністю з реальним об'єктом або його повною відсутністю. До знакових моделей відносяться *математичні моделі* (тому що вони складені за допомогою знаків математичної символіки), гідравлічні та електричні схеми. До них можна віднести і креслення. Аналізуючи креслення, можна оцінити ряд властивостей майбутнього реального об'єкта, і тільки при позитивній оцінці по них виготовляють виріб.

Математична модель об'єкта - сукупність замкнених систем рівнянь, кожне з яких установлює з певним ступенем наближення кількісні зв'язки між окремими елементами й параметрами об'єкта, здатна замінити цей об'єкт для вивчення та одержання інформації.

Виділимо основні *особливості математичних моделей.*

1. Наближеність опису.

Математична модель описує об'єкт завжди наближено. Наближеність математичної моделі пояснюється прийнятими при її складанні допущеннями та пропозиціями, мета яких - спростити модель, зробити її зручною для використання, полегшити обчислювальну роботу. Неточності вимірювання при одержанні дослідних даних, використаних у моделі, також є причиною наближеності математичної моделі. Тому математичні моделі фізичних процесів є наближеними навіть у тих випадках, коли припущення, прийняті при

розробці, добре обґрунтовані.

2. Компроміс між простотою моделі та повнотою опису.

При розробці математичної моделі об'єкта або процесу прагнуть ураховувати тільки основні, найбільш істотні фактори, що виявляють найбільший вплив на дослідження. Несуттєві явища та фактори, що виявляють незначний вплив на роботу досліджуваного об'єкта або протікання досліджуваного процесу з погляду поставленого завдання, у математичній моделі до уваги не приймаються.

Професіоналізм розроблювача - створити просту модель, уміти виділити та врахувати головне.

Надмірне спрощення математичної моделі може привести до втрати точності, а іноді й взагалі зробити модель непридатною пошуку. Бажання одержати більш деталізовану модель, врахувати більше число факторів приводить до ускладнення математичної моделі та до подорожчання чисельного експерименту.

Таким чином, укладача моделі завжди підстерігають дві небезпеки: перша - занадто огрубити явища, друга – загубитися у подробицях. Тому необхідно знайти розумний компроміс між вимогами простоти моделі, повноти врахування основних факторів і точності моделі.

3. Обмеженість застосування.

Математична модель повинна використовуватись тільки для поставленого завдання, тому що при її розробці були прийняті допущення, обґрунтовані саме для цього завдання. При цьому могли бути відкинуті другорядні для розглянутого завдання фактори. Тому можливість застосування наявної математичної моделі для інших завдань і умов треба доводити.

Наприклад, якщо досліджували рух тіла в газі, то застосування цієї моделі для рідини може бути некоректним внаслідок більш істотного впливу архімедової сили, гідродинамічного опору середовища.

Так, падіння твердого тіла в повітрі при невеликих швидкостях, як

відомо, добре описується виразом (тобто моделлю):

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \qquad (1.2)$$

Однак для висоти 7000 метрів від поверхні землі ми одержимо значення швидкості V = 370 м/с, тобто надзвукову швидкість, чого насправді не може бути.

4. Відмінність математичної моделі від закону.

Не можна говорити про погані або гарні закони. Закон має характер деякої абсолютної категорії на даному рівні знань. У той же час деякий об'єкт може бути досліджений за допомогою зовсім різних математичних моделей, що досить точно описують його поведінку. Причому ці моделі не завжди слід уважати конкуруючими. Так, для оперативної оцінки роботи деякого об'єкта іноді зручніше використовувати просту й менш точну модель, ніж більш досконалу, але потребуючу завдання безлічі вихідних даних і умов.

1.3. Класифікація математичних моделей

1.3.1. Види об'єктів, описуваних математичними моделями

Математичні моделі описують властивості або поведінку деякого об'єкта. За просторовою ознакою, а саме - чи є відмінності чи ні у значеннях параметрів об'єкта в різних його точках, усі об'єкти розділяються на два види:

- *об'єкти із зосередженими параметрами;*
- *об'єкти з розподіленими параметрами.*

Об'єктом із зосередженими параметрами називають об'єкт, значення параметрів якого однакові у всіх його точках. У випадку, якщо параметри змінюються у часі, тобто ми маємо справу із процесом, то в такого об'єкта зміна значень кожного параметра відбувається на ту саму величину у всіх точках. Наприклад, при моделюванні роботи поршневого насоса, пневмо-гідро акумулятора або поршневого компресора визначають тиск у робочій порожнині, причому, не конкретизуючи, у якій точці цієї порожнини, тому що це не має ніякого значення. При моделюванні напруженого стану довгої

тонкостінної труби, навантаженої внутрішнім тиском і розташованої горизонтально, або стрижня, до якого прикладено розтяжне зусилля, також неважливо, у якій точці визначається напруга. Тому й ці об'єкти, що є досить протяжними, можна розглядати як об'єкти із зосередженими параметрами, тобто точковими.

Об'єктом з розподіленими параметрами називають об'єкт, значення параметрів якого різні у різних його точках. Наприклад, коли розглядається плин рідини або газу в трубопроводі з урахуванням втрат тиску по довжині, описується напружений стан трійника, навантаженого внутрішнім тиском, то, говорячи про тиск або напруження, треба обов'язково конкретизувати, про яку точку або про який перетин йде мова.

Важливо відзначити, що залежно від поставленого завдання й прийнятих допущень той самий реальний об'єкт може розглядатися або як об'єкт із зосередженими параметрами, або як об'єкт із розподіленими параметрами. Так, ми часто зустрічаємося з такими параметрами, як «температура в кімнаті» або «температура на вулиці». Очевидно, що значення температури повітря, обмірюваної поблизу підлоги, у вікна і під стелею кімнати, будуть відрізнятися на деяку величину. У більшості випадків це не важливо, а становить інтерес деяке усереднене по точках розглянутого простору значення, для того, щоб зрівняти його зі значенням в інший момент часу. Але в якихось випадках може бути важливо забезпечити певний рівень температури в різних місцях розглянутого простору, а отже, необхідно визначати (розраховувати) значення в цих точках.

Прикладом з технічної області може служити робоча камера поршневого компресора або двигуна внутрішнього згоряння. Так, у деяких завданнях дослідникові може бути важливо врахувати той факт, що температура робочого тіла поблизу усмоктувального (впускного) клапана менше, ніж поблизу нагнітального (випускного) через різну температуру поверхні цих елементів машини, тому у цьому випадку необхідно розглядати робочу камеру як об'єкт із розподіленими параметрами. Хоча в більш простій постановці задачі цей об'єкт є класичним прикладом об'єкта із зосередженими параметрами.

1.3.2. Види процесів і їх математичних моделей

Математичні моделі функціонування об'єктів, які розглядаються і як об'єкти із зосередженими параметрами, і як об'єкти з розподіленими параметрами, можна розділити на кілька видів за тимчасовою ознакою, однозначності параметрів і теоретичною основою моделі. Класифікацію моделей по цих ознаках наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Види процесів і їх математичних моделей

Класифікаційна ознака	Процес	Вид математичної моделі	Приклад об'єкта або процесу, описуваного моделлю
1	2	3	4
Зміна в часі	Стаціонарний (параметри в часі не змінюються)	Статична	Рух рідини у трубопроводі при постійній витраті
	Нестаціонарний (параметри в часі змінюються): -Усталений нестаціонарний -Несталий нестаціонарний	Динамічна	Робочий процес поршневого насоса, компресора; плин двофазного потоку при корковому режимі
Однозначність параметрів	Процеси з однозначно певними параметрами	Детермінована	Робочі процеси машин; динаміка механізмів
	Процеси з випадковими значеннями параметрів	Стохастична	Процес виходу з ладу обладнання; моделі керування
Теоретична основа		Фундаменталь-ні фізичні залежності	Робочі процеси машин; динаміка механізмів
		Регресійна	Швидкість корозії трубопроводу; Залежність в'язкості робочої рідини гідравлічної системи від температури

1.3.3. Склад математичних моделей об'єктів

Залежно від виду об'єкта та характеру процесу його роботи до складу

математичного опису моделей цього об'єкта можуть входити як прості залежності та алгебраїчні рівняння, так і диференціальні рівняння: звичайні або в частинних похідних.

Склад математичного опису моделей об'єктів із зосередженими параметрами наведено в таблиці 1.2. Склад математичного опису моделей об'єктів з розподіленими параметрами наведено в таблиці 1.3. Слід мати на увазі, що крім зазначених у таблиці 1.3 рівнянь, до складу моделей звичайно входять і більш прості рівняння та залежності.

Таблиця 1.2 - Склад математичного опису моделей об'єктів із зосередженими параметрами

Вид моделі	Склад математичного опису
Статична модель об'єкта із зосередженими параметрами	Алгебраїчні рівняння
Динамічна модель об'єкта із зосередженими параметрами	Звичайні диференціальні рівняння (похідна в часі)

Таблиця 1.3 - Склад математичного опису моделей об'єктів з розподіленими параметрами

Вид моделі	Вид об'єкта	Склад мат. опису
Статична модель об'єкта з розподіленими параметрами	Одномірний	Звичайні диференціальні рівняння (похідна по одній просторовій координаті)
	Двомірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні по двом змінним - двом координатам)
	Тривимірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні по трьом координатам)
Динамічна модель об'єкта з розподіленими параметрами	Одномірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і однієї координаті)
	Двомірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і двом координатам)
	Тривимірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і по трьох координатах)

1.4. Види математичного моделювання

Можна виділити два види основних математичних моделей: *аналітичні* та *імітаційні*.

При *аналітичному* моделюванні процеси функціонування об'єкта записують у вигляді деяких функціональних співвідношень (алгебраїчних, диференціальних, інтегральних) і одержують явні залежності для шуканих характеристик, або, застосовуючи чисельні методи, одержують числові значення розглянутих змінних при конкретних початкових даних, за якими можна проаналізувати залежність однієї змінної від іншої. Історично цей метод моделювання зложився першим. Більшість завдань за курсом теоретичної механіки вирішуються студентами саме цим методом.

Дослідження процесу функціонування об'єкта можна ефективно зробити аналітичним методом, якщо відомі явні залежності (або їх можна одержати) шукані характеристики, що зв'язують, з початковими умовами, параметрами й змінними системи. Однак такі залежності вдається одержати тільки для порівняно простих систем. Тому, при аналітичному моделюванні часто йдуть на істотне спрощення первісної моделі, наприклад, ухвалюють, що ряд параметрів не змінюється в ході процесу.

Наприклад, рух тіла під дією тільки однієї сили - сили ваги є рівноприскореним і описується простими залежностями для швидкості та переміщення, що є розв'язком диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = g \qquad (1.3)$$

$$v = v_0 + g \cdot t \qquad (1.4)$$

$$S = S_0 + v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2} \qquad (1.5)$$

У випадку врахування аеродинамічного опору явну залежність навіть для швидкості вдається одержати лише у випадку допущення, що сила опору пропорційна швидкості руху, причому коефіцієнт пропорційності $\boldsymbol{k}$ - є

постійною величиною. Диференціальне рівняння і його розв'язок для швидкості в цьому випадку мають вигляд:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = g - \frac{k \cdot v}{m} \tag{1.6}$$

$$v = \left(v_0 - \frac{g \cdot t^2}{2} \right) \cdot e^{\frac{-k \cdot t}{m}} + \frac{m \cdot g}{k} \tag{1.7}$$

Відомо, що стиск газу в поршневому компресорі можна описати рівнянням політропи:

$$p \cdot v^n = const \tag{1.8}$$

з якого випливає, що температура нагнітання визначається наступною залежністю:

$$T_H = T_{BC} \left(\frac{p_н}{p_{вс}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \tag{1.9}$$

де ***n*** - показник політропи.

Точне значення показника політропи для проектованого компресора заздалегідь невідомо, тому що воно залежить від ряду факторів. Це й незмінні фактори, такі як геометричні розміри, наявність сорочки водяного охолодження, і змінні фактори, а саме: частота обертання колінчатого валу, режим роботи системи охолодження циліндра, втрати тиску в клапанах, витоку газу через нещільності в клапанах і через поршневі кільця і т.п. Очевидно, що для попереднього аналізу зручно користуватися формулами, отриманими з рівняння політропи, але для дослідження впливу окремих факторів на показники роботи компресора цей спосіб, заснований на застосуванні, здавалося б, досить простої формули, неефективний, тому що прийдеться виводити складні вирази, що визначають залежність показника політропи від цих факторів.

При *імітаційному математичному моделюванні* об'єкт представляється як сукупність окремих елементів, елементарних явищ і зв’язків між елементами і явищами, а процес роботи об'єкта імітують (відслідковують), обчислюючи за допомогою певного алгоритму значення всіх параметрів його стану в обрані

моменти часу. При цьому елементарні явища імітуються зі збереженням їх логічної структури, послідовності в реальному процесі.

У найпростіших випадках це може бути безперервне відтворення одного-двох параметрів. Імітаційне математичне моделювання як нова технологія дослідження складних процесів почала бурхливо розбудовуватись із впровадженням ЕОМ у інженерну та наукову діяльність. Даний спосіб теоретичного дослідження наукових проблем природничого спрямування, заснований на аналізі результатів розрахунків на комп'ютері по розроблених математичних моделях, називають ще обчислювальним експериментом.

Основною перевагою імітаційного моделювання у порівнянні з аналітичним моделюванням є можливість розв'язку більш складних завдань. При цьому для розгляду впливу одного параметра на інший необов'язково мати аналітичний зв'язок між ними (виражений деякою формулою), а досить установити залежності кожного з них з якимось третім параметром, наприклад, часом або координатою. Тому на сьогодні імітаційне моделювання є найбільш ефективним методом дослідження об'єктів, особливо на етапі їх проектування, а також удосконалювання вже створеного обладнання.

Надалі ми будем знайомитися з методологією саме імітаційного математичного моделювання.

1.5. Основні етапи математичного моделювання

Математичне моделювання містить у собі ряд етапів. Послідовність дій при типовому математичному моделюванні роботи обладнання наведена на блок-схемі, представленої на рис. 1.2. Прокоментуємо зміст цих основних етапів.

Етап 1. Збір інформації про об'єкт

На цьому етапі збирають інформацію та вивчають явища, на яких побудовано основний процес роботи об'єкта. Чим повніше інформація про реальний об'єкт, що підлягає заміні математичною моделлю, тим більше якісно може бути виконане математичне моделювання. Успішне моделювання передбачає ясне розуміння складових явищ процесів, їх взаємозв'язків і

взаємодій, виділення головних факторів, що виявляють найбільш істотний вплив на досліджуваний об'єкт.

Етап 2. Визначення мети й завдань моделювання

Як уже вказувалося раніше, кожна математична модель створюється під конкретне завдання, і той самий об'єкт може бути змодельований за допомогою різних математичних моделей залежно від поставлених завдань.

Етап 3. Розробка концептуальної моделі

На цьому етапі проводиться схематизація процесу роботи, тобто зображується схема, яка відображає роботу об'єкта; виділяється *контрольний об'єм* (або кілька контрольних об'ємів) - обмежена частина простору, у якій розглядаються параметри; виділяються «елементарні» явища, що становлять процес; проводиться розбивка об'єкта на системи та підсистеми, описуються їх взаємозв'язки; виділяються незалежні та залежні фактори; приймаються та обґрунтовуються *припущення,* визначається перелік необхідних експериментальних даних і вид їх положення у математичній моделі. Навіть із перерахування робіт цього етапу видна його значимість. Усі етапи мають велике значення для успішного математичного моделювання, однак найбільшу значимість мають роботи, що становлять зміст саме цього основного етапу.

Етап 4. Розробка математичної моделі

На цьому етапі роблять запис формул, що відбивають взаємозв'язки всіх параметрів; логічні відносини записуються у вигляді нерівностей; необхідні для наступних розрахунків експериментальні дані апроксимуються відповідними залежностями, зручними для обчислення на комп'ютері.

Іноді для повного математичного опису можуть знадобитися формули, що відбивають залежності деяких властивостей від якихось параметрів, наприклад в'язкості нафти від температури. Це може привести до необхідності одержання власних експериментальних даних або обробки масивів експериментальних даних, наявних у літературних джерелах.

Етап 5. Розробка алгоритму й програми розрахунків

Виконання цього етапу багато в чому залежить від навичок розроблювача, володіння ним тією або іншою мовою програмування й тих

можливостей, якими характеризується ця мова (або математичний пакет). Для виконання даного й наступного етапу, як правило, доцільно залучати відповідного фахівця - програміста.

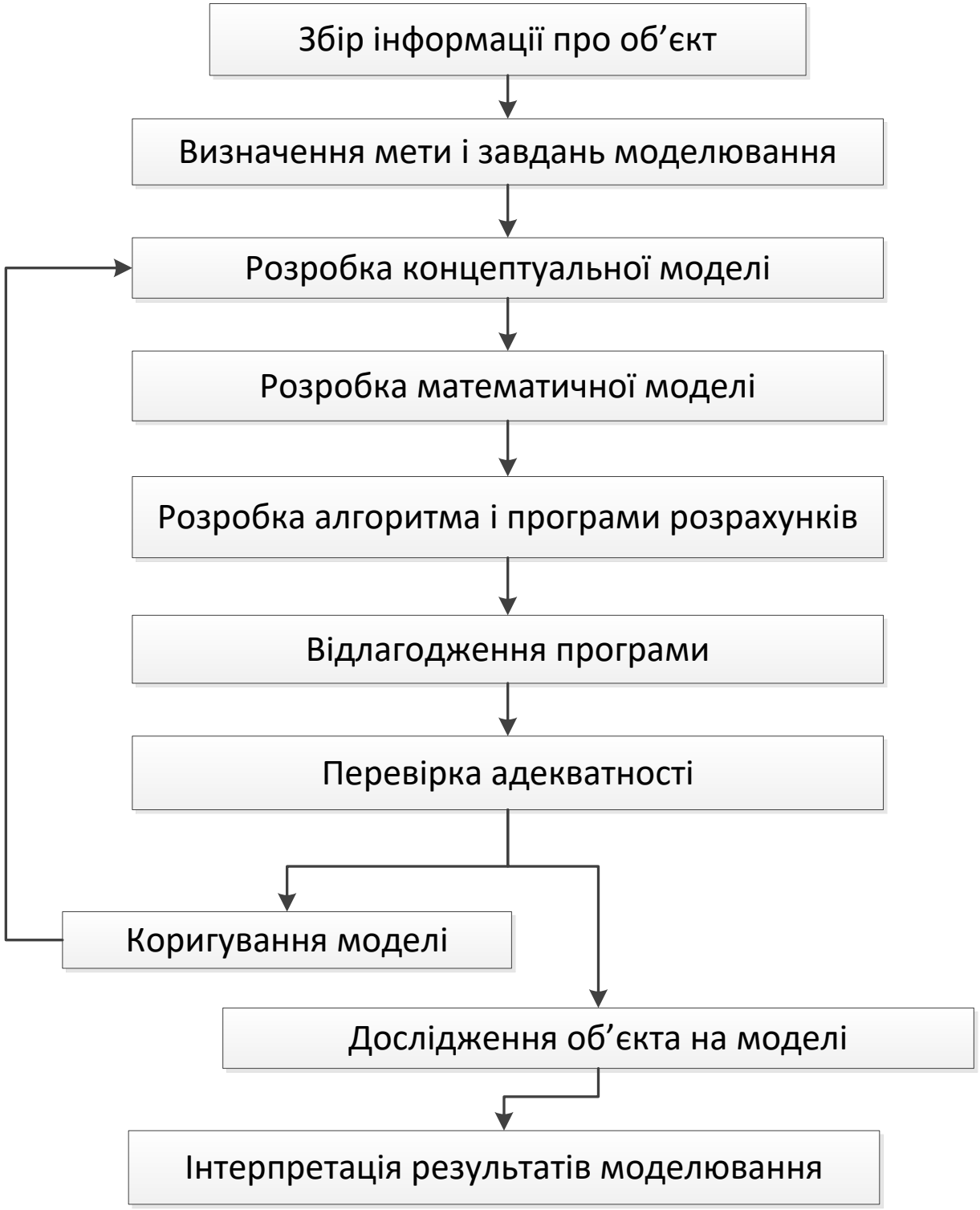


Рисунок 1.2. - Етапи комп'ютерного математичного моделювання об'єкта

Етап 6. Відлагодження програми

Відлагоджені програми обов'язково повинен брати участь розроблювач моделі, що знає фізичну сутність модельованого об'єкта. Тоді на основі аналізу результатів контрольних розрахунків він може підказати програмістові, у якому блоці слід шукати помилку.

Етап 7. Перевірка адекватності

Під адекватністю моделі розуміють відповідність її реальному об'єкту, тобто подібність параметрів і характеристик, одержуваних за допомогою моделі, відповідним до величин реального об'єкта. Модель повинна описувати реальний об'єкт: якісно - правильно, а кількісно - з необхідним ступенем точності.

Етап 8. Коригування моделі

Залежно від результатів контрольних розрахунків (прогонів) і перевірки адекватності можливо багаторазове повернення до етапу 3 - до концептуальної моделі, вносячи зміни в схематизацію процесів. При цьому можуть поступово відкидатися або коректуватися найбільш грубі допущення, уводитися якісь нові змінні на основі нової інформації про об'єкт.

Етап 9. Дослідження об'єкта на моделі

Перш ніж приступитися до цього етапу моделювання необхідно мати чіткий план проведення досліджень із вказівкою комбінацій змінних і параметрів, для яких повинне бути виконане моделювання об'єкта. Планування комп'ютерного експерименту покликано дати у підсумку максимальний об’єм необхідної інформації про об'єкт моделювання при мінімальних витратах часу. Після складання плану можна приступитися до робочих розрахунків на комп'ютері, які звичайно містять у собі: підготовку наборів вихідних даних для введення в програму; перевірку вихідних даних; проведення розрахунків; одержання вихідних даних, тобто результатів моделювання.

Етап 10. Інтерпретація результатів моделювання

Щоб ефективно використовувати отримані результати розрахунків, необхідно знати, як їх інтерпретувати. Необхідно, щоб на друк виводилися у

вигляді таблиць або графіків тільки ті результати, які потрібні для подальшого аналізу. При цьому слід ураховувати, що графіки більш наочно ілюструють результати моделювання.

Одержавши та проаналізувавши результати моделювання, їх потрібно інтерпретувати стосовно модельованого об'єкта. На основі цього можуть робитися висновки щодо характеристик об'єкта, формулюватись рекомендації із практичного використання результатів моделювання. Наприклад, по зміні конструкції об'єкта, його геометричних розмірів або на вибір оптимального режиму роботи обладнання.

1.6. Допущення

Математична модель описує реальний об'єкт завжди приблизно. У першу чергу це обумовлено тим, що при її розробці (на етапі схематизації процесу функціонування об'єкта) були прийняті різного роду допущення.

Допущення - навмисне спрощення, прийняте для розв'язку завдань; відхід від реального, але складного для математичного опису, до більш простого.

Допущення приймається розроблювачем математичної моделі та обґрунтовуються. Вибір допущень залежить від особливостей поставленого завдання. Приведемо деякі варіанти найбільше часто прийнятих допущень, згрупованих за декількома ознаками.

Типові допущення:

а) кінематики:

- обертання колінчатого вала кривошипно-шатунного механізму або валу електродвигуна відбувається з постійною кутовою швидкістю;
- траєкторія руху рухливих частин устаткування прямолінійна;
- зазори в зчленуваннях механізму відсутні;

б) динаміки:

- приймається спрощена схема діючих сил і точок їх прикладання;
- сили тертя відсутні;
- пружні деформації робочих органів відсутні;
- інерція не враховується (клапани відкриваються миттєво та

повністю);

- пульсації тиску відсутні;
- зміна тиску підкоряється синусоїдальному закону;
- маса рухливого тіла зосереджена в одній точці;

в) масообміну:

- витікання та перетікання через різні зазори, клапани відсутні;
- конденсації пар і випару краплинної рідини не відбувається;

г) теплових процесів:

- підводу та відводу тепла немає;
- теплом, що виділяються при терті, зневажаємо;
- усі стінки мають однакову температуру (або по групах поверхонь);
- температура поверхні (стінок) не міняється;

д) характеру об'єкта:

- реальний об'єкт із розподіленими параметрами розглядається як об'єкт із зосередженими параметрами, тобто значення параметрів об'єкта не залежать від просторових координат;
- робоче тіло, середовище - однорідне (пісок і інші механічні домішки відсутні);
- склад робочого тіла - постійний;
- газове середовище підкоряється законам ідеального газу;
- рідина нестислива;

е) характеру процесів

- процеси оборотні (не відбувається пластичних деформацій, розривів, випару, тертя тощо);
- процеси рівновісні (наприклад, випаровування відбувається при постійній температурі рідини);
- нестаціонарний процес розглядається як квазістаціонарний (тобто приймається, що параметри процесу на невеликому відрізку часу не змінюються);
- зміна параметрів відбувається одночасно у всьому контрольному обсязі (наприклад, тепло - передалося всій масі газу, тиск - змінився у повному

об’ємі одночасно)

ж) застосовуваного математичного опису:

- фізичні властивості розглядаються як константи, тоді легше робити перетворення;
- можливість застосування наближених залежностей (наприклад, широко застосовувана залежність для швидкості поршня кривошипного насоса є наближеною);
- поведінка об'єкта підкоряється певному закону (наприклад, стиск газу в поршневому компресорі описується рівнянням політропи з постійним показником);
- можливість застосування в математичній моделі експериментальних даних (у вигляді констант, коефіцієнтів або рівнянь регресії).

Звичайно при моделюванні спочатку ухвалюється багато допущень, і якщо результати обчислень по спрощеній моделі показують, що вона якісно вірно описує об'єкт і комп'ютерна програма працездатна, то частина з них поступово знімається або грубе допущення заміняється менш грубим.

1.7. Побудова та реалізація моделюючих алгоритмів роботи об'єктів

Робота будь-якого об'єкта описується звичайно декількома параметрами:

- характеристиками стану об'єкта, причому деякі із них можуть мати постійні значення, а інші - змінні. Так, стан робочого тіла в поршневому компресорі в кожний момент часу описують чотирма параметрами: тиском, температурою, об’ємом та масою.

У загальному випадку, процес роботи об'єкта можна розглядати як послідовну зміну його станів, описувану деякої функцією від часу:

$$Z(t) = \Phi\left(f_1(t), f_2(t), \ldots f_k(t)\right) \qquad (1.10)$$

Тут під функцією $\boldsymbol{\Phi}$ розуміється не якась аналітична залежність, а то, що кожному моменту часу відповідає певна комбінація значень $\boldsymbol{k}$ параметрів, які

залежать від часу, тобто є у свою чергу функціями часу $f_i(t)$, де $i = 1...A$. Таким чином, по-іншому можна записати:

$$\begin{matrix} f_1(t) \\ Z(t) = f_2(t), \\ f_k(t) \end{matrix} \qquad (1.11)$$

Так, для розглянутого прикладу - робочого процесу поршневого компресора - такими функціями є:

$$\begin{matrix} V(t) = f_1(t); \\ P(t) = f_2(t), \\ T(t) = f_3(t), \\ m(t) = f_4(t). \end{matrix} \qquad (1.12)$$

На основі цих функцій можна провести обчислення характеристик процесу роботи об'єкта, наприклад, індикаторну потужність. Для побудови системи, що визначає стан об'єкта $Z(t)$, повинні бути співвідношення (залежності), що зв'язують параметри $f(t)$ із вхідними в неї змінними, у тому числі - згодом, при цьому число співвідношень (формул) повинне рівнятися числу залежних змінних. Крім того, повинні бути відомі принципи завдання початкових умов, тобто значення параметрів у момент часу $t = t_0$: $f_1(t_0)$, $f_2(t_0)$, ... $f_k(t_0)$.

Помітимо, що в деякі вираження, що визначають залежність значень параметрів від часу, сам час може й не входити. Так, у розглянутому вище прикладі опису роботи поршневого компресора, від часу в явному виді може залежати тільки об’єм робочої камери $V(t) = f_1(t)$, а інші параметри тиск, температура та маса - визначаються вже через зміну об’єму.

Моделюючий алгоритм функціонування об'єкта при цьому може бути побудований у такий спосіб:

1. Організуємо лічильник часу, який у початковий момент показує час $t = t_0$.
2. Для цього моменту часу задаємо або обчислюємо значення функцій $f(t_0)$, таким чином, визначаємо початковий стан об'єкта:

$$Z(to) = Ф[0), f2(t0), - fk(t0)]$$

3. Додамо малий інтервал часу Δt, тоді лічильник буде показувати $t_i = t_0 + \Delta t$.

4. Обчислимо значення k параметрів, відповідні до цього моменту часу $f_i(t_i)$.

Значення $f_i(t_i)$ можуть бути визначені або прямим рахунком по формулі, що дає відразу значення параметра f, або обчисливши спочатку його збільшення, а потім додавши це збільшення до відомого $f_i(t_0)$:

$$f_i(t_i) = f(t_o) + 4f_i(t_o)$$

5. Потім перейдемо до моменту часу $t_2 = t_1 + \Delta t$ і обчислюємо значення параметрів у цей момент часу $f_i(t_i + \Delta t)$ тощо.

6. Таким шляхом можна одержати всі наближені значення функцій $f(t)$ у будь-який інший момент часу на розглянутому проміжку і, станів $Z(t)$, тобто змоделювати процес зміни станів розглянутого об'єкта.

Розглянутий принцип побудови алгоритмів називається *«принципом Δt»*. Це найбільш універсальний принцип, хоча з погляду витрат машинного часу він іноді виявляється неекономічним. При моделюванні по «принципу Δt» можна добитися досить високої точності: для цього Δt повинно бути малим.

При його використанні важливо, щоб дві неодночасні події, особливо взаємовиключні, не потрапили в той самий часовий інтервал.

Відзначимо, що існує два підходи до завдання часу: за допомогою постійних і змінних інтервалів часу. Змінний крок за часом застосовувати необхідно при наявності в роботі об'єкта особливих проміжків часу, при яких відбувається кардинальна зміна станів об'єкта. Наприклад, відкриття або закриття клапана насоса або компресора.

Слід також зазначити, що при реалізації розглянутого принципу буває важливо правильно вибирати послідовність визначення параметрів $f_i(t)$ для кожного моменту часу, тому що вони можуть впливати один на одного. Послідовність їх визначення вибирається за принципом: від самої незалежної - до найбільш залежної.

У ряді завдань обумовлені параметри стану зручно виражати не у вигляді явних функцій від часу або збільшень від часу, а у вигляді залежності від іншої

величини, жорстко зв'язаної з часом, наприклад, від кута повороту колінчатого вала або від лінійної координати. Так, при моделюванні багатьох видів устаткування - насосів, компресорів, штангових насосних установок і інших - у якості основної незалежної змінної обирається кут повороту валу або кривошипа. При цьому послідовно розглядаються стани об'єкта в моменти часу, що відстоять друг від друга на відрізок Δt, відповідний до обраного кроку по куту повороту.

При математичному моделюванні після опису концептуальної моделі розробляють моделюючий алгоритм, для чого становлять укрупнені і детальні схеми алгоритмів і схеми програм (ще їх називають блок-схеми), необхідні для наступного дослідження об'єкта на комп'ютерній моделі.

Схема алгоритму показує впорядковану в часі послідовність операцій, пов'язаних із розв'язком завдання моделювання.

Схема програми - відбиває порядок програмної реалізації моделюючого алгоритму, тобто вона являє собою інтерпретацію схеми алгоритму на базі конкретної алгоритмічної мови.

При цьому схема алгоритму може бути виконана як в *укрупненій,* так і в *детальній формі.*

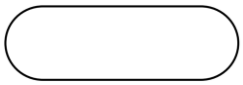
*Укрупнена схема алгоритму (*інша назва - *узагальнена)* задає загальний порядок дій при моделюванні процесу роботи об'єкта без будь-яких або уточнюючих деталей, тобто показує, ***що*** необхідно визначити або виконати на черговому кроці моделювання.

Детальна схема алгоритму містить уточнення, відсутні в укрупненій схемі та показує не тільки, ***що*** треба виконувати на черговому кроці моделювання, але і ***як*** це виконати.

Для зображення цих блок-схем використовується набір символів, обумовлених ГОСТ 19.701-90 «Єдина система програмної документації. Умовні позначки й правила виконання».

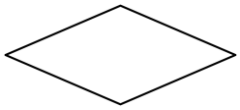
Деякі найбільш уживані символи:

- *вхід і вихід у зовнішнє середовище* - (початок і кінець алгоритму):



- *процес* - виконання однієї або групи операцій:

- *розв'язок* - має один вхід і ряд виходів, тільки один з яких може бути активізований при виконанні умови або умов, певних усередині цього символу:



- *підготовка* - відображає команду, що впливає на деяку наступну змінну або функцію (наприклад, установка перемикача, індексного регістру: *i=1...N):*

- *визначений процес* - відображає процес, операції якого визначені в іншому місці - підпрограмі, модулі:

- *ручна операція* - відображає будь-який процес, виконуваний людиною:

Розрізняють наступні основні види алгоритмів: лінійний, циклічний, алгоритм із розгалуженням.

Побудова схеми програми являє собою один з важливих моментів моделювання, при цьому повинна бути приділена увага особливостям мови програмування, обраної для реалізації моделі.

1.8. Алгоритмічні мови програмування й математичні пакети

Мови програмування мають, як правило, певну орієнтацію. Для моделювання об'єктів і процесів існує кілька сотень різних алгоритмічних мов.

Їх можна розбити на 2 групи:

- спеціалізовані мови імітаційного моделювання (MIMIC**,** DYNAMO, GASP, GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT, Borland Delphi і ін.)
- мови загального призначення, або мови високого рівня (PL/1, C++, Basic, FORTRAN, PASCAL, COBOL і ін.)

Звичайно мови мають певну орієнтацію. Так, мови імітаційного моделювання залежно від спрямованості (орієнтації) можна розділити на підгрупи, представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Підгрупи мов по їхній орієнтації

Група мов	Спрямованість (орієнтація) мови	Приклади мов
Мови імітаційного моделювання	На пряме використання диференціальних рівнянь	***MIMIC***
	На блокову імітацію диференціальних рівнянь	***DYNAMO***
	На стани й час	***GASP***
	На дії	***FORSIM, CSL***
	На процеси	***GPSS, SIMULA, SOL***
	На події	***SIMSCRIPT, GASP***
	На об'єкти	***Visual Basic, Borland Delphi,*** C#, ***Java***
Мови загального призначення	На обробку даних	***COBOL***
	На розрахунки	***FORTRAN, PASCAL***
	Багатоцільові	***PL/1, C++, Basic***

GPSS *(General Purpose Simulation System* - загальноцільова система моделювання) – мова програмування, використовувана для імітаційного моделювання різних систем, в основному - систем масового обслуговування.

Система GPSS була розроблена співробітником фірми IBM Д. Гордоном в

1961 году. У нашій країні ця мова завоювала популярність після видання в СССР в 1980 году монографії Т.Д. Шрайбера. У ній була розглянута одна з ранніх версій мови - GPSS/360, а також основні особливості могутнішої версії - GPSS V, підтримуваною компанією IBM. В 1984 году з'явилася перша версія GPSS для персональних комп'ютерів з операційною системою DOS - GPSS/PC. Вона була розроблена компанією Minuteman Software під керівництвом С. Кокса. Кінець XX століття ознаменувався розробкою компанією Minuteman Software програмного продукту **GPSS World**, що побачив світло в 1993 году. За порівняно невеликий період часу було випущено кілька його версій, причому в кожній наступній можливості системи моделювання нарощувалися.

Паскаль (англ. Pascal) – мова програмування загального призначення. Одна з найбільш відомих мов програмування, широко застосовувалася в промисловому програмуванні [4], навчанні програмуванню у вищій школі, є базою для ряду інших мов.

Особливостями мови є строга типізація і наявність засобів структурного (процедурного) програмування. Паскаль була однією із перших таких мов. На думку Н. Вирта, мова повинна сприяти дисциплінуванню програмування, тому, поряд зі строгою типізацією, у Паскалі зведені до мінімуму можливі синтаксичні неоднозначності, а сам синтаксис автор постарався зробити інтуїтивно зрозумілим навіть при першому знайомстві з мовою.

Відомо кілька діалектів цієї мови (Free Pascal, GNU Pascal, Object Pascal, Turbo Pascal). Найбільш відомою реалізацією Паскаля, що забезпечила широке поширення та розвиток мови, є Turbo Pascal фірми Borland, яка виросла потім в об'єктний Паскаль для DOS (починаючи з версії 5.5) і Windows і далі в Delphi, у якій були впроваджені значні розширення мови.

Сі (англ. **C**) – стандартизована процедурна мова програмування, розроблена на початку 1970-х років співробітниками Bell Labs Кеном Томпсоном і Денисом Ритчи як розвиток мови Би. Сі був створений для використання в операційній системі UNIX. З тих пір вона була портована на багато інших операційних систем і стала однією із самих використовуваних мов програмування. Сі цінують за її ефективність. Вона є самою популярною

мовою для створення системного програмного забезпечення. Її також часто використовують для створення прикладних програм. Незважаючи на те, що Сі не розроблялася для новачків, вона активно використовується для навчання програмуванню. Надалі синтаксис мови Сі став основою для багатьох інших мов.

Для мови Сі характерні лаконічність, стандартний набір конструкцій керування потоком виконання, структур даних і великий набір операцій.

C++ - компільована статично типізована мова програмування загального призначення. Підтримуючи різні методології програмування, поєднує властивості як мов високого так і низького рівнів. У порівнянні з попередницею - мовою **C**, - найбільша увага приділена підтримці об'єктно – орієнтованого та узагальненого програмування.

Будучи однією із самих популярних мов програмування, **C++** широко використовується для розробки програмного забезпечення. Область її застосування включає створення операційних систем, різноманітних прикладних програм, драйверів обладнання, додатків для систем, високопродуктивних серверів, а також розважальних додатків. Існує кілька реалізацій мови **C++** як безкоштовних, так і комерційних. **C++** вплинула на інші мови програмування, у першу чергу на Java і C#.

При створенні **C++** Бьёрн Страуструп прагнув зберегти сумісність із мовою С. Безліч програм, які можуть однаково успішно транслюватися як компіляторами С, так і компіляторами **C++,** завдяки тому, що синтаксис С++ був заснований на синтаксисі С.

C# (вимовляється *си-шарп)* – об'єктно – орієнтована мова програмування. Розроблена в 1998-2001 годах групою інженерів під керівництвом Андерса Хейлсберга у компанії Microsoft як мова розробки додатків для платформи Microsoft.NET Framework і згодом була стандартизована як ECMA-334 і ISO/IEC 23270.

Мова **C#** відноситься до родини мов з С- подібним синтаксисом, з них її синтаксис найбільш близький до **C++** і Java. Мова має статичну типізацію, підтримує поліморфізм, перезавантаження операторів (у тому числі операторів

явного та неявного приведення типу), делегування, атрибути, події, властивості, узагальнені типи та методи, ітератори, анонімні функції із підтримкою замикань, LINQ, виключення, коментарі у форматі XML.

Як і більшість мов, **C#** має версії. Останні версії - **C#7.0** випущена та змінена в грудні 2017 року.

Java - об'єктно-орієнтована мова програмування, розроблена компанією Sun Microsystems. Додатки Java звичайно компілюються в спеціальний байт-код, тому вони можуть працювати на будь-якій віртуальній Java-Машині (JVM) незалежно від комп'ютерної архітектури. Дата офіційного випуску - 23 травня 1995 року.

Перевага подібного способу виконання програм - у повній незалежності байт-коду від операційної системи та обладнання, що дозволяє виконувати Java-Додатки на будь-якому обладнанні, для якого існує відповідна віртуальна машина. Іншою важливою особливістю технології Java є гнучка система безпеки завдяки тому, що виконання програми повністю контролюється віртуальною машиною. Будь-які операції, які перевищують установлені повноваження програми (наприклад, спроба несанкціонованого доступу до даних або з'єднання з іншим комп'ютером) викликають негайне переривання.

Часто до недоліків концепції віртуальної машини відносять те, що виконання байт-коду віртуальною машиною може знижувати продуктивність програм і алгоритмів, реалізованих мовою Java. Останнім часом був внесений ряд удосконалень, які трохи збільшили швидкість виконання програм на Java.

За деякими даними, для семи різних завдань час виконання на Java становить у середньому в півтора-два рази більше, чим для C/C++, у деяких випадках Java швидше, а в окремих випадках в 7 раз повільніше. З іншого боку, для більшості з них споживання пам'яті Java - Машиною було в 10-30 раз більше, ніж програмою на C/C++. Також примітне дослідження, проведене компанією Google, згідно з яким відзначається суттєво більш низька продуктивність і більше споживання пам'яті в тестових прикладах на Java у порівнянні з аналогічними програмами на C++. Реліз останньої версії мови Java - Java 7 - відбувся 28 липня 2017 року.

При аналізі ефективності застосування тієї або іншої мови для моделювання конкретного об'єкта оцінюють такі властивості:

- можливість опису алгоритмів поведінки об'єкта в термінах мови;
- поширеність мови;
- наявність стандартних підпрограм;
- зручність обробки й подання результатів розрахунків;
- зручність застосування для комп'ютерної реалізації математичної моделі;
- перевага користувача (більш знайомій мові).

Користувач звичайно віддає перевагу мовам, що володіють більшою гнучкістю при мінімальній кількості команд.

Останнім часом широко стали застосовуватися проблемно-орієнтовані комплекси - пакети прикладних програм, трансформовані надалі у своєрідні комп'ютерні системи. Однією з такий систем є Mathcad, називаний різними авторами як математичний пакет, математичний редактор, універсальна система комп'ютерної математики, універсальне середовище.

1.9. Планування комп'ютерних експериментів

Завдання планування комп'ютерних експериментів з моделлю формулюється в такий спосіб: необхідно одержати вичерпну інформацію про об'єкт моделювання, заданого у вигляді моделюючого алгоритму та реалізованого за допомогою програми, при мінімальних або обмежених витратах комп'ютерних ресурсів і часу на реалізацію процесу моделювання.

Таким чином, при комп'ютерному моделюванні слід планувати технологію використання математичної моделі, тобто порядок проведення на її основі експериментів (різних варіантів розрахунків) з використанням комп'ютера.

До теперішнього часу у фізиці, біології тощо склалася теорія планування експериментів, у якій розроблені досить потужні математичні методи, що

дозволяють підвищити ефективність таких експериментів. Але перенос цих результатів на область комп'ютерних експериментів з моделями може мати місце тільки з урахуванням специфіки моделювання систем на персональному комп'ютері.

Незважаючи на те, що цілі моделювання на комп'ютері та проведення натурних експериментів збігаються, між цими двома видами існують відмінності. Особливості експерименту на комп'ютері за допомогою моделі:

- простота повторення умов комп'ютерного експерименту;

- можливість керування експериментом з моделлю, включаючи його переривання й поновлення;

- легкість варіювання умов проведення експерименту (впливів зовнішнього середовища, режимів);

- можливість варіювання значень тільки одного параметра при фіксованих значеннях інших.

Розглянемо далі основні поняття теорії планування експериментів.

Розрізняють вхідні та вихідні *змінні.* Залежно від того, яку роль відіграє кожна змінна в проведеному експерименті, вона може бути або *фактором,* або *відгуком (реакцією).* Нехай, наприклад, мають місце тільки дві змінні: ***x*** і ***y.*** Тоді якщо ціль експерименту - вивчення впливу змінному ***x*** на змінну ***y,*** то ***x*** є чинником, а ***y*** - відгуком.

Кожний фактор ***xt,*** може ухвалювати в експерименті одне із декількох значень, називаних *рівнями.* Фіксований набір рівнів усіх факторів визначає одне з можливих станів розглянутої системи. Одночасно цей набір являє собою умови проведення одного із можливих режимів роботи об'єкта.

Кожному фіксованому набору рівнів факторів відповідає певна точка в багатомірному просторі, називаному *факторним простором.* Експеримент, у якому реалізуються всі можливі комбінації рівнів факторів (тобто перебираються всі можливі варіанти), називається *повним факторним експериментом.*

При плануванні експериментів необхідно визначити основні *властивості факторів.*

Фактори при проведенні експериментів можуть бути керованими та некерованими, спостережуваними та неспостережуваними, досліджуваними та недосліджуваними, кількісними і якісними, фіксованими й випадковими.

Фактор називається *керованим,* якщо його рівні цілеспрямовано вибираються дослідником у процесі експерименту. При комп'ютерній реалізації моделі дослідник ухвалює рішення, управляючи зміною в припустимих межах різних факторів.

Фактор називається *спостережуваним,* якщо його значення спостерігаються й реєструються. Звичайно в комп'ютерному експерименті з моделлю спостережувані фактори збігаються з керованими. Але некерований фактор також можна спостерігати. *Спостережувані некеровані фактори* одержали назву *супутніх.* Звичайно при комп'ютерному експерименті з моделлю число супутніх факторів велике, тому раціонально враховувати вплив лише тих з них, які найбільше суттєво впливають на реакцію, що цікавить дослідника.

Фактор відноситься до *досліджуваних,* якщо він включений у модель для вивчення властивостей об'єкта, а не для допоміжних цілей, наприклад для збільшення точності експерименту.

Фактор є *кількісним,* якщо його значення - числові величини, що впливають на реакцію, а якщо ні, то *фактор* називається *якісним* (наприклад: розтягання, стиск, усмоктування й ін.).

Фактор називається *фіксованим,* якщо в експерименті можуть бути досліджені будь-які значення фактору, що цікавлять експериментатора, а якщо експериментатор досліджує тільки деяку випадкову вибірку із сукупності значень факторів, що цікавлять, *то* фактор *називається випадковим.* На підставі випадкових факторів можуть бути зроблені імовірнісні висновки і про ті значення факторів, які в експерименті не досліджувалися.

Основними вимогами до факторів для успішного проведення обчислювального експерименту, є:

- керованість фактору;
- безпосередній вплив на об'єкт;

- сумісності факторів;
- незалежності факторів.

Під керованістю фактору розуміється можливість установки та підтримки обраного потрібного рівня фактору постійним протягом усього випробування або мінливим відповідно до заданої програми;

Вимога безпосереднього впливу на об'єкт має велике значення у зв'язку з тим, що важко керувати фактором, якщо він є функцією інших факторів.

При плануванні експерименту звичайно одночасно змінюється декілька факторів. Сумісність факторів означає, що всі їх комбінації здійсненні.

Незалежність означає можливість установлення фактору на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших.

План комп'ютерного експерименту за допомогою математичної моделі - це сукупність варіантів розрахунків, кожний з яких характеризується набором фіксованих значень керованих незалежних факторів.

Кількість варіантів і набір керованих факторів та досліджуваних відгуків визначає експериментатор виходячи із завдання.

1.10. Адекватність і точність математичної моделі

Поняття адекватності й точності моделі

Існує відмінність між поняттями адекватності і точності математичної моделі. У загальному випадку математична модель малої точності може бути адекватною при розв'язку певного завдання.

Під *адекватністю* математичної моделі розуміють:

1) правильний якісний опис об'єкта (процесу) по обраних параметрах стану;

2) правильний кількісний опис об'єкта (процесу) по обраній характеристиці стану з деяким прийнятним і обґрунтованим ступенем точності.

Точність математичного моделювання обумовлена похибками, що мають місце. Похибка математичного моделювання роботи технологічних машин, що визначають ступінь точності моделі, можна розділити на наступні групи:

δ_1 - похибки від спрощень при постановці завдання;

δ_2 - похибки, обумовлені схематизацією процесів і прийнятими допущеннями;

δ_3 - похибки використовуваних залежностей і методів розрахунків процесів і явищ;

δ_4 - похибки, викликані вибором і завданням коефіцієнтів у математичній моделі;

δ_5 - похибки від невизначеності вихідної інформації;

δ_6 - обчислювальні похибки.

Сумарна відносна похибка обчислюється по формулі:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{6} \delta_i^2} \qquad (1.13)$$

Похибки ∂_1, ∂_2, ∂_3 і ∂_4 пов'язані з побудовою математичних моделей і відбивають втрату точності внаслідок спрощень і допущень, прийнятих при математичному описі роботи об'єкта процесів, що й протікають у них.

Похибки ∂_5 і ∂_6 обумовлені реалізацією моделі.

При аналізі результатів моделювання роботи об'єкта виникає завдання оцінки *чутливості моделі* до варіацій її параметрів. Аналіз чутливості дозволяє порівнювати методичні похибки, отримані при побудові моделі, з неточностями завдання вихідних даних.

Перевірка адекватності моделі

Математична модель об'єкта є лише його певним аналогом у рамках прийнятих допущень і відповідної до схематизації. Тому значення змінних (відгуків), одержувані на моделі й на реальному об'єкті, різняться. Тут виникає завдання встановлення близькості моделі реальному об'єкту (установлення адекватності моделі).

Однак у багатьох випадках при моделюванні немає необхідності відтворювати всі можливості оригіналу. У цьому випадку говорять про ступінь адекватності побудованої моделі стосовно оригіналу.

Перш ніж приступити до перевірки й установлення адекватності,

необхідно виробити критерій, який дозволив би зробити висновок про відповідність моделі та об'єкта.

Розбіжності між експериментальними значеннями і відповідними значеннями, обчисленими по моделі, можна розглядати як випадкові величини. Тоді встановлення адекватності можна проводити за допомогою одного з методів перевірки статистичних гіпотез, застосовуваних при обробці експериментальних даних. Статистичний аналіз відхилень результатів розрахунків від експериментальних даних дозволяє дати відповідь на запитання про те, чи правильно, і якщо так, то з якою точністю описує розроблена модель розглянутий процес або поведінку об'єкта. Причому слід мати на увазі, що результати, отримані при проведенні натурного експерименту, характеризуються теж певними погрішностями.

У випадку коли досліджується вплив одного параметра - фактора на один параметр-відгук, адекватність математичної моделі може бути перевірена за допомогою критерію Фішера (F-*Критерію*).

Критерій Фішера формується як відношення дисперсії адекватності S^2_{ad}, до дисперсії відтворюваності S^2_B :

$$F = \frac{S^2_{ад}}{S^2_B} \qquad (1.14)$$

Дисперсія відтворюваності S^2_B характеризує розсіювання результатів вимірів в експерименті, а дисперсія адекватності S^2_{ad} характеризує розсіювання середніх результатів вимірів, отриманих в експерименті, щодо результатів розрахунків за допомогою математичної моделі на відповідних режимах. Вони визначаються з урахуванням числа ступенів вільності дисперсії адекватності $\boldsymbol{f_{ad}}$ і числа ступенів свободи дисперсії відтворюваності $\boldsymbol{f_в}$ у такий спосіб:

$$S^2_в = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{m}\left(P_{j,i} - \bar{P}_j\right)^2}{f_в} \qquad (1.15)$$

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_{j=1}^{N}\left(\bar{P}_j - P_j^{мод}\right)^2}{f_{ад}} \qquad (1.16)$$

$$f_в = N \cdot (m-1) \tag{1.17}$$

$$f_{ад} = N - n \tag{1.18}$$

де ***N*** - число режимів роботи об'єкта;

m - число вимірювань (повторних дослідів) на даному режимі;

n - число коефіцієнтів моделі, що налагоджується;

P_{ji} - значення досліджуваного параметра (відгуку) при *i* - тому вимірюванні на *j* - тому режимі;

$\overline{P}_j$ - середнє значення вимірів параметра на *j* - тому режимі ;

$P_j^{мод}$ - значення параметра, обчислене за допомогою моделі.

f - число ступенів свободи дисперсії адекватності;

f_b - число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

Отримане значення критерію Фішера ***F*** порівнюється з *табличним* значенням цього критерію при відповідних числах ступенів вільності і прийнятому рівні значимості *q* (від 0,1% до 5%). Якщо обчислене значення критерію ***F*** виявиться менше табличного значення критерію Фішера $F_т$, тобто

$$F < F_{m(fад,fв,q/2)}, \tag{1.19}$$

то вважається, що *дисперсії* адекватності і відтворюваності *незначно відрізняються одна від іншої* і математична ***модель адекватна*** реальному об'єкту (експерименту на реальному об'єкті). Табличні значення критерію Фішера приводяться в технічній літературі, наприклад - у довіднику [3].

Розглянемо наступний приклад.

Припустимо, що ми оцінюємо адекватність математичної моделі робочого процесу поршневого компресора.

Поставлено завдання дослідження впливу - режиму охолодження на зниження температури нагнітання компресора. Була виконана серія розрахунків з використанням математичної моделі, і проведено реальний експеримент на 4 режимах, причому зробили по 5 вимірів температури нагнітання на кожному режимі.

Результати, отримані у експерименті на реальній машині і при розрахунках за допомогою математичної моделі, наведено в таблиці 1.5. При цьому температура нагнітання, вимірювана в експерименті, усереднена по п'яти вимірювань.

Таблиця 1.5 - Результати експерименту та моделювання

Параметри	№ режиму			
	1 (базовий)	2	3	4
Температура нагнітання (середня)	407,3	398,9	387,1	383,5
Температура нагнітання розрахункова	422,2	413,1	402,9	395,8
Зниження температури (експеримент)	-	8,4	20,2	23,8
Зниження температури (розрахунки)	-	9,2	19,2	26,3

У нашому випадку число режимів $N = 3$, так як перший режим роботи є базовим і з ним іде порівняння трьох інших режимів, за умовами прикладу, число вимірів (повторних дослідів) на кожному режимі $m = 4 .. 5$, а число налагоджувальних коефіцієнтів моделі $n=0$. Відповідно до формул (1.17) і (1.18) маємо:

$$f_{ad} = 3,\ f_в = 12.$$

Тоді по формулах (1.14) - (1.16) одержимо:

$$S^2_{ad} = 13{,}26,\ S_B = 3{,}15,\ F=13{,}26/3{,}15=4{,}2$$

Табличне значення критерію Фішера $F_{T3;12;2,5} = 4{,}47$.

Оскільки виконується умова $F<F_T$, то оцінювана модель адекватна реальному об'єкту (експерименту) при рівні значимості 5%.

Слід зазначити, що коректна перевірка адекватності моделі - досить складна процедура, тому що в більшості випадків ми маємо справу не з одновідгуковими, а із багатовідгуковими моделями, тобто звичайно досліджується вплив зміни якогось параметра на декілька інших.

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ MATHCAD У ЗАВДАННЯХ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Основні відомості про систему Mathcad

Для виконання розрахунків і проведення досліджень із використанням математичної моделі та комп'ютера можна застосовувати як програми, складені на одній із алгоритмічних мов високого рівня (Паскаль, С++ і ін.), так і спеціальних математичних пакетів типу Mathlab, Derive, Mathcad. Як уже вказувалося раніше, саме Mathcad стає незамінним інструментом студента та інженера завдяки ряду особливостей, що визначають його стрімке поширення, а саме:

- Mathcad є найбільш універсальною обчислювальною системою із пропонованих у цей час;
- Усі формули та рівняння записуються в середовищі Mathcad у загальноприйнятому математичному виді. В інших пакетах комп'ютерної математики використовується складний синтаксис, який швидко забувається, якщо не працювати із цим пакетом постійно;
- Дії користувача при записі й редагуванні завдання мають багато загального з роботою в редакторі Word;
- У пакет вбудований потужний математичний апарат, що дозволяє одержувати розв'язки завдань як у чисельному, так і в аналітичному виді;
- Пакет має зручні засоби графічного подання інформації;
- Mathcad дозволяє вставляти в документ будь-які графічні зображення, а також тексти, написані за допомогою редактора Word.

Система Mathcad включає наступні функціональні компоненти:

- систему меню різних рівнів вкладеності;
- великий набір панелей інструментів;
- текстовий редактор для коментування обчислень;
- редактор формул;

- редактор графіків;
- обчислювальну систему, зручну для виконання математичних операцій як у чисельному, так і в аналітичному (символьному) виді.

Система Mathcad спочатку (в 1988 році) створювалася для чисельного розв'язку математичних завдань, потім у неї були додані інструменти символьної математики, а починаючи з версії Mathcad 8 і оператори програмування, у результаті чого вона перетворилася в універсальну систему, зручну для розв'язку більшості інженерних і наукових завдань.

Система Mathcad існує в декількох варіантах, які поступово обновляються. Останні версії Mathcad зі споживчої точки зору практично не відрізняються друг від друга і рекомендуються для використання.

Для виконання розрахунків і моделювання процесів роботи обладнання за допомогою системи Mathcad можна виконувати як усі дії, тобто розрахунки в цілому, так і окремі перетворення, знаходження коефіцієнтів рівнянь регресії, які надалі можуть бути використані при розробці математичної моделі та написанні програми розрахунків мовою високого рівня. До основних можливостей системи Mathcad, які зручно використовувати при математичному моделюванні та виконанні технологічних процесів і розрахунків устаткування на міцність, відносяться наступні:

- аналітичний і чисельний розв'язок квадратного рівняння;
- аналітичний і чисельний розв'язок системи нелінійних рівнянь;
- диференціювання виразів;
- обчислення невизначеного і визначеного інтегралів;
- спрощення математичних виразів, розкладання їх на прості множники, приведення подібних членів;
- розкладання виразів у ряд Тейлора;
- перетворення виразів відносно заданої змінної (пряме й зворотне перетворення Фур'є, Лапласа та Z-Перетворення);
- аналітичний розв'язок диференціальних рівнянь (потрібне

попереднє виконання перетворення Лапласа);

- чисельний розв'язок диференціальних рівнянь;
- визначення коефіцієнтів у рівняннях регресії декількох видів;
- виконання операцій з матрицями;
- виконання різноманітних розрахунків (із застосуванням індексованих змінних);
- застосування операторів програмування для організації циклів і умовних переходів;
- побудова графіків у декартових і полярних координатах, їх трасування.

Оскільки короткий розгляд усіх можливостей системи Mathcad зажадало б об’єму цілої книги, у цьому посібнику розглядаються лише деякі найбільш необхідні відомості й прийом виконання обчислень. Більш докладний опис системи Mathcad можна знайти в літературі, наприклад в [7-10].

2.2. Моделювання роботи кривошипно-шатунного механізму

Кривошипно-шатунний механізм є основою багатьох поршневих машин – насосів, компресорів, двигунів внутрішнього згоряння та інших. Тому моделювати роботу таких об’єктів слід починати з моделювання роботи їх основи, при цьому зручніше за все застосовувати для відстеження значень мінливих параметрів індексовані змінні.

Схема кривошипно-шатунного механізму наведена на рис. 2.1.

При обертанні кривошипа радіусом r з деякою кутовою швидкістю ω, відповідною до частоти обертання n, і повороті його на кут φ відбувається переміщення по колу одного кінця шатуна, що має довжину L. При цьому інший кінець шатуна і пов’язаний із ним поршень (повзун, крейцкопф) переміститься від верхньої мертвої точки на переміщення S. Максимальне переміщення – довжина ходу S_h, мабуть, дорівнює подвоєному радіусу

кривошипа.

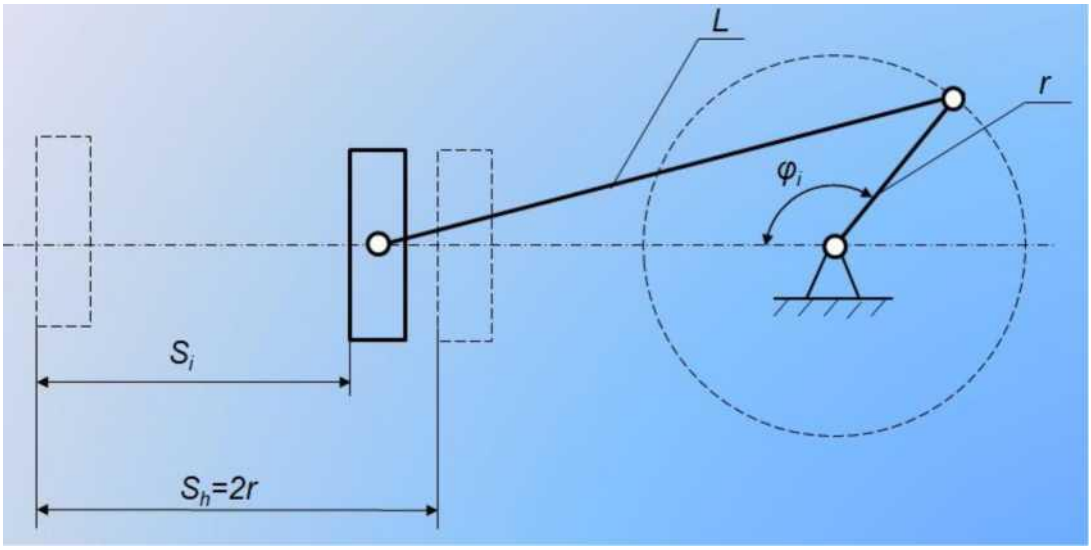


Рисунок 2.1 - Схема кривошипно-шатунного механізму

Незалежною змінною у розглянутому завданні є кут повороту ***φ,*** а точний вираз залежності переміщення ***S*** від кута повороту має вигляд:

$$S = r \cdot \left[1 - \cos(\varphi) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(\varphi)^2 \right] \qquad (2.1)$$

де λ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна.

Припустимо, відноситься завдання побудувати графіки залежностей переміщення ***S***, швидкості ***v*** і прискорення ***a*** поршня кривошипно-шатунного механізма при наступних вихідних даних: радіус кривошипа ***r*** = 0,1 м, довжина шатуна ***L*** = 0,5 м, частота обертання ***n*** = 25 $с^{-1}$.

Перша частина програми, у якій повинні бути задані вихідні дані, виконані підготовчі (попередні) обчислення, виконане завдання незалежної змінної й початкових умов виглядає в такий спосіб:

1. Вихідні дані:

r := 0.1 L := 0.5 n := 25

Попередні обчислення (підготовка):

$\lambda := \frac{r}{L}$ $\omega := 2 \cdot \pi \cdot n$

3. Завдання незалежної змінної:

Розіб'ємо весь інтервал (1 оборот кривошипа) на N частин:

$N := 360 \quad \Delta\phi := \frac{2\cdot\pi}{N} \quad i := 0 .. N - 1$

$\phi_0 := 0$

$\phi_{i+1} := \phi_i + \Delta\phi$

4 Початкові умови:

$\phi_0 := 0 \quad S_0 := 0 \quad v_0 := 0 \quad a_0 :=$ ▮

Початкові умови задаються виходячи зі знань про параметри процесів, що протікають. Відомо, що у верхній мертвій точці переміщення і швидкість дорівнюють нулю, а прискорення має максимальне значення, але воно невідомо. У такому випадку можна задати його навмання, а потім відкоригувати за отриманими результатами.

Обчислення переміщення проводиться по одній з можливих форм запису:

$$S_{i+1} = r\cdot\left(1-\cos\left(\varphi_{i+1}\right)+\frac{\lambda}{2}\cdot\sin\left(\varphi_{i+1}\right)^2\right) \qquad (2.2)$$

$$S := r\cdot\left(1-\cos\left(\varphi\right)+\frac{\lambda}{2}\cdot\sin\left(\varphi\right)^2\right) \qquad (2.3)$$

У першому варіанті представлено запис залежності однієї індексованої змінної ***S*** від іншої ***φ***. Другий варіант у розглянутому завданні також можливий, при цьому змінна ***S*** буде сприйматися системою теж як індексована, тому що в правій частині рівняння використано одна індексована змінна ***φ***, яка вже відома системі.

З нашого досвіду, таке спрощене написання індексованих змінних можливе у тих випадках, коли в правій частині формули застосовуються операції додавання, вирахування та розподілу двох зміних, а також ряд інших комбінацій. Можливе множення або розподіл трьох індексованих змінних. Але при множенні двох, чотирьох або шести індексованих змінних і в ряді інших випадків, така форма запису приводить до некоректного сприйняття формули системою Mathcad.

Розрахунки швидкості та прискорення можна зробити не по явних

залежностях, висновок яких був показаний раніше (див. пункт 2.), а виходячи з фундаментальних положень, що швидкість – це переміщення (зміна координати) за малий проміжок часу, а прискорення – це збільшення швидкості за малий проміжок часу.

Розрахунки швидкості

$$\Delta t := \frac{\Delta\phi}{\omega}$$

$$\Delta S_{i+1} := S_{i+1} - S_i$$

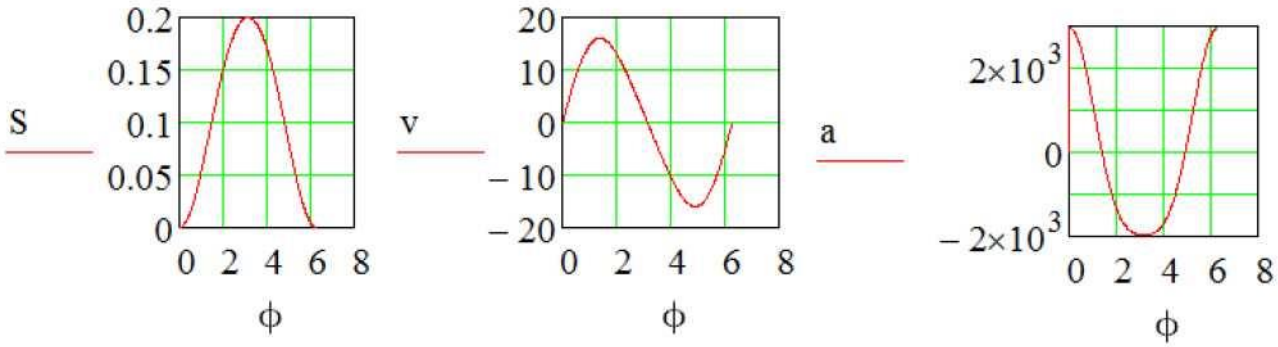
$$v_{i+1} := \frac{\Delta S_{i+1}}{\Delta t}$$

Розрахунки прискорення

$$\Delta v_{i+1} := v_{i+1} - v_i$$

$$a_{i+1} := \frac{\Delta v_{i+1}}{\Delta t}$$

Графіки розрахованих параметрів залежно від незалежної змінної будуть виглядати в такий спосіб:



На графіку прискорення спостерігається стрибок в межах нульового значення кута повороту. Щоб довідатися значення змінної на графіку, можна застосувати прийом «трасування». Для цього правою кнопкою миші потрібно кликнути по будь-якій точці графічного блоку і у меню, що з’явився, вибрати «трасування», після чого з’явиться відповідне вікно. Приклад цієї процедури показано на рис. 2.2.

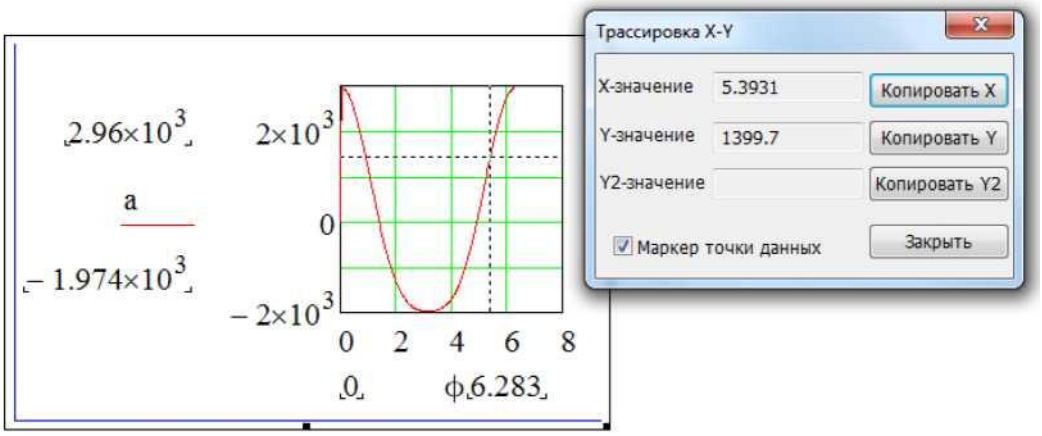


Рисунок 2.2. Приклад використання вікна «трасування»

Установивши курсор на лінії графічної залежності в місці, що цікавить нас, ми у відповідних гніздах цього вікна будемо бачити значення змінних по осях абсцис і ординат. Переміщуючи стрілки на клавіатурі вправо або вліво ми побачимо, які значення були на кожному кроці рахунку. У такий спосіб можна подивитися і значення в крайніх точках графіка.

Вивести для контролю значення індексованих змінних у будь-який момент, що цікавить нас (наприклад, у середині й наприкінці розглянутого інтервалу) можна в такий спосіб:

$$\phi_{\frac{N}{2}} = 3.142 \qquad a_{\frac{N}{2}} = -1.974 \times 10^3$$

$$\phi_N = 6.283 \qquad a_N = 2.96 \times 10^3$$

Відзначимо, що при бажанні виконати моделювання роботи кривошипно-шатунного механізму не за один, а за кілька оборотів, можна змінити лише верхню границю діапазону індексу, наприклад:

$$i := 0 .. 3 \cdot N - 1$$

У такому випадку все графіки будуть показані за три обороти.

2.3. Моделювання роботи одноциліндрового поршневого насоса

Маючи працюючу програму, що дозволяє моделювати кривошипно-шатунний механізм, моделювання поршневого насоса не представляє ніякої

складності. На рис. 2.3 наведена схема одноциліндрового насоса подвійної дії.

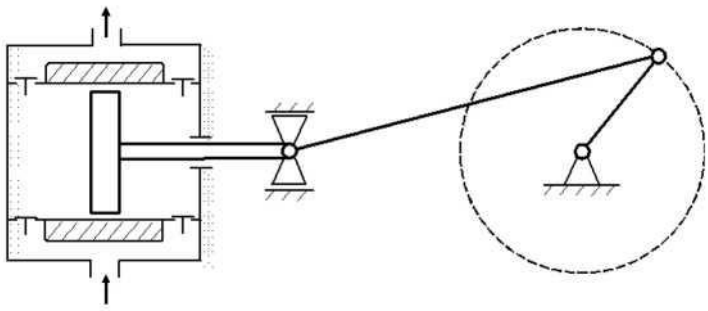


Рисунок 2.3. Схема одноциліндрового насоса подвійної дії

У якості незалежної змінної приймемо кут повороту, що відповідає лівій (поршневіцй) камері, а кут повороту штокової (правої) камери буде зміщений щодо неї на ***n*** радіан. Тоді переміщення для лівої і правої камер будуть відповідно рівні:

$$S1 = r \cdot \left(1 - \cos(\varphi) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(\varphi)^2\right) \qquad (2.4)$$

$$S2 = r \cdot \left(1 - \cos(\varphi + \pi) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(\varphi + \pi)^2\right) \qquad (2.5)$$

Прийнявши змінну $\boldsymbol{\varphi}$ за незалежну, визначаємо крок рахунку за часом Δt, далі для кожної камери визначаємо: переміщення ***S;*** об'єм ***V;*** зміну об'єму ΔV; об'єм порції рідини, що виштовхується за крок ΔV_n; далі для насоса в цілому: подачу (миттєву) ***Q;*** середню подачу $\boldsymbol{Q_{ср}}$; коефіцієнт нерівномірності подачі $\boldsymbol{k_н}$ і ступінь нерівномірності подачі $C_н$.

Оскільки показаний вище алгоритм є чисто лінійним, тобто без розгалужень і циклів, то відповідна йому програма в Mathcad не вимагає застосування операторів програмування і може бути наступною.

1. Вихідні дані:

$r := 0.1 \qquad L := 0.5 \qquad D := 0.25 \qquad d := 0.04 \qquad n := 2$

2. Попередні обчислення:

$$\lambda := \frac{r}{L} \qquad \omega := 2 \cdot \pi \cdot n \qquad F := \pi \frac{D^2}{4} \qquad f := \pi \frac{D^2 - d^2}{4}$$

3. Завдання незалежної змінної:

$N := 3600 \qquad \Delta\varphi := \frac{2\cdot\pi}{N} \qquad i := 0..N$

$\varphi_0 := 0$

$\varphi_{i+1} := \varphi_i + \Delta\varphi$

4. Крок рахунку за часом:

$\Delta t := \frac{\Delta\varphi}{\omega}$

5. Початкові умови:

$\varphi_0 := 0 \qquad S1_0 := 0 \qquad S2_0 := r\cdot\left(1 - \cos(\varphi_0 + \pi) + \frac{\lambda}{2}\cdot\sin(\varphi_0 + \pi)^2\right)$

$V1_0 := S1_0\cdot F \qquad V2_0 := S2_0\cdot f$

6. Обчислення:

Переміщення

$S1 := r\cdot\left(1 - \cos(\varphi) + \frac{\lambda}{2}\cdot\sin(\varphi)^2\right)$

$S2 := r\cdot\left(1 - \cos(\varphi + \pi) + \frac{\lambda}{2}\cdot\sin(\varphi + \pi)^2\right)$

Об’єми камер

$V1_{i+1} := S1_{i+1}\cdot F \qquad V2_{i+1} := S2_{i+1}\cdot f$

Зміна об’ємів камер за крок

$\Delta V1_i := V1_{i+1} - V1_i \qquad \Delta V2_i := V2_{i+1} - V2_i$

Об’єм порцій, що виштовхуються за крок

$\Delta V1_{П_i} := \text{if}(V1_{i+1} < V1_i, -\Delta V1_i, 0) \qquad \Delta V2_{П_i} := \text{if}(V2_{i+1} < V2_i, -\Delta V2_i, 0)$

Подача насоса (миттєва)

$Q := \frac{\Delta V1_П + \Delta V2_П}{\Delta t}$

Тривалість одного циклу роботи

$t_Ц := \frac{2\cdot\pi}{\omega}$

Об’єм порцій, що виштовхуються за цикл

$\Delta V_Ц := \sum_{i=0}^{N}\left(\Delta V1_{П_i} + \Delta V2_{П_i}\right)$

Подача насоса (середня)

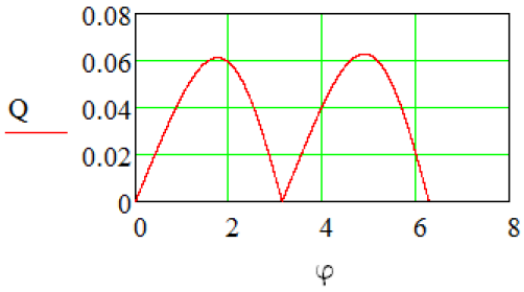
$$Q_{ср} := \frac{\Delta V_{ц}}{t_{ц}} \qquad Q_{ср} = 0.039$$

Розрахунки коефіцієнта нерівномірності і ступеня нерівномірності подачі

$$Q_{min} := \min(Q) = 4.196 \times 10^{-5} \qquad Q_{max} := \max(Q) = 0.063$$

$$Кн := \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{ср}} \qquad Сн := \frac{Q_{max}}{Q_{ср}}$$

$$Кн = 1.62 \qquad Сн = 1.622$$



У даній програмі використані деякі вбудовані функції: **if** (умова, варіант 1, варіант 2), **min**(...), **max**(..), які вибираються так: у меню вибрати підменю ***Вставка***, у списку, що з'явився, ***вибрати*** Функцію і далі у вікні, що з'явилося, за алфавітом вибрати відповідну функцію та кликнути ***кнопку*** *ОК*.

Функція умови застосована тут виходячи з тих міркувань, що об’єм порції, що виштовхується з порожнини за крок, дорівнює зміні об’єму камери, але тільки в тому випадку, якщо цей об’єм зменшується. А при збільшенні об’єму об’єм порції, що виштовхується, дорівнює нулю (камера при цьому заповнюється).

Слід зазначити, що мінімальна подача в розглянутого насоса повинна дорівнювати нулю. Тут ми маємо справу з обчислювальною похибкою, розмір якої зменшується при зменшенні кроку рахунку (кроку кута повороту).

2.4. Моделювання поршневого компресора

Для опису процесів, що відбуваються в робочій камері компресора, приймемо наступні допущення:

- робоча камера розглядається як об'єкт із зосередженими

параметрами, тобто в межах виділених контрольних об’ємів значення параметрів не залежать від координат;

- газ ідеальний;
- тиск газу в усмоктувальному та нагнітальному патрубку є постійним;
- витоки і перетікання газу відсутні;
- клапани відкриваються і закриваються миттєво і повністю;
- тиск газу в циліндрі при усмоктуванні і нагнітанні є постійним;
- усі стадії робочого процесу відбуваються без підведення і відведення теплоти (адіабатичні).

Схема поршневого компресора, індикаторна та температурна діаграми, що відповідають прийнятим допущеннями, представлено на рисунках 2.4. і 2.5. При заданих розмірах циліндра і кривошипно - шатунного механізму та параметрах клапанів, а також властивостей газу, поточний стан об'єкта моделювання визначається наступними параметрами: кутом повороту колінчатого валу, переміщенням поршня, об’ємом камери, тиском, температурою та масою газу.

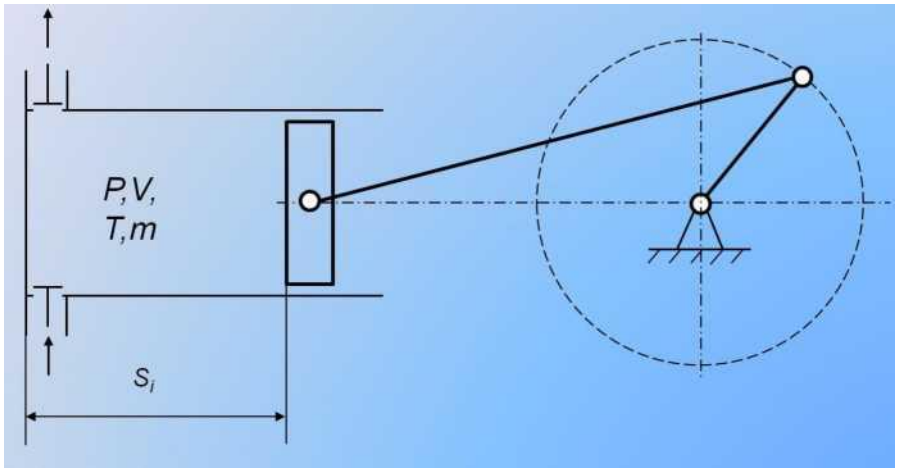


Рисунок 2.4. Схема щабля поршневого компресора

Робочий процес у робочій камері компресора, що відбувається за один оборот колінчатого валу, розбивається на 4 стадії: розширення, усмоктування, стискання та виштовхування газу.

Концептуальна модель такого робочого процесу може бути наступною.

У початковий момент часу кут повороту колінчатого валу дорівнює нулю, поршень перебуває у верхній мертвій точці. Об’єм робочої камери при цьому дорівнює об’єму мертвого простору, а тиск газу дорівнює тиску в нагнітальному трубопроводі плюс перепад тиску, необхідний для повного відкриття нагнітального клапана. Початкова температура газу порівняно висока, ухвалюється експертно в діапазоні від 350 до 450К. Початкова маса газу визначається рівнянням стану, виходячи з початкових значень об’єму, тиску та температури.

Стадія розширення починається при повороті колінчатого валу на деякий малий кут від ВМТ і триває до моменту відкриття всмоктувального клапана. У початковий момент часу об’єм робочої камери дорівнює об’єму мертвого простору, тиск газу дорівнює тиску в нагнітальному трубопроводі плюс перепад тиску, необхідний для повного відкриття нагнітального клапана. Початкова температура газу ухвалюється експертно в діапазоні від 350 до 450К. Початкова маса газу визначається рівнянням стану, виходячи з початкових значень об’єму, тиску та температури.

При русі поршня від ВМТ до НМТ геометричний об’єм робочої камери збільшується, тому тиск починає падати, а газ, розташований у мертвому просторі розширюватися. Зниження тиску та температури відбувається по рівнянню політропи (адіабати). Маса газу не змінюється. Стадія розширення закінчується, коли тиск знизиться до значення, яке буде нижче тиску в усмоктувальному трубопроводі на паспортну величину перепаду тиску, необхідного для повного відкриття всмоктувального клапана.

Стадія усмоктування починається в момент відкриття всмоктувального клапана та триває до моменту досягнення поршнем НМТ. Тиск і температура газу при цьому постійні. Маса газу росте, збільшуючись за кожний крок на величину, обумовлену паспортним перепадом тиску на клапані.

Стадія стиску починається з моменту проходження поршнем НМТ і триває до моменту відкриття нагнітального клапана, коли тиск у робочій камері перевищить тиск газу в нагнітальному трубопроводі на паспортну величину

перепаду тиску, необхідного для повного відкриття нагнітального клапана. У результаті зменшення займаного газом об'єму тиск і температура ростуть відповідно до рівняння адіабати. Маса газу не змінюється.

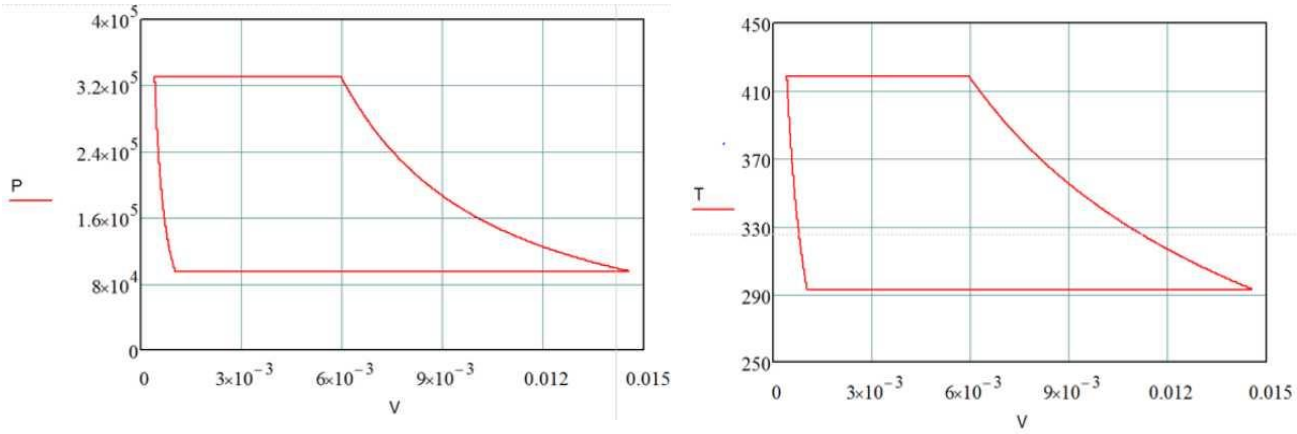


Рисунок 2.5. Індикаторна та температурна діаграми поршневого компресора

Стадія виштовхування газу починається в момент відкриття нагнітального клапана й закінчується в момент досягнення поршнем ВМТ. Протягом цієї стадії тиск дорівнює тиску в нагнітальному трубопроводі плюс перепад тиску, необхідний для повного відкриття всмоктувального клапана. Температура газу постійна й дорівнює максимальному значенню, досягнутому при стадії стиску. Маса газу зменшується з кожним кроком рахунку на величину, обумовлену паспортним перепадом тиску на клапані.

Після закінчення визначення параметрів стадії виштовхування необхідно зрівняти значення температури газу при досягненні поршнем ВМТ зі значенням, прийнятим експертно, і відкоригувати його, після чого перерахувати температуру для всіх кроків.

Математична модель поршневого компресора відповідно до описаної концептуальної моделі, містить наступні рівняння:

$$S = r \cdot \left(1 - \cos(\varphi) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(\varphi)^2\right) \qquad (2.6)$$

$$V = F_П \cdot S + V_M \qquad (2.7)$$

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \tag{2.8}$$

$$m = \rho \cdot V \tag{2.9}$$

при стисканні та розширенні

$$P_{i+1} = P_i \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^k \tag{2.10}$$

$$T_{i+1} = T_i \left(\frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{k-1} \tag{2.11}$$

при усмоктуванні:

$$P_{i+1} = P_{вс} - \Delta P_{вс} \tag{2.12}$$

$$T_{i+1} = T_{вс} \tag{2.13}$$

при виштовхуванні:

$$P_{i+1} = P_i \tag{2.14}$$

$$T_{i+1} = T_i \tag{2.15}$$

Алгоритм програми, що реалізує показану математичну модель, можна представити у вигляді, показаному на рис. 2.6.

Як випливає з рис. 2.6, даний алгоритм має розгалуження, тому в програмі необхідно використовувати оператори програмування.

Оскільки порядок обчислення переміщення поршня і об’єму робочої камери компресора збігаються з розрахунками аналогічних параметрів поршневого насоса, розглянутого раніше, то приведемо лише фрагменти програми в Mathcad, пов'язані з обчисленням тиску та температури.

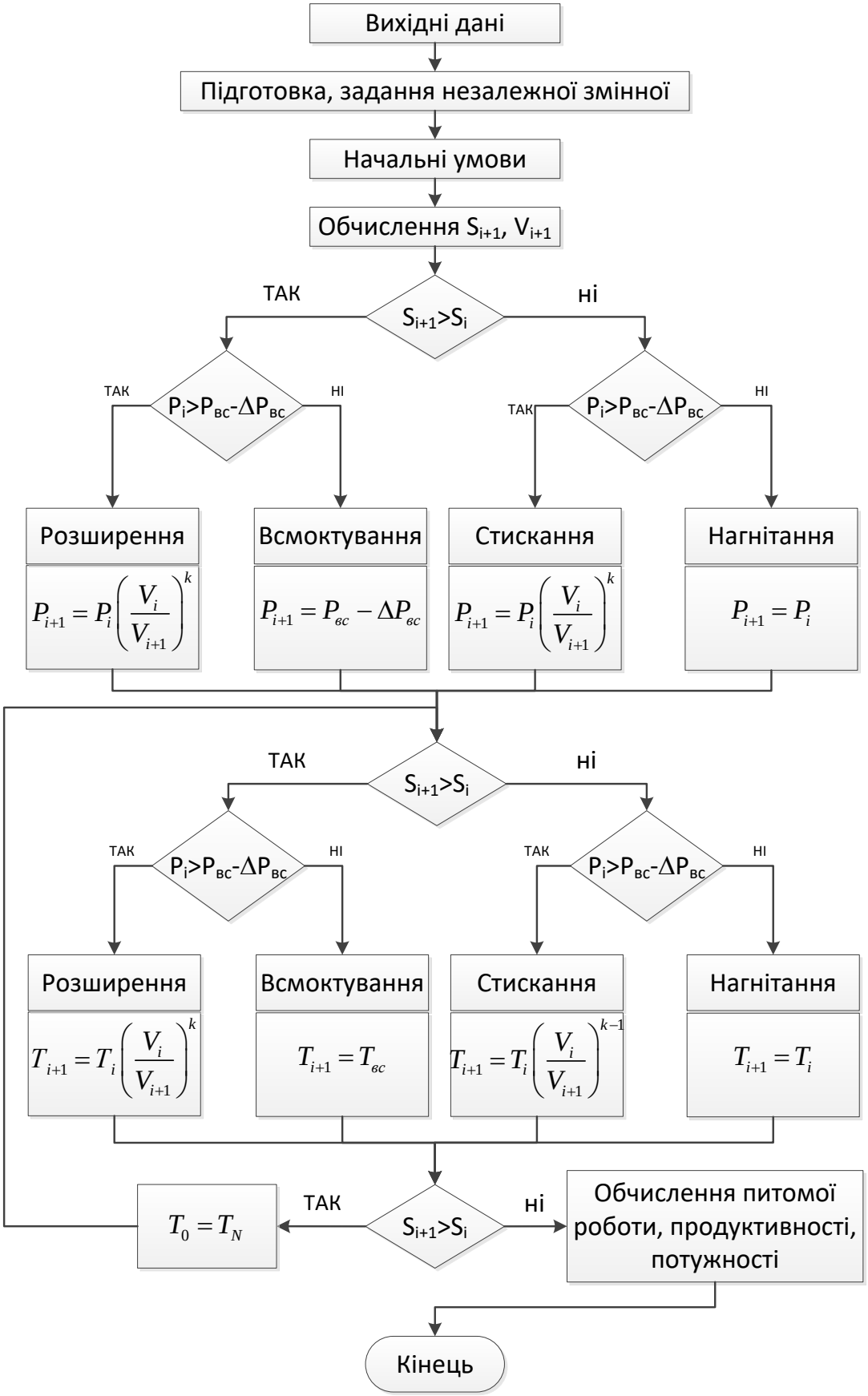


Рисунок 2.6. Алгоритм програми моделювання робочого процесу поршневого компресора

Шаблон програмного блоку для визначення тиску та температури однаковий і виглядає в такий спосіб:

$$
:= \left|
\begin{array}{l}
\text{if } S_{i+1} > S_i \\
\quad \left|
\begin{array}{l}
\blacksquare \ \text{if } P_i > P_B - \Delta P_B \\
\blacksquare \ \text{otherwise}
\end{array}
\right. \\
\text{otherwise} \\
\quad \left|
\begin{array}{l}
\blacksquare \ \text{if } P_i < P_H + \Delta P_H \\
\blacksquare \ \text{otherwise}
\end{array}
\right.
\end{array}
\right.
$$

Заповнені шаблони для розрахунків тиску та температури будуть виглядати так:

$$
P_{i+1} := \left|
\begin{array}{l}
\text{if } S_{i+1} > S_i \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
P_i \cdot \left(\dfrac{V_i}{V_{i+1}} \right)^k & \text{if } P_i > P_B - \Delta P_B \\
P_B - \Delta P_B & \text{otherwise}
\end{array}
\right. \\
\text{otherwise} \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
P_i \cdot \left(\dfrac{V_i}{V_{i+1}} \right)^k & \text{if } P_i < P_H + \Delta P_H \\
P_H + \Delta P_H & \text{otherwise}
\end{array}
\right.
\end{array}
\right.
$$

$$
T_{i+1} := \left|
\begin{array}{l}
\text{if } S_{i+1} > S_i \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
T_i \cdot \left(\dfrac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{k-1} & \text{if } P_i > P_B - \Delta P_B \\
T_B & \text{otherwise}
\end{array}
\right. \\
\text{otherwise} \\
\quad \left|
\begin{array}{ll}
T_i \cdot \left(\dfrac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{k-1} & \text{if } P_i < P_H + \Delta P_H \\
T_i & \text{otherwise}
\end{array}
\right.
\end{array}
\right.
$$

Як уже вказувалося раніше, після обчислення температури слід вивести її значення для моменту досягнення поршнем ВМТ:

$$T_N = 419.186$$

Після цього слід відкоригувати початкове значення температури

відповідно до отриманого результату та здійснити розрахунок заново. Результати розрахунків були представлені у вигляді графіків, показаних на рис. 2.5.

Подальші обчислення, необхідні для визначення продуктивності компресора:

$\rho := \frac{P}{R \cdot T}$ - щільність газу;

$m_{i+1} := \rho_{i+1} \cdot V_{i+1}$ - вага;

$\Delta m_i := m_{i+1} - m_i$ - зміна ваги;

$M_B := \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}} \Delta m_i$ - вага повітря що потрапило у циліндр;

$Q_{мас} := M_B \cdot n$ - масова продуктивність;

$\rho_B := \frac{P_B}{R \cdot T_B}$ - щільність при всмоктуванні;

$Q := Q_{мас} \cdot \rho_B$ - об'ємна продуктивність ($м^3/с$);

Звертаємо увагу, що щільність є індексованою змінною, але може бути записана у формі без індексів.

Для маси форма запису без індексів приводить до порушення коректності обчислень, тому що в правій частині добуток двох індексованих змінних.

Подальші обчислення, необхідні для визначення потужності, наведені нижче.

$\Delta V_i := V_{i+1} - V_i$

$L1 := \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \left| P_i \cdot \Delta V_i \right|$

$L2 := \sum_{i=\frac{N}{2}}^{N} \left| P_i \cdot \Delta V_i \right|$

$L_Ц := L2 - L1$

$N_{СТ} := L_{Ц} \cdot n$

$N_{СТ} = 2.623 \times 10^{4}$ Вт

При цьому індикаторна робота обчислюється як площа, обмежена індикаторною діаграмою в координатах P-V.

Таким чином, обчислені всі поточні значення параметрів, що характеризують роботу компресора, а також інтегральні характеристики.

2.5. Моделювання роботи гідростатичної трансмісії.

Гідрооб'ємні трансмісії, застосовувані в силових передачах у самохідних машин, можна класифікувати за наступними ознаками: за способом регулювання силового потоку, способом включення гідротрансформатора й розташуванню агрегатів гідротрансформатора. За способом регулювання силового потоку вони можуть бути гідравлічні й гідромеханічні. Перші мають один гідрооб'ємний трансформатор, другі - гідрооб'ємний і механічний (фрикційно - зубчастий) трансформатори (додаткову коробку передач). Регулювання відбувається за рахунок зміни продуктивності гідромашин і зміни передаточних чисел у зубатій коробці.

У гідрооб’ємній передачі регулювання силового потоку проводиться зміною робочого об’єму гідротрансформатора, у гідромеханічних - зміною робочого об’єму гідротрансформатора й передаточного числа зубчатого - фрикційно - зубчастого трансформатора.

У гідравлічних об’ємних передачах насос і двигун можуть бути виконані в одному агрегаті або роздільно. Насос (один або більше) установлюють безпосередньо за приводним двигуном, а гідравлічні двигуни можуть бути розташовані по бортах машини, а іноді навіть конструктивно розташовуються в маточинах коліс.

Основною перевагою передач із декількома насосами та двигунами є можливість використання агрегатів малої потужності. Застосовуючи такого роду передачі, можна уніфікувати гідравлічні об’ємні агрегати для різних по

типажу машин, що дає можливість робити гідравлічні об’ємні машини (насоси, гідравлічні двигуни) на спеціалізованих заводах і за рахунок цього зменшити вартість силових передач тракторів різних по типу й ваговим категоріям.

Насоси звичайно встановлюються в паралельному потоці. Послідовне включення насосів застосовується в тих випадках, коли для одержання високих напорів, у нагнітальній магістралі, використовуються низьконапірні насоси.

При послідовному з'єднанні насосів можна одержати східчасте регулювання напору, а, отже, і східчасте регулювання моменту на вихідному валу передачі при постійній швидкості руху трактора. При цьому двигун повинен мати достатній запас потужності.

При паралельному з'єднанні насосів шляхом їхнього відключення або включення можна забезпечити східчасте регулювання продуктивності, а, отже, і швидкості трактора. Найбільша швидкість буде спостерігатися, коли працюють усі насоси, і найменша - при роботі одного насоса. Схеми до комбінованих включенням гідравлічних двигунів доцільно застосовувати на багатовісних машинах або на автопоїздах з активними причепами.

2.5.1. Аналіз ефективності застосування гідравлічних об’ємних передач у трансмісіях тракторів

Порівняльний аналіз силових передач, наведений у попередньому розділі, застосовуваних у якості трансмісій транспортних машин, дозволив зробити висновок про те, що із усіх існуючих працездатних безступінчастих передач найбільше повно задовольняє вимогам, які пред'являються до трансмісій сучасних тракторів, саме гідравлічна об'ємна передача.

Раніше були зроблені спроби застосувати об'ємну гідропередачу як трансмісію при створенні перших колісних і гусеничних машин, але внаслідок недосконалості гідравлічних агрегатів вони успіху не мали. Знову до цієї ідеї конструкторська думка вернулася лише більш п'ятдесяти років тому, коли у нас у країні, так і за кордоном об'ємні гідравлічні передачі стали застосовуватися в

трансмісіях тепловозів, автомобілів, тракторів, сільськогосподарських і інших самохідних машинах.

Найбільше поширення одержала схема «регульований насос - регульований мотор» на більшості самохідних машин, що випускаються західноєвропейськими фірмами.

У цей час гідравлічні об’ємні трансмісії роздільно-агрегатного виконання широко застосовуються при створенні сучасних енергетично насичених машин. Це, насамперед комбайни різного призначення Єнісей-950, Єнісей-1200-Нм КСК-100, КСКУ-6, КС-6Б, РКС-6.

Успішно були завершені випробування промислових зразків трактора МТЗ-80Б с гідрооб'ємною передачею моноблочного типу.

Випробування, проведені Підмосковною НИИС НАТИ, виявили значні переваги самохідних машин з безступінчастими гідрооб'ємними трансмісіями, особливо при проведенні збиральних і транспортних робіт [22]. Результати порівняльних випробувань тракторів МТЗ-80 і МТЗ-80Б підтвердили ефективність використання гідравлічних об’ємних трансмісій: коефіцієнт використання потужності підвищився на 10-27%, продуктивність збільшилася на 7-11%.

Таким чином, з вищевикладеного випливає, що застосування гідравлічної об'ємної трансмісії на тракторах дозволяє одержати значний ефект на всіх видах основних робіт.

2.5.2. Розробка математичної моделі ГСТ-90

Розрахункову схеми гідростатичної трансмісії представлено на рис. 2.7.

Математична модель гідротрансмісії, як і будь-якої гідросистеми, складається з наступних рівнянь:

1. Рівняння нерозривності потоків.
2. Рівняння сил і моментів діючих на робочі органи виконавчих гідродвигунів.

3. Рівняння окремих елементів гідропривода.

Використовуючи принципову схему привода, що показана на рисунку 2.7, нами запропоновано таку математичну модель:

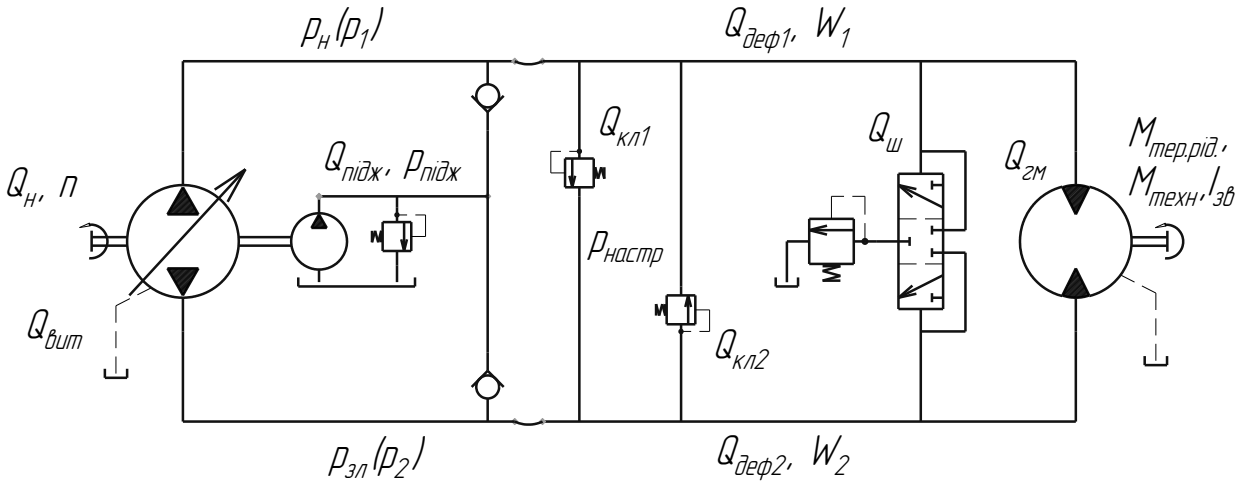


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема гідропривода

Рівняння нерозривності потоків робочої рідини для гідролінії високого тиску:

$$Q_н + Q_{підж} + Q_{кл2} = Q_{кл1} + Q_{гм} + Q_ш + Q_{вит1} + Q_{деф1} + Q_{перет}, \qquad (2.16)$$

де $Q_н, Q_{підж}, Q_{кл2}, Q_{кл1}, Q_{гм}, Q_ш, Q_{вит1}, Q_{деф1}, Q_{перет}$ - витрати, відповідно, насоса, підживлювального насоса, запобіжних клапанів 1 і 2, гідромотора, шунтуючого клапана, витоків, деформації порожнини, заповненої рідиною, перетоків;

для гідролінії низького тиску:

$$Q_{гм} + Q_{кл1} + Q_{підж} = Q_{вит2} + Q_ш + Q_{кл2} + Q_н + Q_{деф2} + Q_{перет} \qquad (2.17)$$

Рівняння моментів, які діють на вал гідромотора

$$M_{гм} = M_{ін} + M_{тер} + M_{техн}, \qquad (2.18)$$

де - $M_{гм}$ - момент, що створюється гідромотором,

$M_{ін}$ - момент інерції рухомих частин, приведених до вале гідромотора,

$M_{тер}$ - момент тертя,

$M_{техн}$ – момент від сил опору руху сільгоспмашини.

Рівняння, які характеризують роботу окремих елементів гідропривода.

Об'ємна подача насоса

$$\mathrm{Q_н} = q_н \cdot \omega_н , \tag{2.19}$$

де $q_н$ – характерний об'єм насоса,

ω – кутова швидкість.

Об'ємна подача насоса підживлення

$$Q_{підж} = \left| \begin{array}{c} 0 \to p_н > \mathrm{p}_{підж} \\ \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_{підж} - p_{зл}} \end{array} \right. , \tag{2.20}$$

де μ - коефіцієнт витрати,

f_n – площа вікна запобіжного клапана,

ρ – густина робочої рідини,

$p_н(p_1)$ – тиск у лінії нагнітання,

$p_{зл}(p_2)$ - тиск у лінії зливання,

$p_{підж}$ - тиск, що створюється насосом підживлення.

Витрата рідини через запобіжні клапани

$$Q_{кл2} = \left| \begin{array}{c} 0 \to p_2 < \mathrm{p}_{настройки} \\ \mu_к f_{кл2} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_2 - p_1} \to p_2 > \mathrm{p}_{настройки} \end{array} \right. , \tag{2.21}$$

$$Q_{кл1} = \left| \begin{array}{c} 0 \to p_1 < \mathrm{p}_{настройки} \\ \mu_к f_{кл1} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - p2} \to p_1 > \mathrm{p}_{настройки} \end{array} \right. , \tag{2.22}$$

де $\mathrm{p}_{настройки}$ - тиск, на який налаштований запобіжний клапан.

Витрата рідини через шунтуючий клапан

$$Q_ш = \left| \begin{array}{c} 0 \to p_1 > \mathrm{p}_2 \\ \mu_ш f_ш \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - 0} \to p_1 < \mathrm{p}_2 \end{array} \right. . \tag{2.23}$$

Витрата рідини, яка споживається гідромотором

$$\mathrm{Q_{гм}} = q_{гм} \cdot \omega_{гм} , \tag{2.24}$$

де $q_{гм}$ – характерний об'єм гідромотора,

$\omega_{гм}$ – кутова швидкість гідромотора.

Витрата витоків рідини в гідролініях гідротрансмісії

$$\mathrm{Q}_{\text{вит1}} = \sigma_1 \cdot p_1, \tag{2.25}$$

$$\mathrm{Q}_{\text{вит2}} = \sigma_2 \cdot p_2, \tag{2.26}$$

де $\sigma_1 \sigma_2$ - коефіцієнти витоків.

Витрати перетоків рідини між порожнинами високого та низького тиску

$$\mathrm{Q}_{\text{перет1,2}} = \sigma_{1,2}\left(p_1 - p_2\right), \tag{2.27}$$

$$\mathrm{Q}_{\text{перет2,1}} = \sigma_{2,1}\left(p_2 - p_1\right). \tag{2.28}$$

де $\sigma_{1,2}, \sigma_{2,1}$ - коефіцієнти перетоків.

Витрати рідини, пов'язані з деформацією порожнин гідросистеми

$$Q_{деф1} = KW_1 \cdot \frac{dp_1}{dt}, \tag{2.29}$$

$$Q_{деф2} = KW_2 \cdot \frac{dp_2}{dt}, \tag{2.30}$$

де K – коефіцієнт податливості порожнин гідросистеми,

W_i – об'єм порожнин.

Момент, який розвиває гідромотор;

$$\mathrm{M}_{\text{гм}} = q_{гм}\left(p_1 - p_2\right). \tag{2.31}$$

Момент інерції на валу гідромотора

$$M_{ін} = I_i \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \tag{2.32}$$

де φ – кут повороту.

Момент від сил в'язкого тертя:

$$M_{тер} = \beta \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \tag{2.33}$$

де β – коефіцієнт в'язкого тертя.

Перед тим, як розпочати моделювання в MathCad, потрібно рівняння нашої моделі перевести у форму Коші.

Підставимо рівняння (2.19 - 2.33) у рівняння (2.16 - 2.18):

$$w \cdot V_0(x) + Q_{підж} + Q_{кл2} = Q_{кл1} + q_{gm} \cdot w_{gm} + Q_ш + \sigma_1 \cdot p_1 + KW_1 \frac{dp_1}{dt} + \sigma_{1.2} \cdot (p_1 - p_2);$$

Перетворимо рівняння у форму Коші:

$$KW_1 \frac{dp_1}{dt} = w \cdot V_0(x) + Q_{підж} + Q_{кл2} - Q_{кл1} - q_{gm} \cdot w_{gm} - Q_ш - \sigma_1 \cdot p_1 - \sigma_{1.2} \cdot (p_1 - p_2);$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{KW_1} \cdot (w \cdot V_0(x) + Q_{підж} + Q_{кл2} - Q_{кл1} - q_{gm} \cdot w_{gm} - \\ -Q_ш - \sigma_1 \cdot p_1 - \sigma_{1.2} \cdot (p_1 - p_2)); \quad (2.19)$$

Аналогічно перетворимо рівняння (2.2) і (2.3).

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{KW_2} \cdot (q_{gm} \cdot w_{gm} + Q_{кл1} + Q_{підж} - \sigma_2 \cdot p_2 - \\ -Q_ш - Q_{кл2} - w \cdot V_0(x) - \sigma_{2.1} \cdot (p_2 - p_1)); \quad (2.20)$$

$$\frac{dw_{gm}}{dt} = \frac{1}{I_M} \cdot (q_{gm} \cdot (p_1 - p_2) - \beta \cdot \omega - M_{тех}); \quad (2.21)$$

Рівняння (2.19, 2.20, 2.21) використаємо при побудові математичної моделі в Mathcad.

Технологічне навантаження залежить від багатьох факторів, але в першому наближенні приймемо $M_{техн} = const.$.

Запишем параметри системи, які будемо використовувати при моделюванні [6,7,8].

Частота обертів двигуна комбайна - $n = 2000$ об/хв.;

Кутова швидкість вала гідронасоса –

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

$$\omega = \frac{3.14 \cdot 2000}{30} = 209.34 рад/с.;$$

Робочий об'єм насоса - $V_0 = 90 см^3/об$;

Робочий об'єм гідромотора - $q_{гм} = 90 см^3/об$;

Тиск в лінії підживлення - $p_{підж} = 1{,}4 МПа$;

Мінімальний тиск в лінії нагнітання - $p_{1мін} = 1{,}3 МПа$;

Мінімальний тиск в лінії зливу - $p_{2мін} = 1{,}3 МПа$;

Тиск настроювання перепускних клапанів - $p_{настр} = 34.3 МПа$;

Номінальний тиск в гідросистемі - $p_{ном} = 22{,}1 МПа$;

Коефіцієнт витрат - $\mu = 0.7$;

Густина робочої рідини - $\rho = 850 кг/м^3$;

Коефіцієнти витоків - $\sigma_{1.2} = 4.54 \frac{см^3}{с \cdot МПа}$;

Витрати рідини через витоки - $Q_{вит} = 6 л/хв$;

Об'єм порожнин гідросистеми – W_1, W_2=1000 см^3

Коефіцієнт податливості порожнин гідросистеми –

$$K = \frac{1}{E}; \qquad (2.22)$$

де – Е-модуль пружності рідини, Е=2000 МПа.

Тоді $K = \frac{1}{2000} = 0.5 \cdot 10^{-3} \frac{м^2}{Н}$;

Момент тертя рідини - $M_{тер.рвд.} = 22 Н \cdot м$;

$\beta = 0.14 \frac{Н \cdot м \cdot с}{рад}$

Площу отвору клапана підживлення розраховуємо з формули (2.16) за допомогою програмного пакета MathCad.

Приймемо, що $Q_{підж} = \mu f_n \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_{підж} - p_{зл}}$, тоді $f_n = \frac{Q_{підж}}{\mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_{підж} - p_{зл}}}$;

Підставивши значення параметрів отримаємо:

$$f_n = \frac{5 л/хв}{0.7 \sqrt{\frac{2}{850 кг/м^3}} \sqrt{1{,}4 МПа - 1{,}3 МПа}};$$

Розрахунок в MathCad:

$Qpid := 5\frac{l}{min}$ $ppid := 1.4MPa$ $pmin := 1.3MPa$ $\rho := 850\frac{kg}{m^3}$ $\mu := 0.7$

$$fp := \frac{Qpid}{\mu \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{ppid - pmin}}$$

$fp = 7.761 \times 10^{-6} m^2$ $fp = 0.078 \cdot cm^2$ $fp = 7.761 \cdot mm^2$

Розраховуємо діаметр отвору клапана підживлення

$$Dp := \sqrt{\frac{4 \cdot fp}{\pi}}$$

$Dp = 3.143 \cdot mm$

Приймаємо діаметр клапана підживлення Dp =4 мм.

Тоді площа клапана підживлення буде

$D := 4mm$

$$fpid := \frac{\pi \, D^2}{4}$$

$fpid = 12.566 \cdot mm^2$

Аналогічно розраховуємо площі отворів запобіжних клапанів і шунтуючого розподільника.

Площу отворів запобіжних клапанів розраховуємо з формул (2.21), (2.22).

Приймемо, що $Q_{кл1} = \mu_к f_{кл1} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - p2}$, тоді $f_{кл1} = \frac{Q_{кл1}}{\mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\sqrt{p_1 - p2}}}$;

Розрахунок в MathCad

$Qkl1 := 120\frac{l}{min}$ $pkl12 := 1.3MPa$ $pkl11 := 40MPa$

$$fkl1 := \frac{Qkl1}{\mu \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{pkl11 - pkl12}}$$

$fkl1 = 9.468 \times 10^{-6}\,m^2$

$fkl1 = 9.468 \cdot mm^2$

$fkl1 = 0.095 \cdot cm^2$

Розраховуємо діаметр отвору клапанів:

$$Dkl1 := \sqrt{\frac{4 \cdot fkl1}{\pi}}$$

$Dkl1 = 3.472 \cdot mm$

Приймаємо діаметр клапанів підживлення Dkl1 =Dkl2=4 мм.

Тоді площі клапанів будуть:

$Dkl1 := 4mm$

$$fkl12 := \frac{\pi \, Dkl1^2}{4}$$

$fkl12 = 12.566 \cdot mm^2$

fkl1=fkl2=4мм^2.

Площу отвору шунтуючого розподільника розраховуємо з формули (2.8).

Приймемо, що $Q_ш = \mu_ш f_ш \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - 0}$, тоді $f_ш = \frac{Q_ш}{\mu \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\sqrt{p_1 - p0}}}$;

Розрахунок в MathCad:

$$Qh := 5 \frac{l}{min}$$

$p1 := 1.3MPa$

$$fh := \frac{Qh}{\mu \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p1 - 0}}$$

$fh = 2.153 \cdot mm^2$

$fh = 0.022 \cdot cm^2$

$fh = 2.153 \times 10^{-6} m^2$

Розраховуємо діаметр отвору розподільника:

$$Dh := \sqrt{\frac{4 \cdot fh}{\pi}}$$

$Dh = 1.655 \cdot mm$

Приймаємо діаметр отвору розподільника Dh=2мм.

Тоді площа отвору шунтуючого розподільника буде

$Dh := 2mm$

$$fh := \frac{\pi \, Dh^2}{4}$$

$fh = 3.142 \cdot mm^2$

Технологічне навантаження залежить від багатьох факторів, для дослідження приймемо $M_{тех} = 100 Н \cdot м$;

Зведений момент інерції до колеса комбайна розраховуємо за формулою [10]

$$T_{зв} = \sum_{i=1}^{n} T_i$$

де $T_{зв}$ - зведена кінетична енергія, T_i - кінетична енергія i – ланки.

Розпишемо кінетичні енергії

$$T_{зв} = \frac{J_{зв} \cdot \omega_i^2}{2},$$

$$T_i = \frac{m_i \cdot v_{Si}^2}{2} + \frac{J_{Si} \cdot \omega_i^2}{2},$$

де $J_{зв}$ - зведений до валу момент інерції; m_i, ω_i - маса та кутова швидкість i – тої ланки, тобто комбайна і колеса; v_{Si} - швидкість центра мас i – тої ланки; J_{Si} - момент інерції i – тої ланки відносно її центра мас.

Прирівняємо праві частини формул (2.25) і (2.26), отримаємо

$$\frac{J_{зв} \cdot \omega_i^2}{2} = \frac{m_i \cdot v_{Si}^2}{2} + \frac{J_{Si} \cdot \omega_i^2}{2}.$$

Величина $\frac{J_{Si} \cdot \omega_i^2}{2}$ представляє обертальну частину, тобто колесо. Враховуючи геометричні розміри і масу, вони набагато менші за розміри і масу самого комбайна, тому цією величиною можна знехтувати. Тоді рівняння (2.27) матиме вигляд

$$\frac{J_{зв} \cdot \omega_i^2}{2} = \frac{m_i \cdot v_{Si}^2}{2}$$

Приймемо швидкість руху комбайна 20 км/год=5,6 м/с, маса комбайна 13440 кг, діаметр приводного колеса 1,87 м.[6,7] .

Частота обертання колеса:

$$n = \frac{S}{\pi \cdot D},$$

де S – пройдений шлях, D – діаметр колеса.

$$n = \frac{5.6}{3.14 \cdot 1.87} = 0.954\, об/с,$$

Кутова швидкість колеса дорівнює:

$$\omega_{кол} = 2 \cdot \pi \cdot n,$$

$$\omega_{кол} = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.954 = 5.99 \frac{1}{c}.$$

З формули (2.25), визначаємо $J_{зв}$,

$$J_{зв.кол} = \frac{m \cdot v^2}{\omega_{кол}^{\ 2}},$$

$$J_{зв.кол} = \frac{13440 \cdot 5.6^2}{5.99^2} = 11746.9\, кг \cdot м^2.$$

Розраховуємо зведений момент інерції до валу гідромотора:

$$\frac{J_{зв.кол} \cdot \omega_{кол}^2}{2} = \frac{J_{зв.гм} \cdot \omega_{гм}^2}{2},$$

де $J_{зв.гм}$ - зведений момент інерції до валу гідромотора; $\omega_{гм}$ - кутова швидкість валу гідромотора.

Частота обертання валу гідромотора n=2000 об/хв., тоді кутова швидкість валу гідромотора:

$$\omega_{гм} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60},$$

$$\omega_{гм} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 2000}{60} = 209.34 \ рад/с.$$

З формули (2.29) знаходимо $J_{зв.гм}$

$$J_{зв.гм} = \frac{J_{зв.кол} \cdot \omega_{кол}^2}{\omega_{гм}^2},$$

$$J_{зв.гм} = \frac{11746.9 \cdot 5.99^2}{209.34^2} = 9.65 кг \cdot м^2.$$

Побудуємо математичну модель в MathCad:

ppid := 0.014 pnastr := 0.34 σ1 := 0.454

n := 0.209 dkl1 := 0.4 σ2 := 0.454

$V0 := \frac{90}{2 \cdot \pi}$ dkl2 := 0.4 σ12 := 0.454

dpid := 0.4 $fkl1 := \pi \cdot \frac{dkl1^2}{4}$ Qvit := 0.1

pnom := 0.221 dh := 0.2 fh = 0.031

μ := 0.7 p1min := 0.013 fkl2 = 0.126

$fkl2 := \pi \cdot \frac{dkl2^2}{4}$ $fp := \pi \cdot \frac{dpid^2}{4}$ $qgm := \frac{90}{2 \cdot \pi}$

p2min := 0.013 fp = 0.126 fkl1 = 0.126

K := 0.05 W1 := 1000 $\rho := 8.5 \times 10^{-4}$

W2 := 1000 Mterrid := 0.22 $fh := \pi \cdot \frac{dh^2}{4}$

$$Mteh(t) := \begin{cases} \frac{t}{1000} & \text{if } t < 1000 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad \beta := 1.4$$

$$Qpid1(p1) := \begin{cases} 0 & \text{if } p1 > ppid \\ \left(\mu \cdot fp \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{ppid - p1}\right) & \text{if } p1 < ppid \end{cases}$$

$$Qpid2(p2) := \begin{cases} 0 & \text{if } p2 > ppid \\ \left(\mu \cdot fp \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{ppid - p2}\right) & \text{if } p2 < ppid \end{cases}$$

$$Qh(p1,p2) := \begin{cases} \left(\mu \cdot fh \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{|p2 - 0|}\right) & \text{if } p1 > p2 \\ \left(\mu \cdot fh \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{|p1 - 0|}\right) & \text{if } p1 < p2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Qkl1(p1,p2) := \begin{cases} 0 & \text{if } p1 < pnastr \\ \left(\mu \cdot fkl1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{|p1 - p2|} \cdot sign(p1 - p2)\right) & \text{if } p1 > pnastr \end{cases}$$

$$Qkl2(p1,p2) := \begin{cases} 0 & \text{if } p2 < pnastr \\ \left(\mu \cdot fkl2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p2 - p1}\right) & \text{if } p2 > pnastr \end{cases}$$

$$x := 1 \qquad y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F(t,y) := \begin{bmatrix} \dfrac{n \cdot V0 \cdot x + Qpid1(y_0) - qgm \cdot y_2 - \sigma 1 \cdot y_0 - \sigma 12 \cdot (y_0 - y_1) - Qkl1(y_0, y_1) + Qkl2(y_0, y_1) - Qh(y_0, y_1)}{K \cdot W1} \\ \dfrac{qgm \cdot y_2 + Qpid2(y_1) - n \cdot V0 \cdot x - \sigma 2 \cdot y_1 + \sigma 12 \cdot (y_0 - y_1) + Qkl1(y_0, y_1) - Qkl2(y_0, y_1) - Qh(y_0, y_1)}{K \cdot W2} \\ \dfrac{1}{Izv} \cdot \left[qgm \cdot (y_0 - y_1) - \beta \cdot y_2 - Mteh(t)\right] \end{bmatrix}$$

$$S := Rkadapt(y, 0, 15000, 15000, F)$$

$$t := 0 .. 15000$$

$$p1_t := S_{t,1} \quad p2_t := S_{t,2} \quad w1_t := S_{t,3}$$

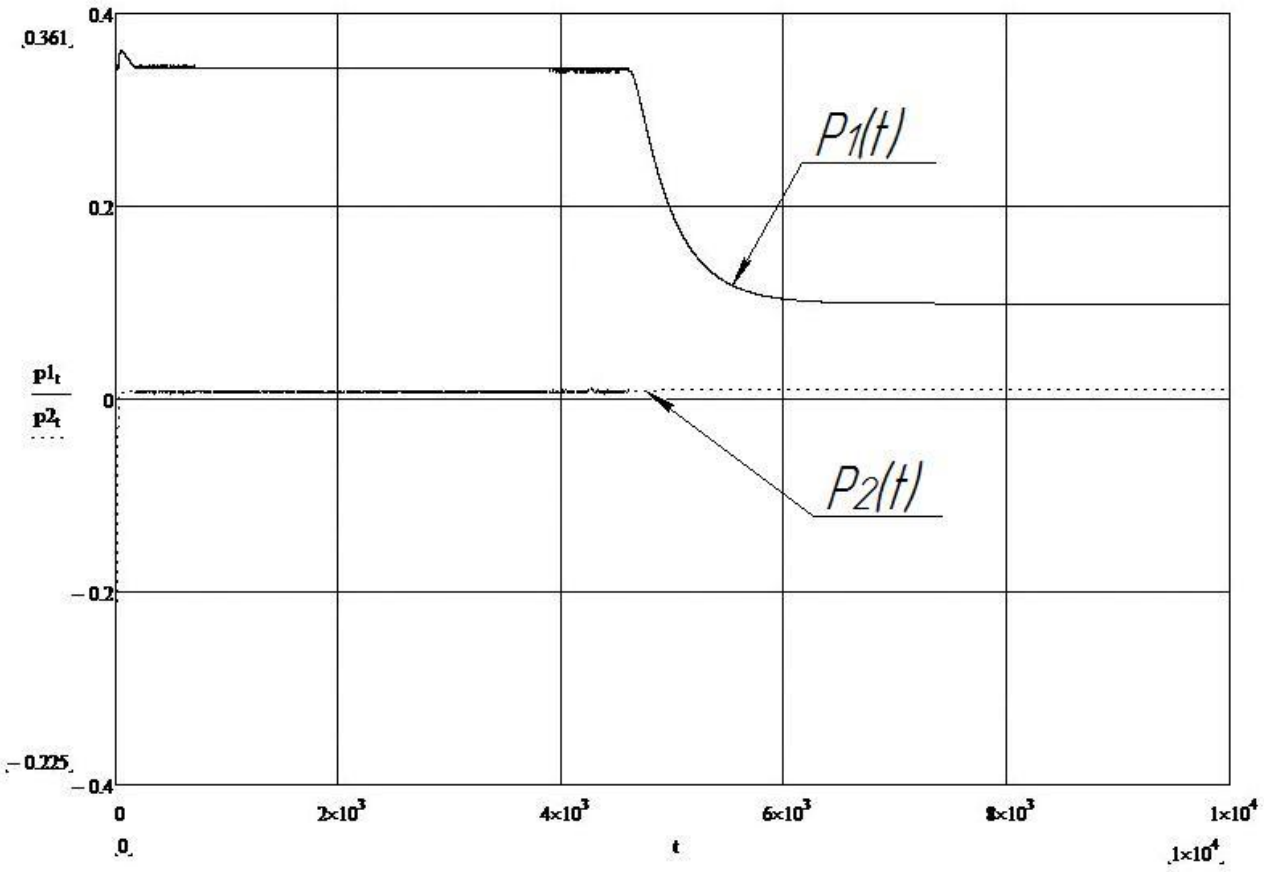


Рисунок 2.8 – Тиски в лінії нагнітання (p1) і лінії зливання (p2)

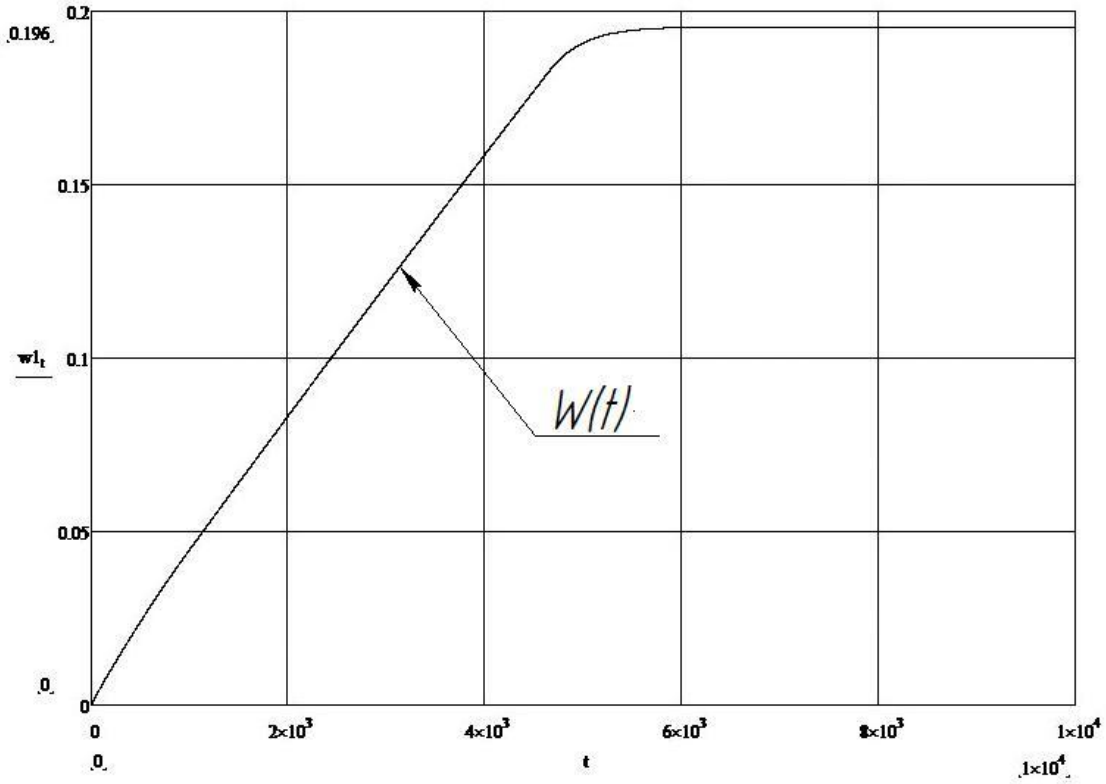


Рисунок 2.9 – Кутова швидкість *w* валу гідромотора

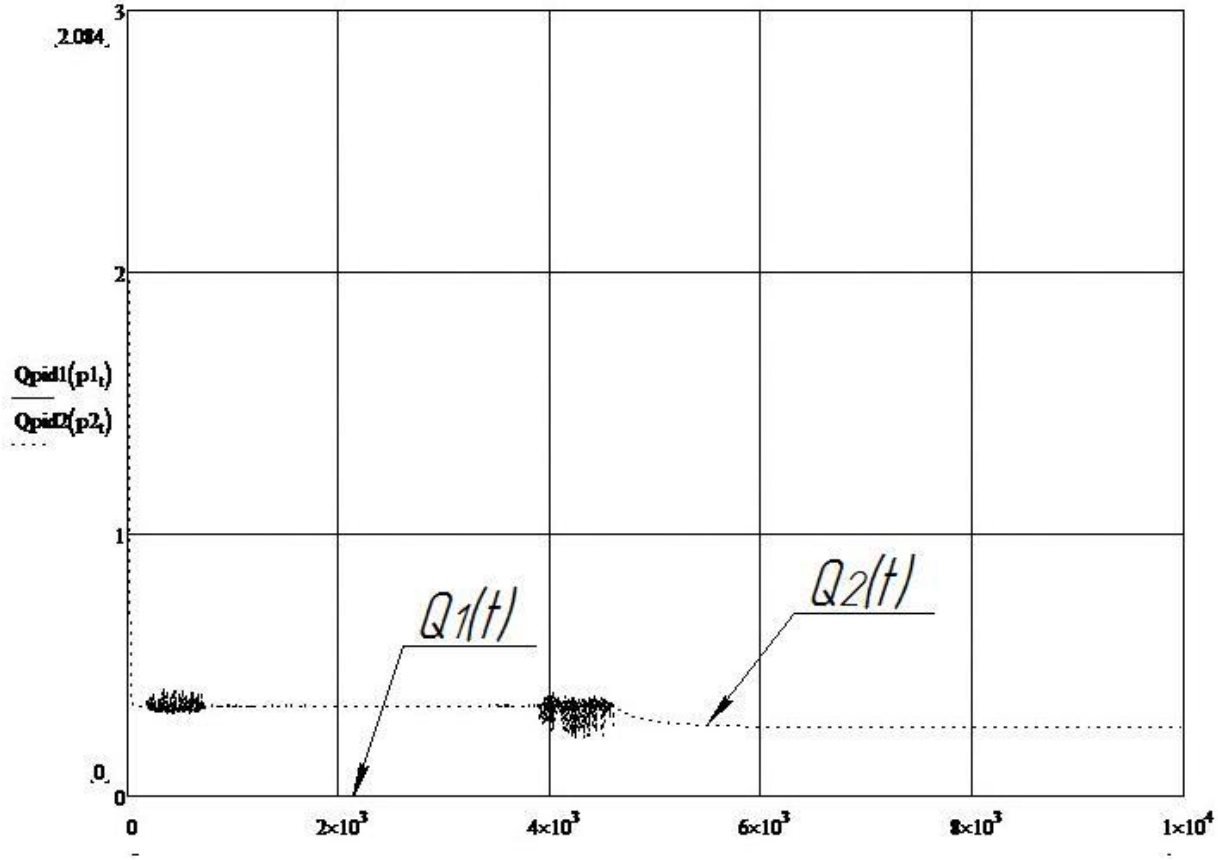


Рисунок 2.10 – Витрата через клапани підживлення

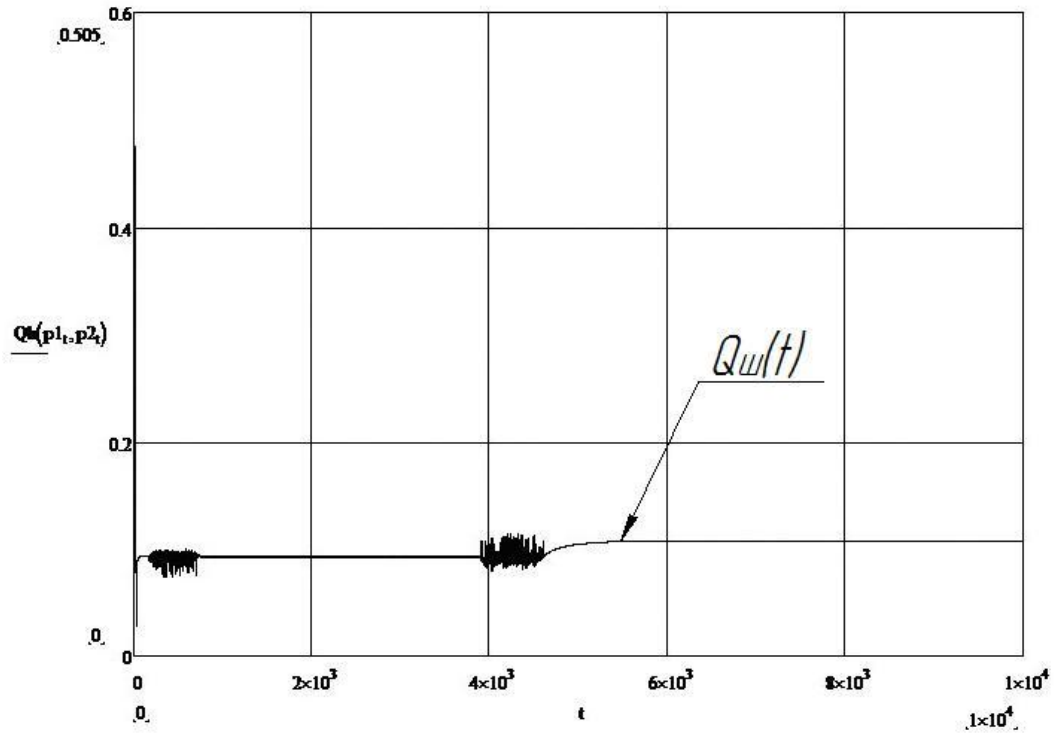


Рисунок 2.11 – Витрата через шунтуючий розподільник

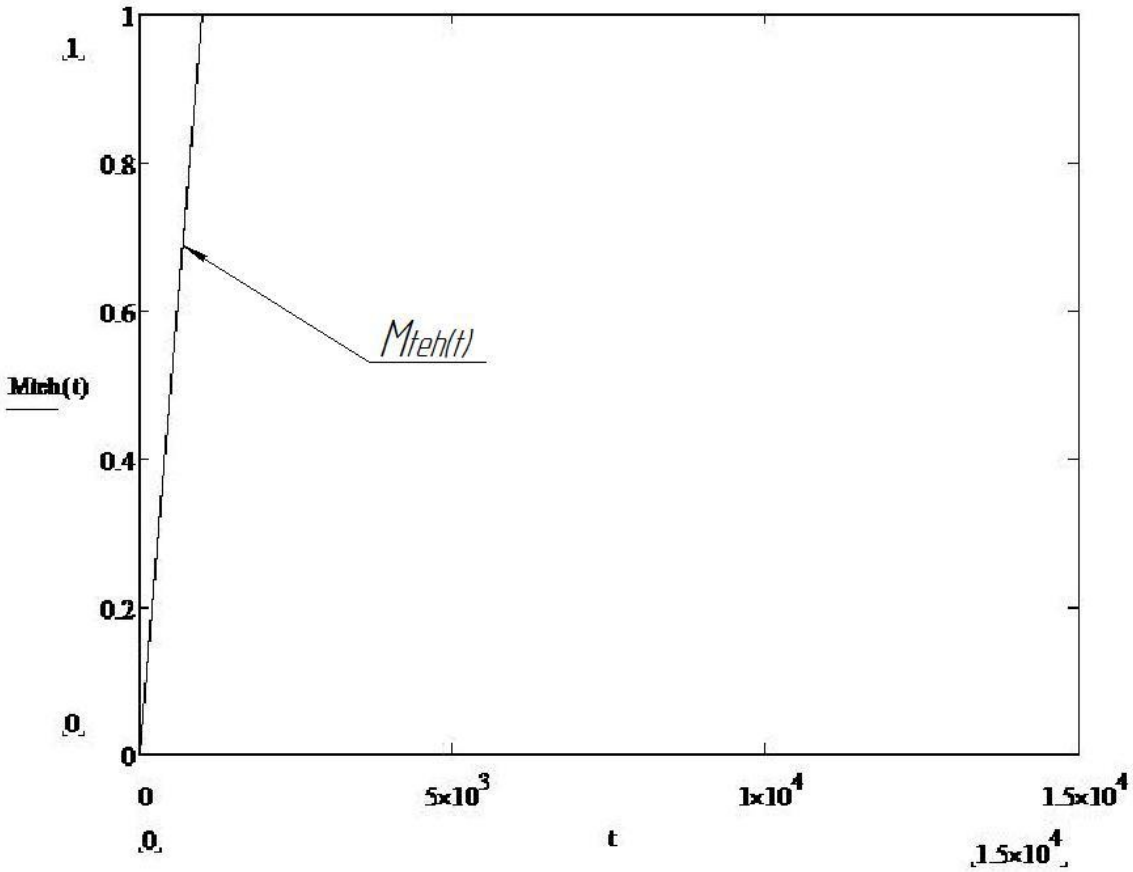


Рисунок 2.12 – Технологічне навантаження

На рисунках 2.8-2.12 показано результати розрахунку залежностей зміни параметрів гідротрансмісії. Значення параметрів при яких проведено розрахунки, зазначено вище.

З графіків видно, що система працює добре, виходить на усталений режим роботи протягом близько 6 секунд, кутова швидкість валу гідромотора є меншою, це пов’язано з витоками, перетоками, тощо. При запуску бачимо що тиск в лінії нагнітання змінюється стрибком, потім відкривається запобіжний клапан нагнітальної лінії і зливає рідину в лінію зливання. Витрата через клапани підживлення йде в лінію низького тиску. Також видно, що частина рідини зливається через шунтуючий розподільник.

Слідуючим кроком проводимо дослідження впливу параметрів гідропривода та сільськогосподарської машини на характеристики роботи системи.

2.5.3. Дослідження впливу параметрів гідропривода та сільськогосподарської машини на характеристики роботи системи

Проводимо дослідження впливу параметрів гідроприводу – діаметрів клапанів ($d_{підж}$, $d_{кл1}$, $d_{кл2}$, $d_{шунт}$), об'єму порожнин (W_1,W_2), та с/г машини ($I_{зв}$, $M_{тех}$). Вимірюємо на графіках величини часу регулювання та пере регулювання, і будуємо графіки залежностей цих величин від параметрів системи.

Час регулювання – час який проходить від запуску системи, до її виходу на усталений режим роботи.

Перерегулювання – максимальна стрибкоподібна зміна тиску при запуску системи.

Приклад розрахунку:

Подача насоса повна, тобто сигнал керування x=1.

Вибираємо параметр – $d_{підж}$. Значення, які будемо використовувати – 0,3см, 0,4см, 0,6см, 0,8см, 1см.

Робимо вимірювання, дані заносимо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення вимірюваних величин при зміні $d_{підж}$

Величина	$d_{підж}$, см				
	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$t_{рег}$, с	5,18	6,35	6,25	6,10	5,98
$y_{усталене}$	0,095225	0,09908	0,10187	0,10248	0,10266
$Y_{максимальне}$	0,343	0,36213	0,36274	0,36374	0,36375

$y_{усталене}$ – усталене значення тиску, на яке система виходить після запуску;

$Y_{максимальне}$ – максимальне значення тиску при запуску системи.

Розраховуємо відносне пере регулювання $\Delta Y = Y_{максимальне} - y_{усталене}$

$\Delta Y_1 = Y_{максимальне1} - y_{усталене1} = 0,343 - 0,095225 = 0,24775$;

$\Delta Y_2 = Y_{максимальне2} - y_{усталене2} = 0,36213 - 0,09908 = 0,26305$;

$\Delta Y_3 = Y_{максимальне3} - y_{усталене3} = 0,36274 - 0,10187 = 0,26087$;

$\Delta Y_4 = Y_{максимальне4} - y_{усталене4} = 0,36374 - 0,10248 = 0,26126$;

$\Delta Y_5 = Y_{максимальне5} - y_{усталене1} = 0,36375 - 0,10266 = 0,26109$.

Розраховуємо абсолютне перерегулювання ε:

$\varepsilon_1 = \Delta Y_1 / y_{усталене1} \times 100\% = 0{,}24775/0{,}095225 = 260\%$;

$\varepsilon_2 = \Delta Y_2 / y_{усталене2} \times 100\% = 0{,}26305/0{,}09908 = 265\%$;

$\varepsilon_3 = \Delta Y_3 / y_{усталене3} \times 100\% = 0{,}26087/0{,}10187 = 256\%$;

$\varepsilon_4 = \Delta Y_4 / y_{усталене4} \times 100\% = 0{,}26126/0{,}10248 = 255\%$;

$\varepsilon_5 = \Delta Y_5 / y_{усталене6} \times 100\% = 0{,}26109/0{,}10266 = 254\%$.

Будуємо графіки залежностей $t_{рег}$ і ε від $d_{підж}$. (рис. 2.13).

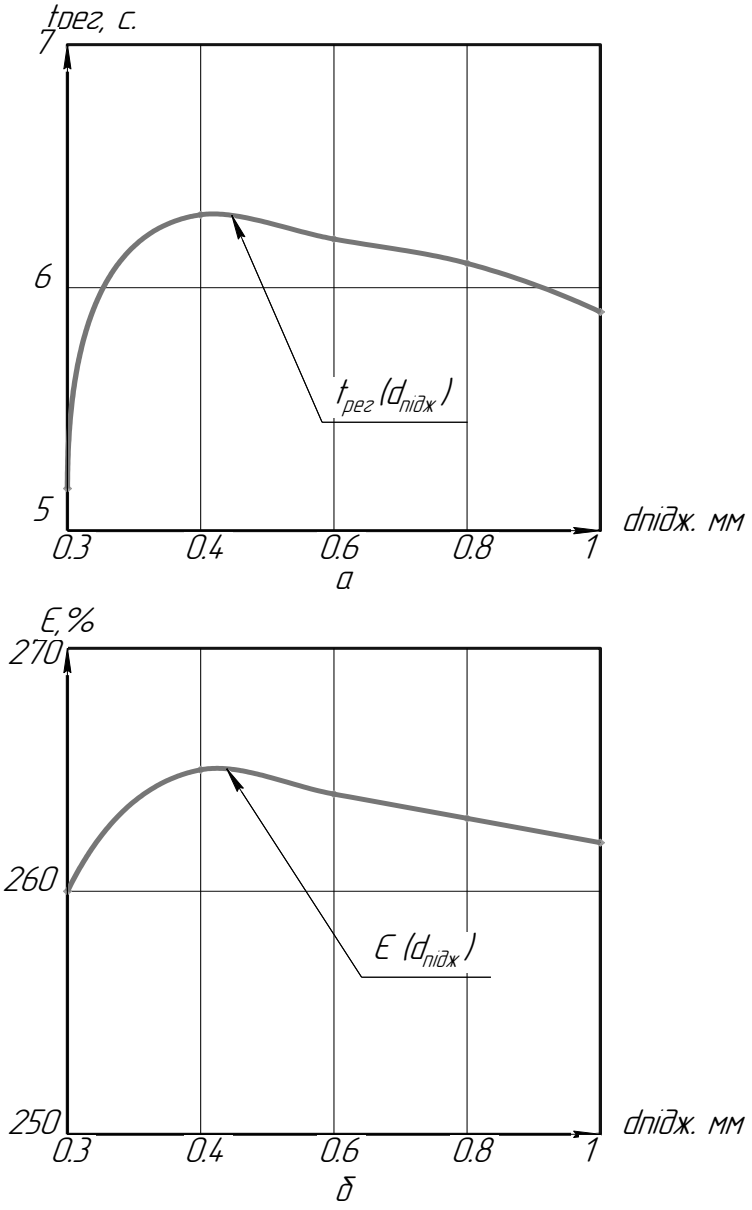


Рисунок 2.13 – Зміна $t_{рег}$ (а) і ε (б) при зміні $d_{підж}$

Аналогічно розраховуємо залежність $t_{рег}$ і ε від інших параметрів. Результати відображаємо на графіках.

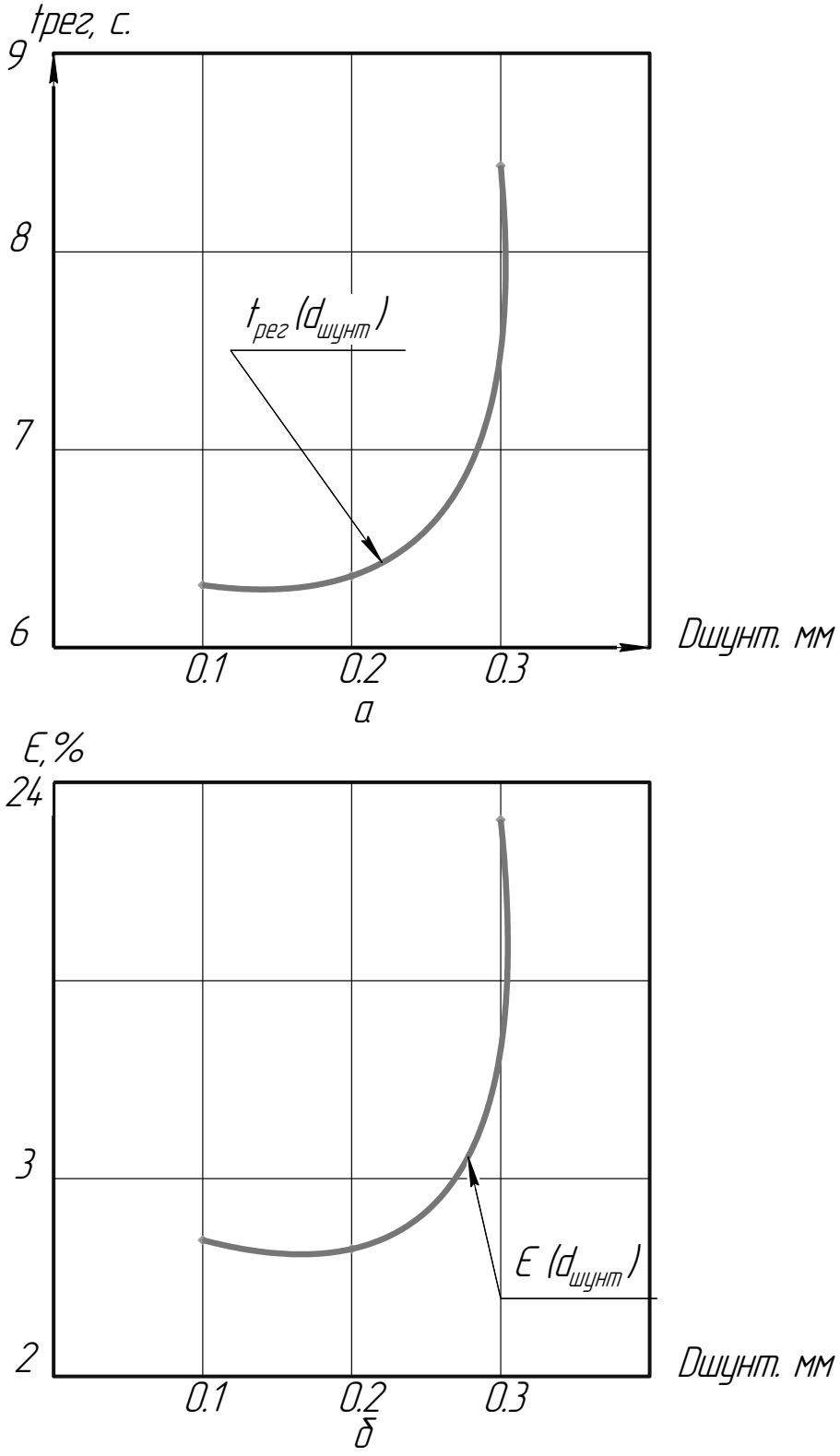


Рисунок 2.14 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $d_{шунт}$

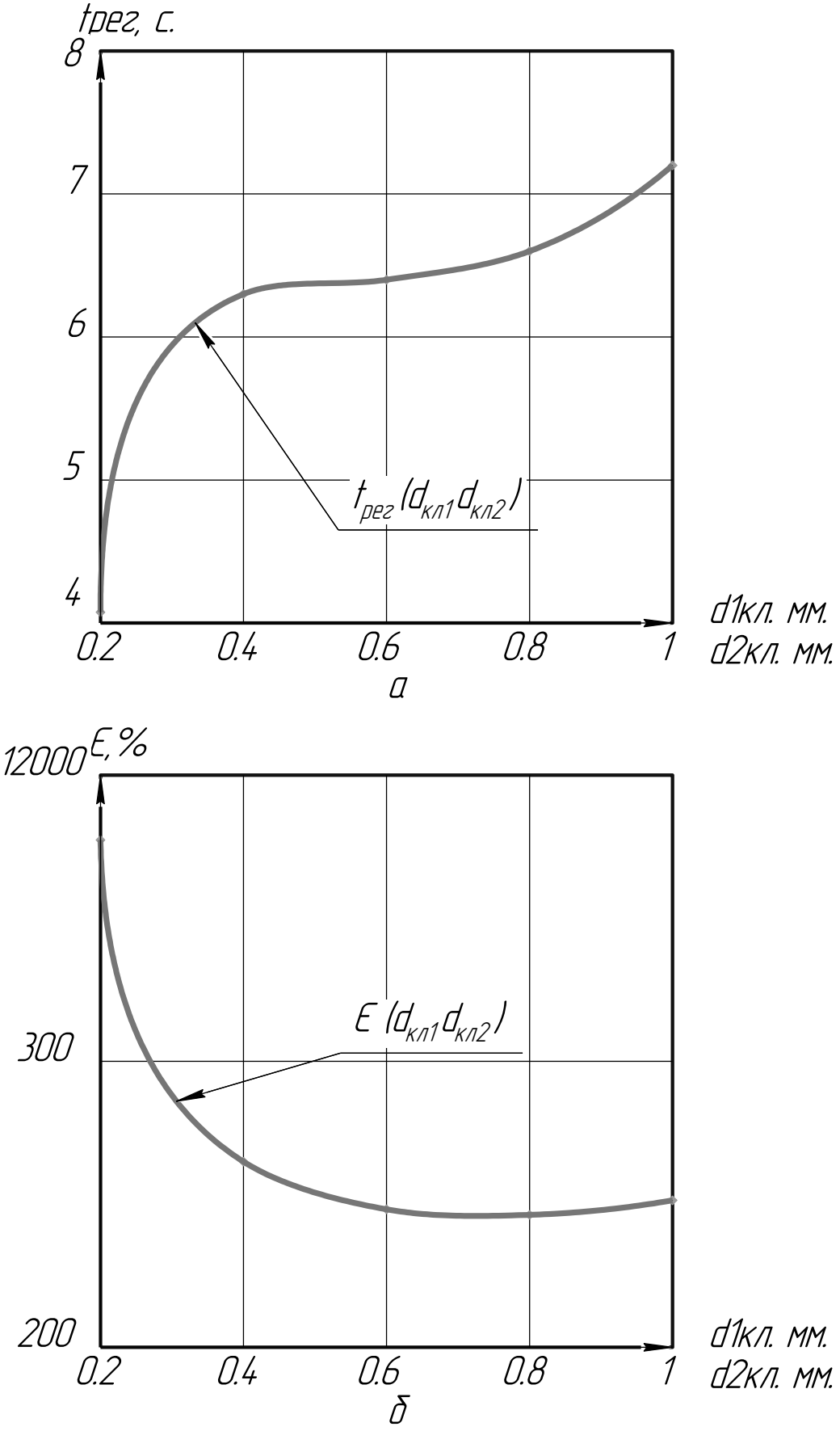


Рисунок 2.15 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $d_{кл1}$, $d_{кл2}$

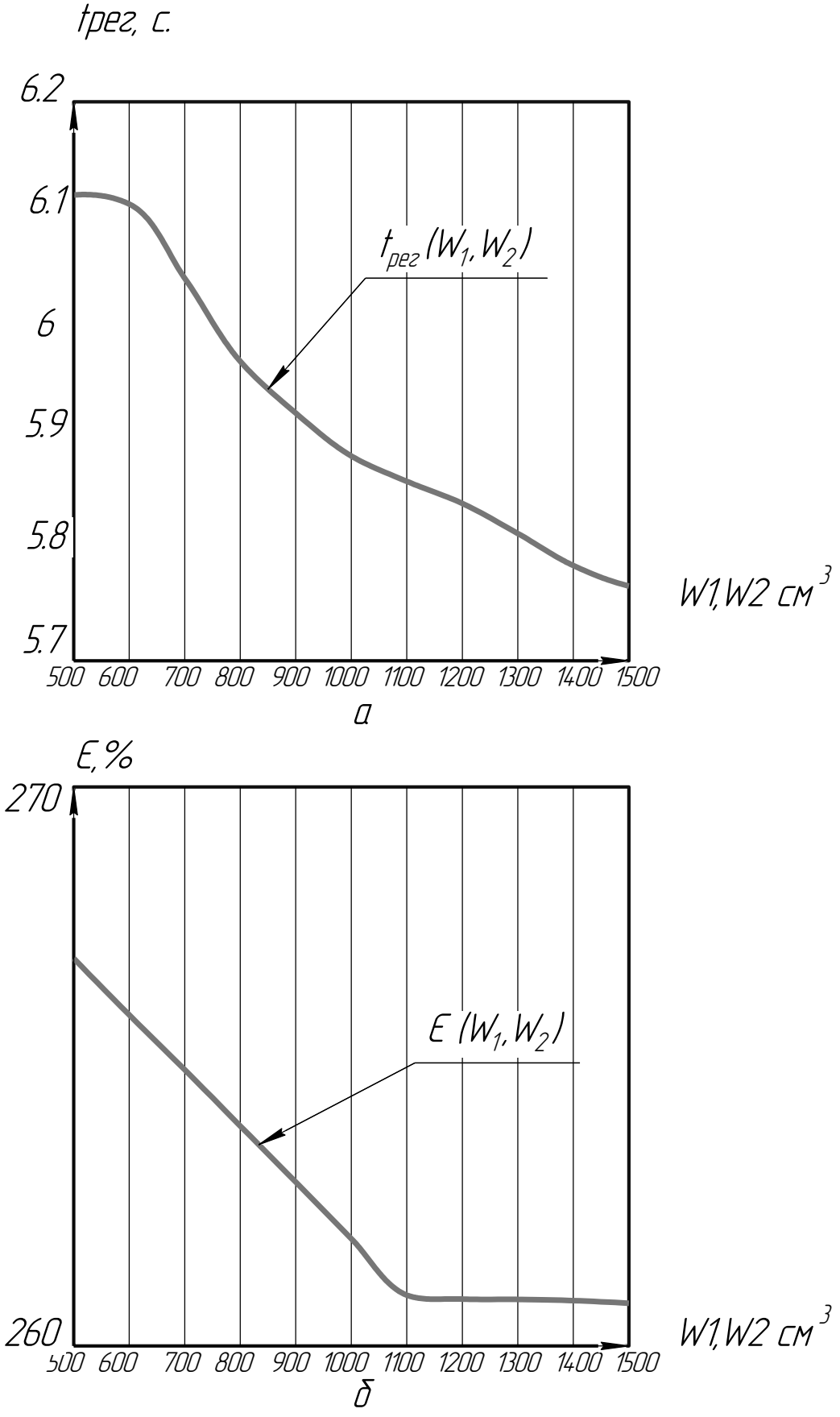


Рисунок 2.16 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні W_1,W_2

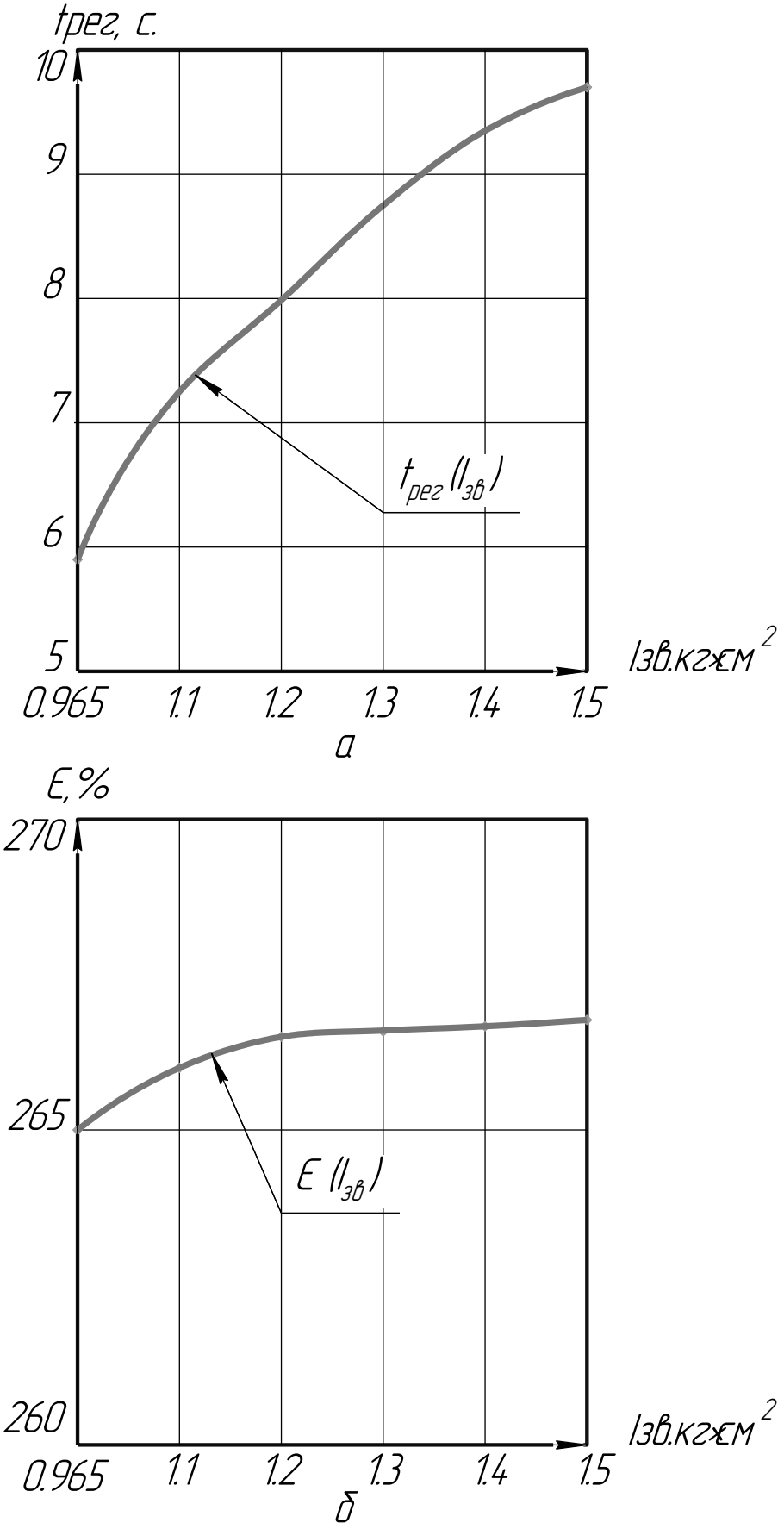


Рисунок 2.17 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $I_{зв}$

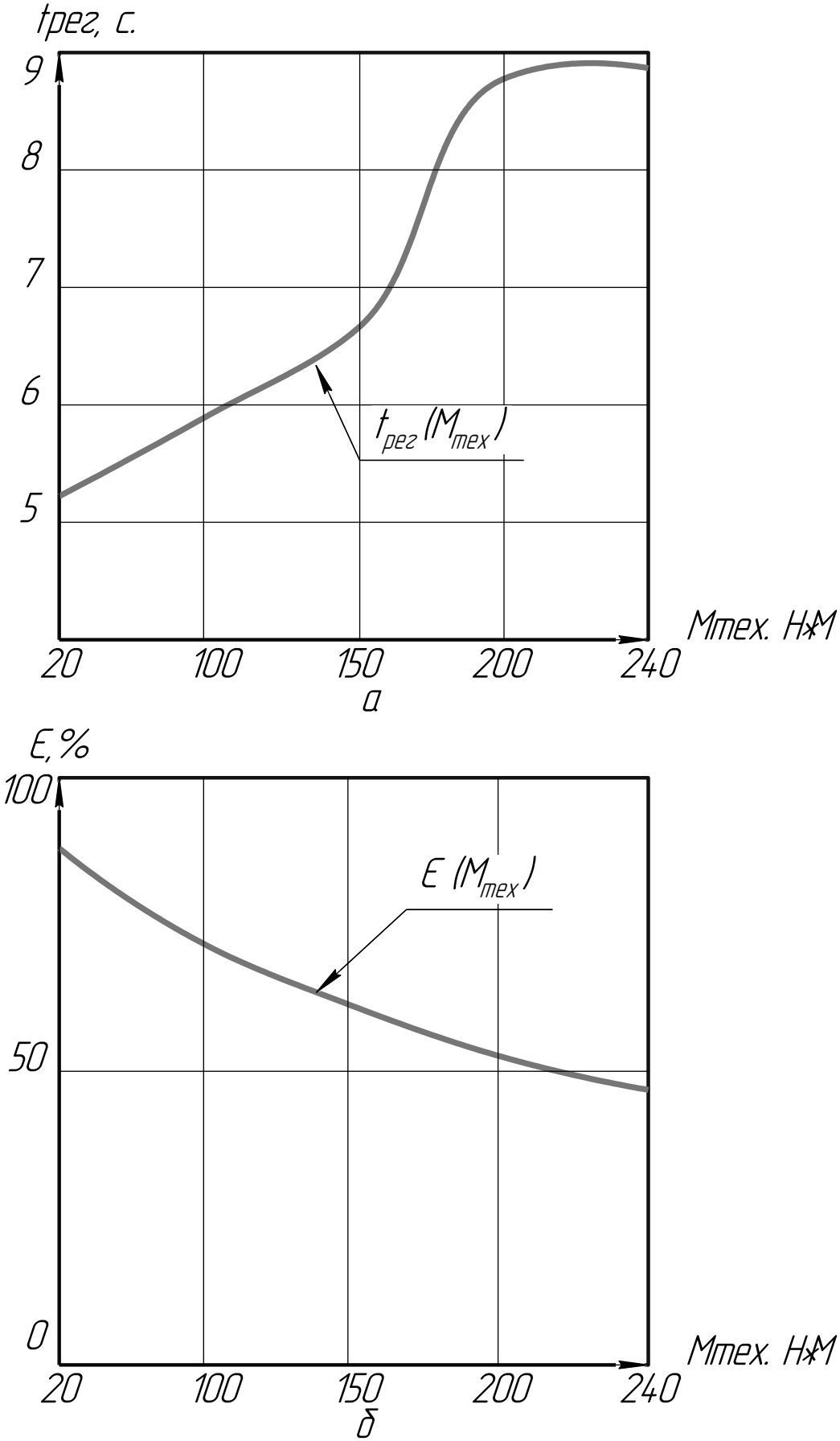


Рисунок 2.18 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $M_{техн}$

На рисунках 2.4 – 2.18 показано результати розрахунку залежностей зміни часу регулювання і перерегулювання за часом.

З графіків видно, що при зміні значення діаметра отвору клапана підживлення від 0,3 см до 0,4 см час регулювання зростає, перерегулювання зростає. При значенні діаметра від 0,4 см до 1 см час регулювання падає, перерегулювання теж падає. При зміні значення діаметра отвору шунтуючого розподільника час регулювання зростає, перерегулювання спочатку непомітно зростає, а потім різко йде догори. При зміні значень діаметрів запобіжних клапанів час регулювання зростає, а перерегулювання зменшується, і при великих значеннях діаметра виходить на усталене значення. Зміна об'єму порожнин гідросистеми мало впливає на зміну часу регулювання і пере регулювання зменшується. Збільшення зведеного моменту інерції викликає підвищення величин часу регулювання та перерегулювання, так при збільшенні моменту інерції на 50%, час регулювання росте від 8,4 с до 9,7 с. Перерегулювання зростає лише на 2,6%. Технологічне навантаження впливає досить значно, так при зміні технологічного моменту від 20 Н×м до 240 Н×м, час регулювання збільшується, від 5,2 с до 8,6 с. Перерегулювання падає від 88% до 46%.

Проведемо ці ж дослідження для меншого значення подачі насоса. Для цього приймаємо сигнал керування x=0,7.

Аналогічно попередньому знімаємо покази, і будуємо графіки залежностей часу регулювання і перерегулювання. Ці залежності представимо на рисунках 2.19 – 2.24.

З графіків видно, що при зміні значення діаметра отвору клапана підживлення час регулювання зростає, перерегулювання падає. При зміні значення діаметра отвору шунтуючого розподільника час регулювання спочатку падає, а далі зростає, пере регулювання також падає а потім зростає. При зміні значень діаметрів запобіжних клапанів час регулювання зростає, а перерегулювання зменшується, і при великих значеннях діаметра виходить на усталене значення.

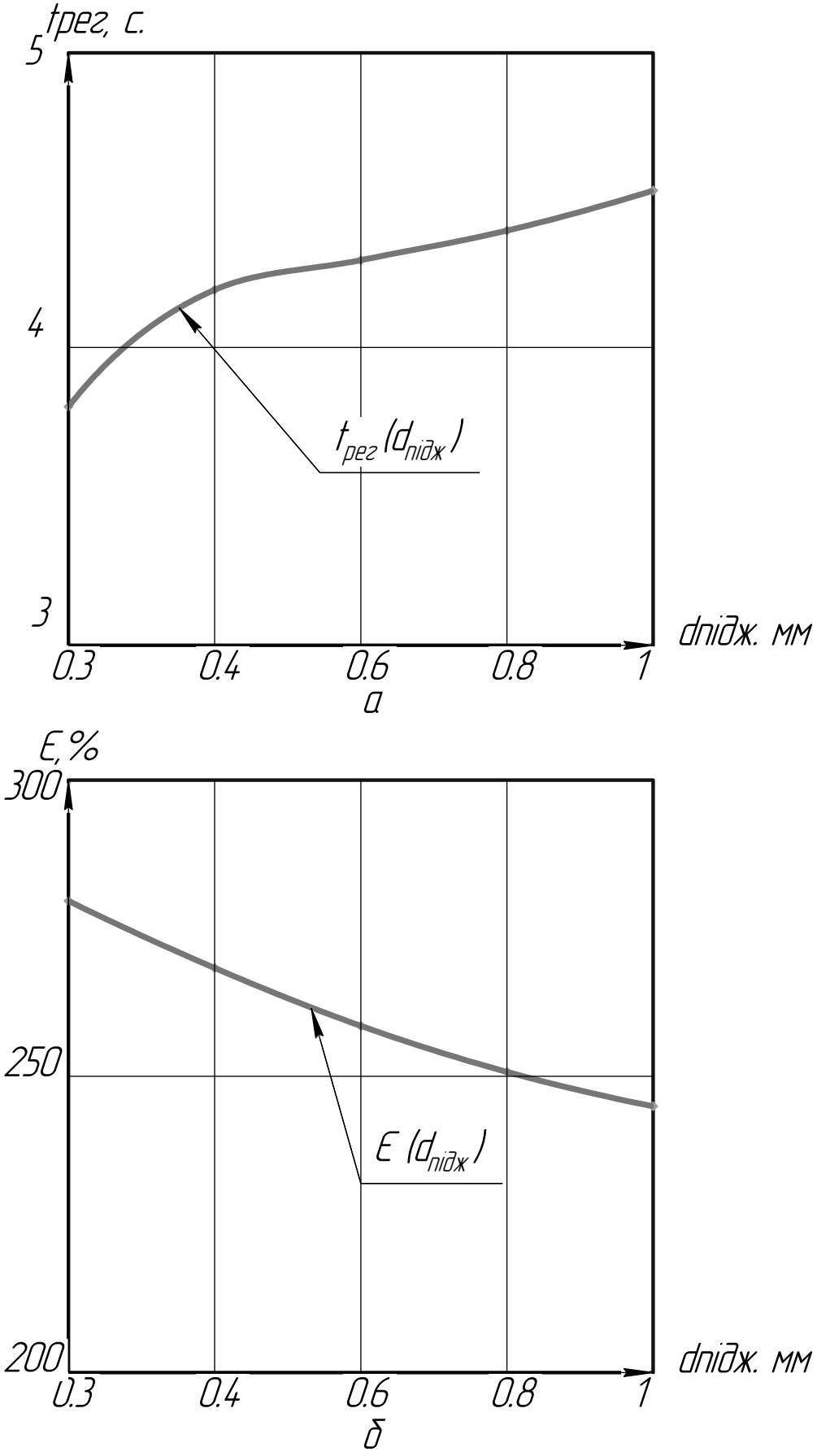


Рисунок 2.19 – Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $d_{підж}$

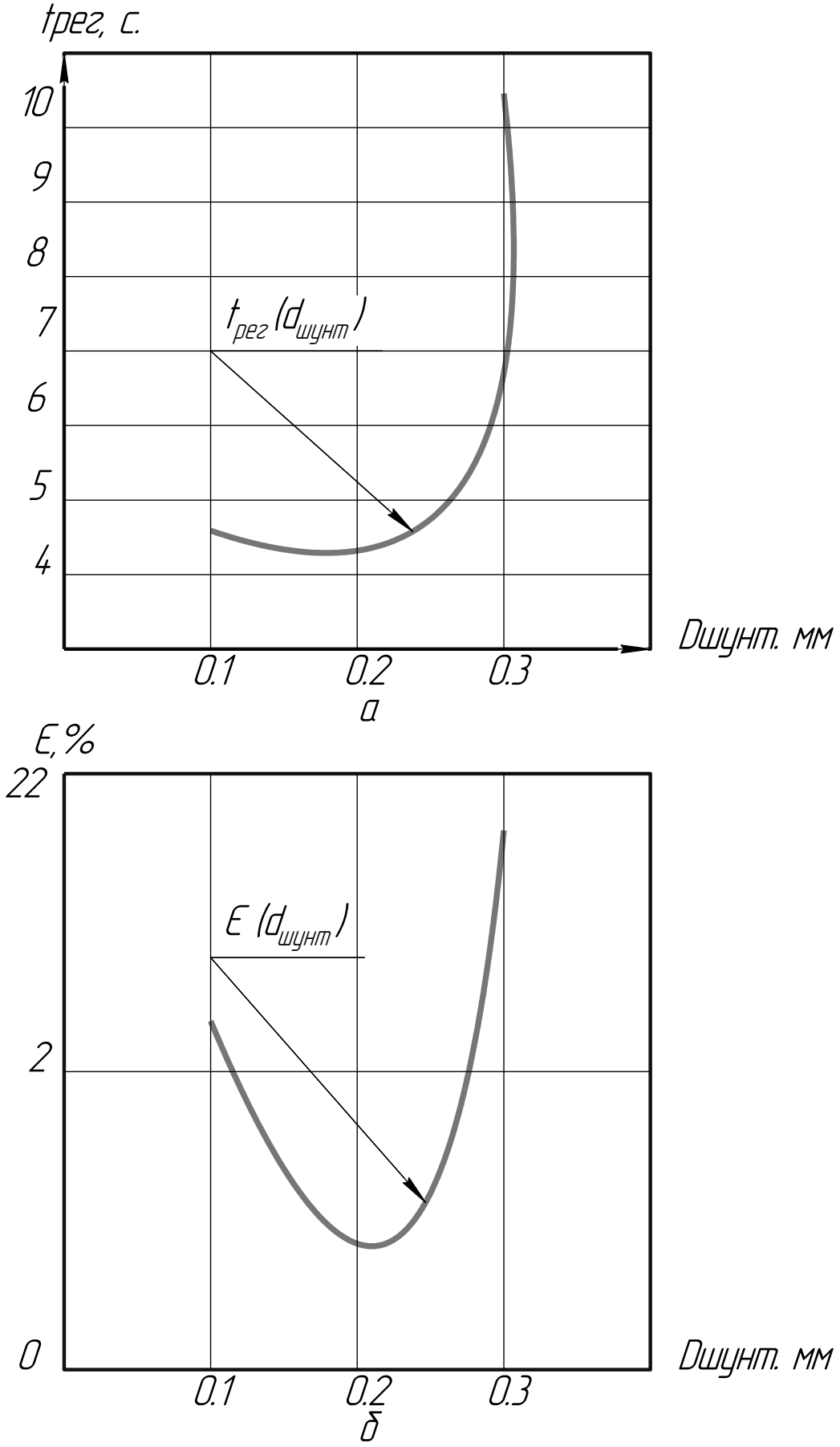
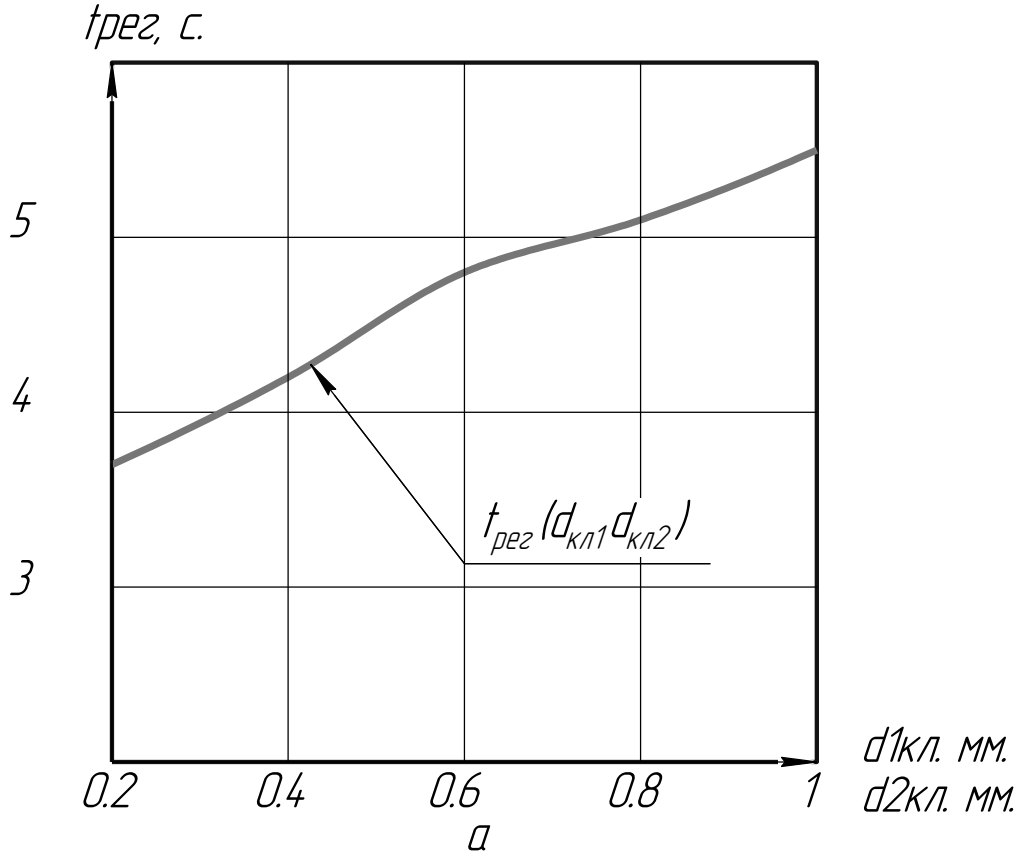


Рисунок 2.20 – Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $d_{шунт}$



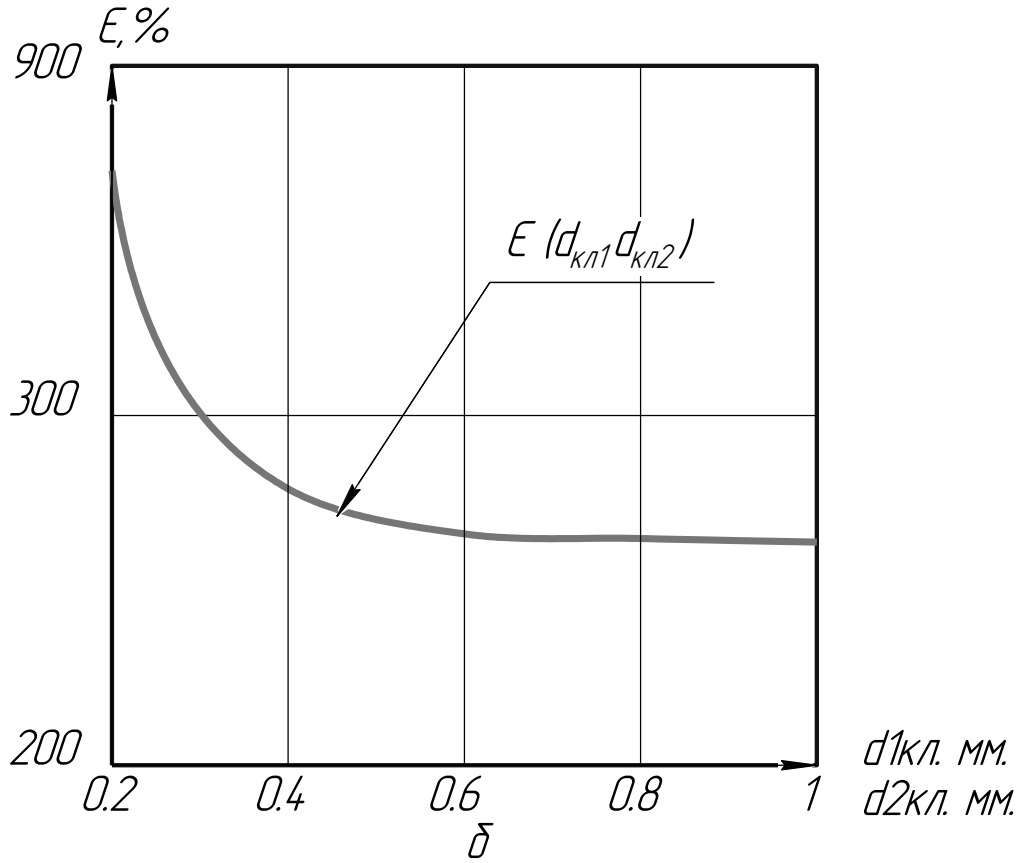
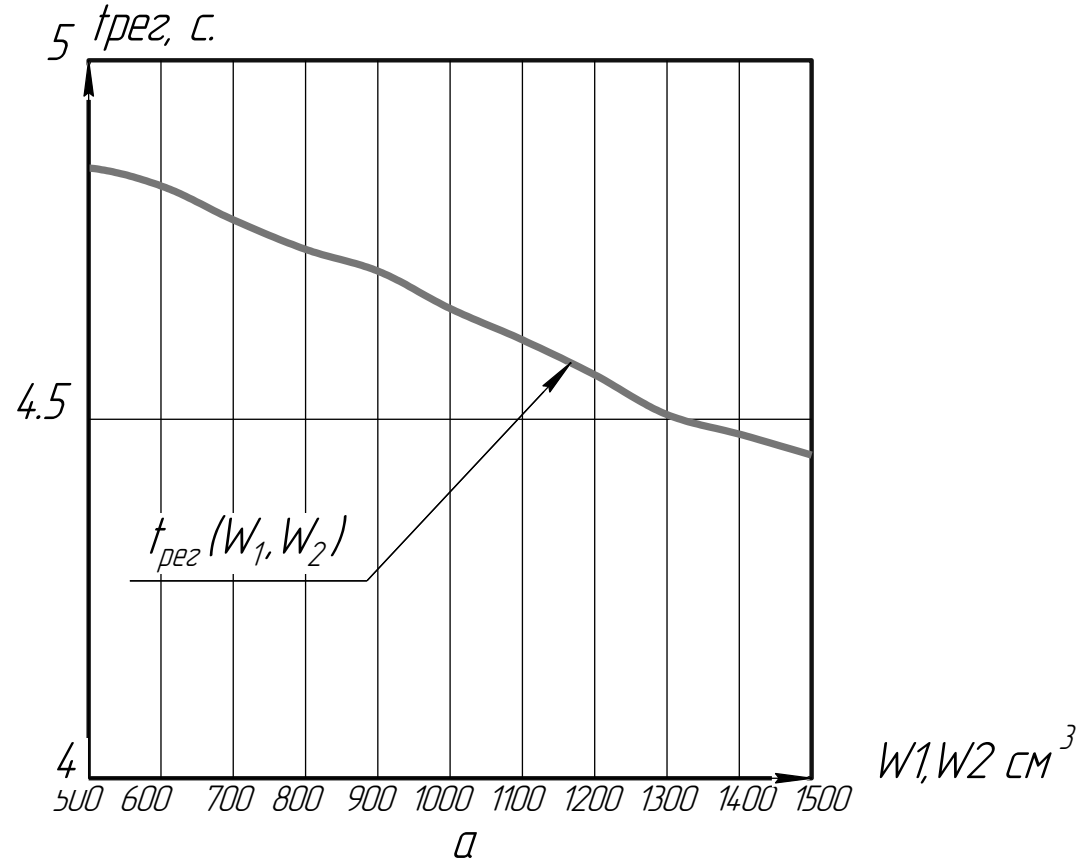


Рисунок 2.21 – Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $d_{кл1}$, $d_{кл2}$



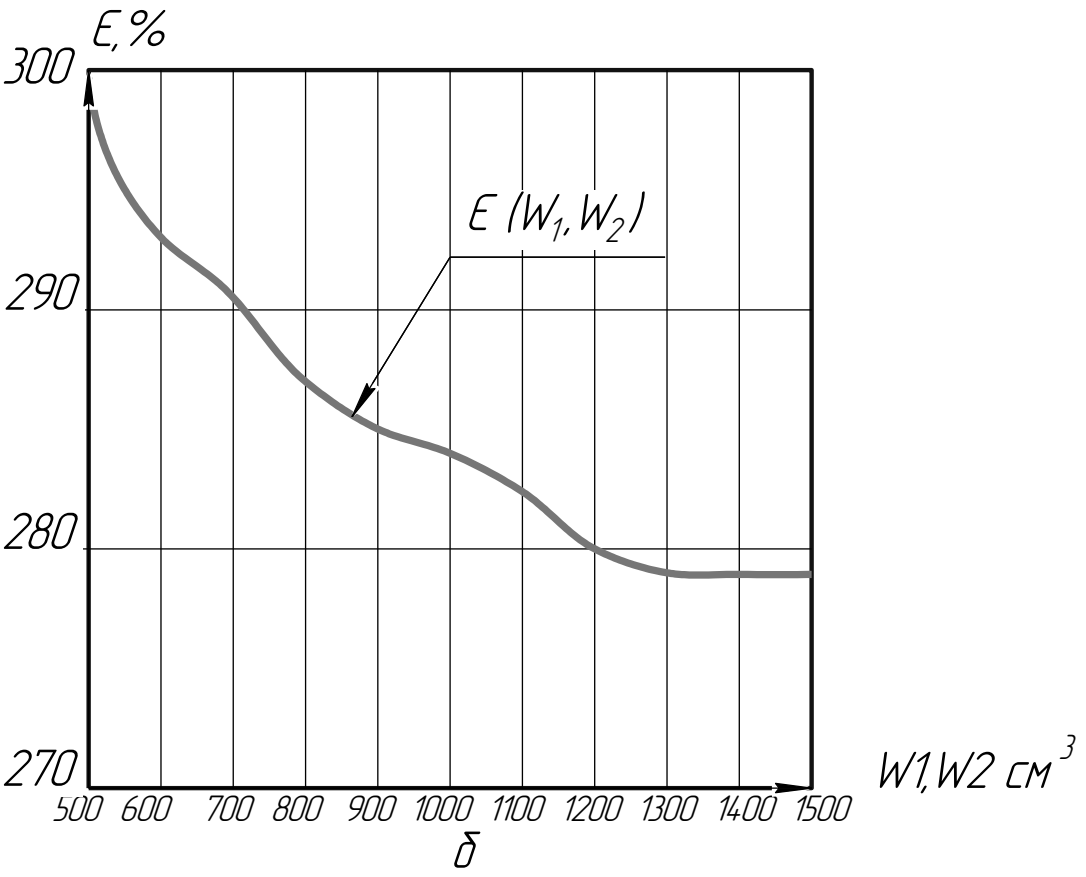


Рисунок 2.22 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні W_1,W_2

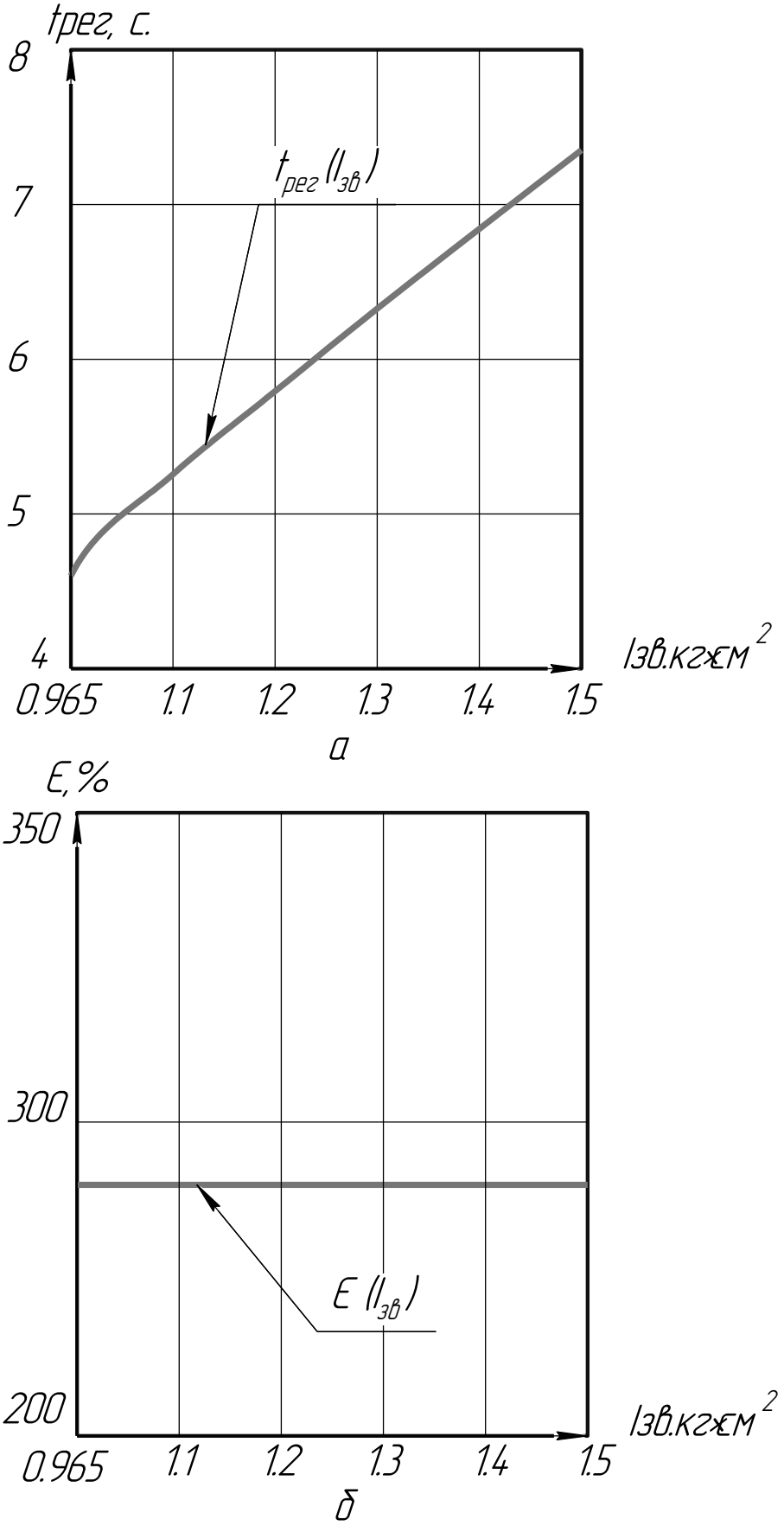
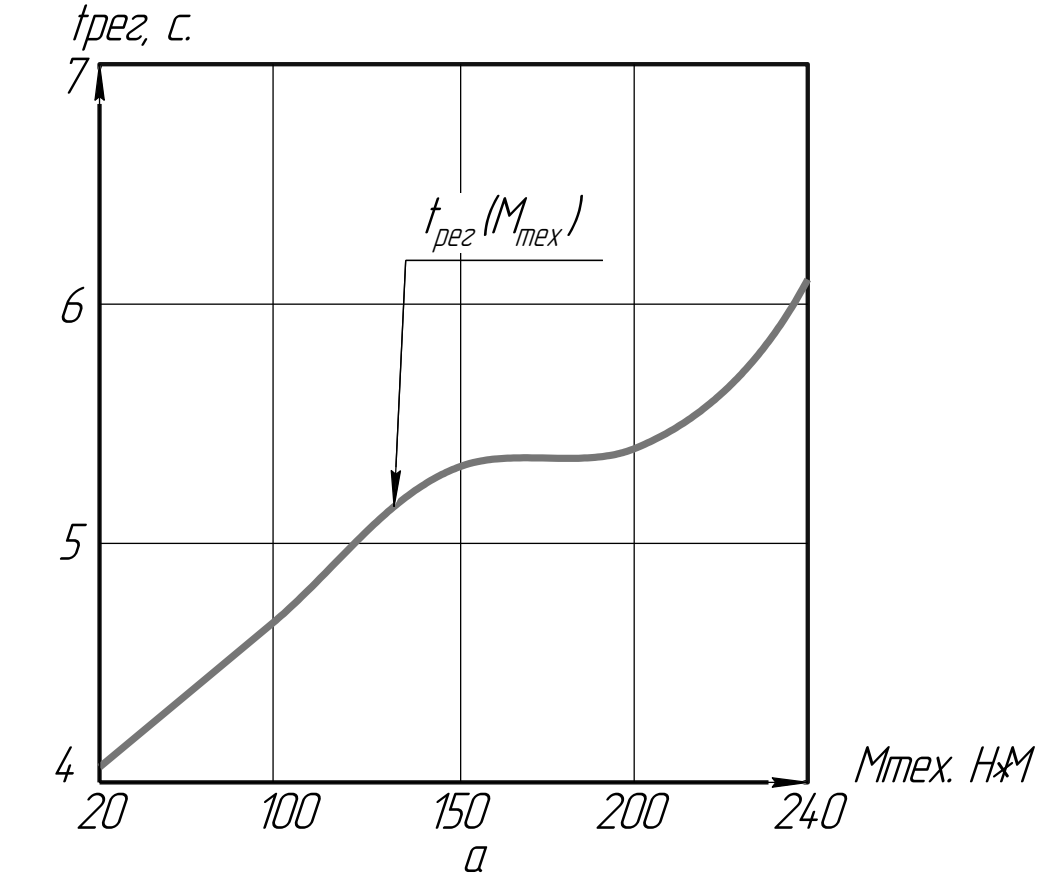


Рисунок 2.23 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $I_{зв}$



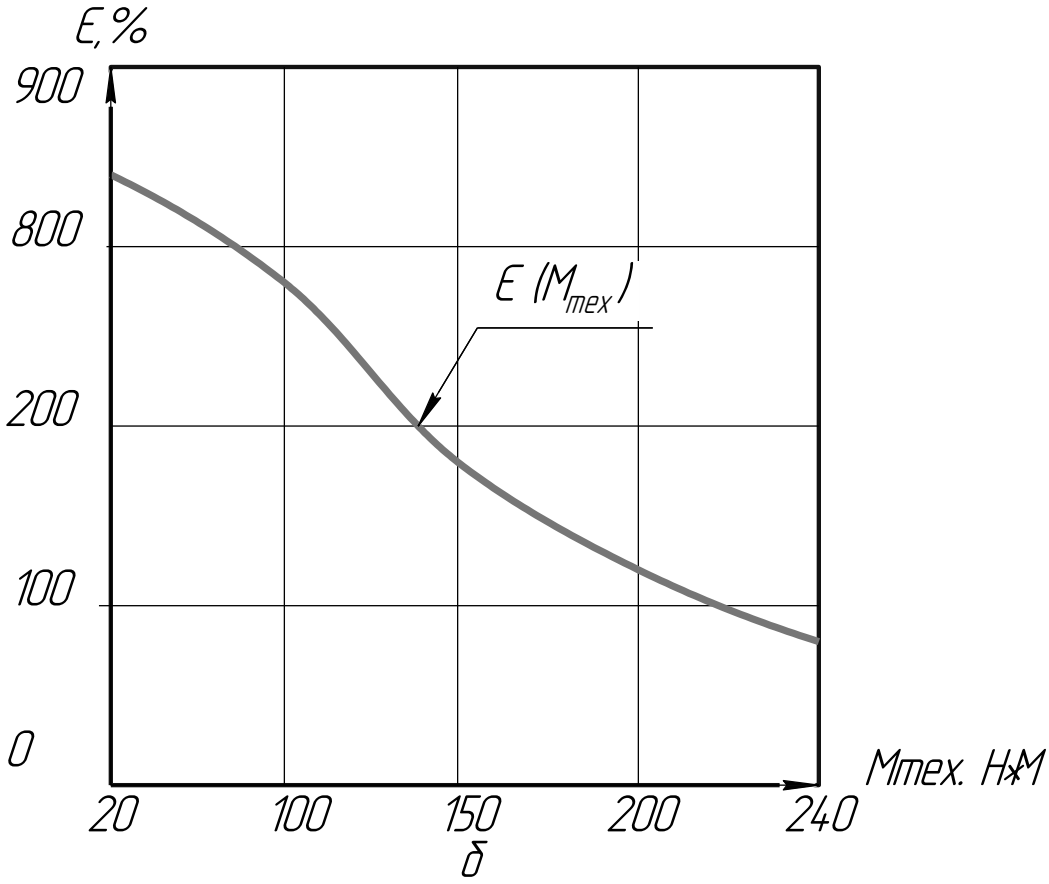


Рисунок 2.24 - Зміна $t_{рег}$(а) і ε(б) при зміні $M_{техн}$

Зміна об’єму порожнин гідросистеми мало впливає на зміну часу регулювання і перерегулювання, так при зміні об’єму від 500 $см^3$ до 1500$см^3$ час регулювання зменшується приблизно на 4 с, пере регулювання падає приблизно на 2с. Збільшення зведеного моменту інерції викликає підвищення величин часу регулювання, перерегулювання зростає. Технологічне навантаження при зміні технологічного моменту від 20 Н×м до 240 Н×м, час регулювання збільшується від 4 с до 6 с. Перерегулювання значно падає від 839% до 88%.

Після проведення даних досліджень видно, що найбільший вплив на час регулювання і перерегулювання має технологічне навантаження, зведений момент інерції, діаметри отворів запобіжних клапанів. Решта параметрів менш помітно впливають на час і перерегулювання.

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ DEFORM 3D У ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ.

Вирішення завдань економії металу, енергоресурсів та трудових затрат при виготовленні машин можливе тільки при застосуванні прогресивних та маловідходних технологій.

Значні резерви зменшення витрат металу, підвищення якості продукції та зниження її вартості приховані в удосконаленні заготівельного виробництва, в тому числі з використанням обробки металів тиском. Впровадження нових і удосконалення існуючих технологічних процесів кування, штампування, вальцювання, пресування та волочіння дозволяють знизити трудомісткість виготовлення виробів і витрати металу, зменшити припуски на обробку різанням. А використання процесів зонального деформування дозволяє реалізувати процес холодної формозміни виробів високої якості.

Використання комп'ютерних технологій значно полегшує процес створення раціонального способу виготовлення деформованої заготовки.

З цією метою широке використання знаходить програмне забезпечення Deform 3D, яке є в цьому випадку професійним рішенням для розробки процесів обробки металів тиском.

Система Deform 3D - потужна система моделювання технологічних процесів, яка призначена для аналізу тривимірного (3D) поводження металу при різних процесах обробки тиском. Deform 3D надає важливу інформацію про переміщення матеріалу і розподіл температур під час процесу деформування. Deform 3D дозволяє моделювати такі процеси, як: штампування, пресування/екструзія, кування, висадка, прокатка, протяжка, осадка, поверхневе пластичне деформування тощо.

Deform 3D є системою моделювання, засновано на методі кінцевих елементів (FEM), і використовує останні досягнення в області моделювання технологічних процесів.

Потужний вирішувач модуля DEFORM-3D здатний аналізувати складні взаємодії кількох об'єктів, що деформуються з різними властивостями при різних процесах обробки металів тиском. Це дозволяє реалістично з високою точністю моделювати процеси деформування металу і зміну температури в умовах виробництва. Інтелектуальний автоматичний генератор сітки (AMG) здатний автоматично побудувати і оптимізувати кінцево-елементну сітку, перебудовуючи її в разі потреби в ході розрахунку.

Генератор сітки використовує проміжні результати розрахунку і будує більш густу сітку в областях, де потрібна висока точність рішення, тим самим зменшуючи розмір завдання і знижуючи вимоги до обчислювальних потужностей комп'ютера. Крім того, користувач має можливість самостійно налаштовувати щільність сітки, розподіл її елементів по перетину і параметри її автоматичного перестроювання.

Простий і зручний призначений для користувача інтерфейс DEFORM-3D робить легким підготовку вихідних даних і аналіз результатів моделювання. Крім того, доступні інструменти для редагування 3D геометрії, такі як логічна операція для обрізання облою. Так само можуть бути проаналізовані такі складні процеси механічної обробки як обрізання і різання на мірні заготовки. DEFORM-3D дозволяє моделювати весь технологічний ланцюжок, починаючи з розподільних заготівельних операцій, операції нагріву заготовки, формотворчих операцій і закінчуючи операціями остаточної термічної обробки, механічної обробки і установки механічних з'єднань.

DEFORM-3D використовує останні досягнення в області моделювання технологічних процесів. Потужний вирішувач модуля DEFORM-3D здатний аналізувати складні взаємодії кількох об'єктів, що деформуються з різними властивостями при різних процесах обробки металів тиском. Це дозволяє точно і реалістично моделювати процеси деформування металу в умовах виробництва.

3.1. Початок роботи в Deform 3D

Deform-3D - система моделювання технологічних процесів призначена для аналізу руху металу при різних типах обробки тиском. Використовуючи програмний засіб можемо отримати важливу інформацію про рух матеріалу в штампі рух температурних полів та напружено-деформований стан матеріалу заготовки під час деформування.

Програмний комплекс Deform 3D дає можливість досліджувати процеси руху деформованого металу зі складним рухом інструменту, моделювання структурно-фазових перетворень, побудови траєкторії переміщення точок деформованого тіла та враховувати історію деформування. Дозволяє моделювати такі різні процеси як витяжка листового, тонкого приповерхневого так і об'ємного деформування. Автоматичний сітковий генератор будує оптимізовану кінцево-елементну сітку , згущуючи її в найбільш критичних зонах що знижує необхідний для роботи рівень підготовки. А також існує можливість самостійно налаштувати густину сітки, її розподілення по перерізу і параметри автоматичної перебудови.

Слід зауважити що Deform 3D є набором програм, в який входять 3 основних компонента:

l. Preprocessor (Препроцесор) необхідний для створення, збору і редагування даних необхідних для розрахунку і створення бази даних.

2. Simulator (Процесор) необхідний для проведення розрахунку і запису отриманих результатів в кінцевий файл бази даних. Разом з вирішенням задачі працює система пере розбиття елементів яка при необхідності може створити нову сітку кінцевих елементів

3. Post processor (Постпроцесор) необхідний для читання бази даних після завершення моделювання і відображенні результатів в вигляді графіків та числових даних

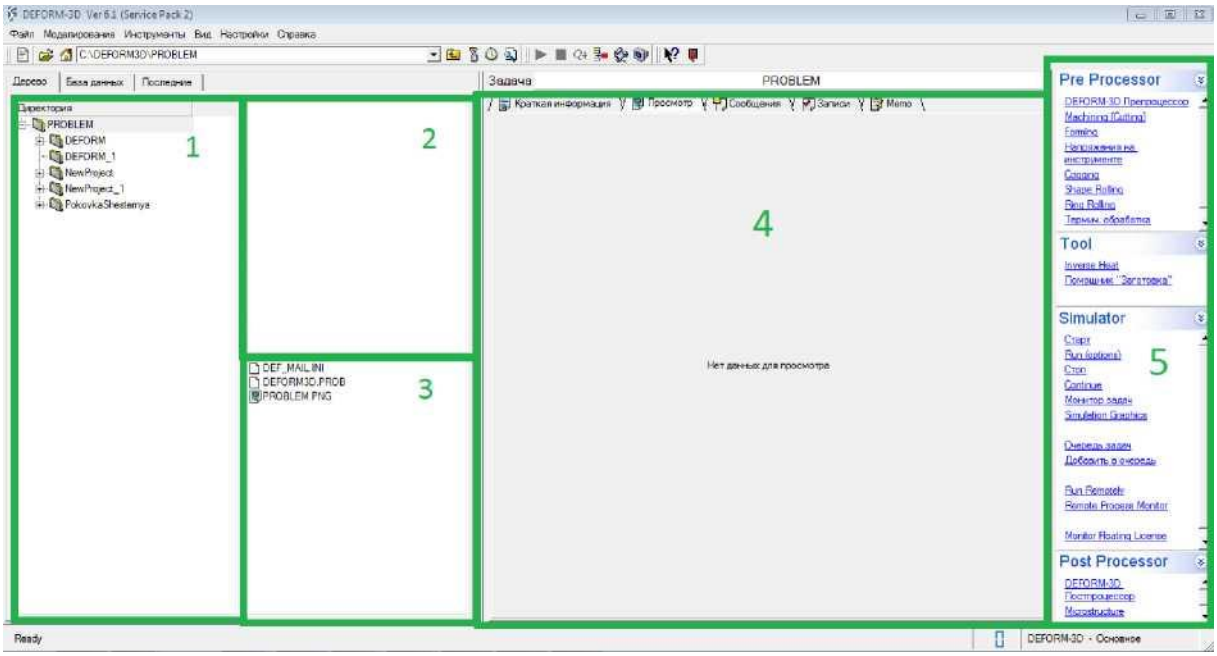


Рисунок 3.1 - Інтерфейс програми

1- Поле директорій.

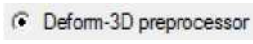
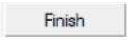
2- Поле баз даних розміщених в вибраній папці

3- Поле допоміжних файлів, що генеруються під час роботи

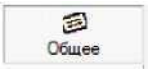
4- Поле відображення повідомлень

5- Основні компоненти системи.

Також присутні панель задач та панель інструментів.

Робота в системі Deform 3D починається з створення нової задачі. Для цього натискаємо кнопку . Вибравши тип задачі -  , натискаємо . Вказуємо розміщення задачі та її назву, тиснемо  . На екрані з’явиться вікно препроцесора.

Вікно має 3 області виділені зеленими рамками 1 – екран, 2- дерево об’єктів, 3 - властивості об’єктів. Для додавання об’єктів використовуються команда «добавить об’єкт» .

У вкладці  варто вказати тип об’єкти (для заготовки(Workpiece) - пластичний, для штампа (Top die, Bottom die) - жорсткий), температуру та матеріал об’єктів.

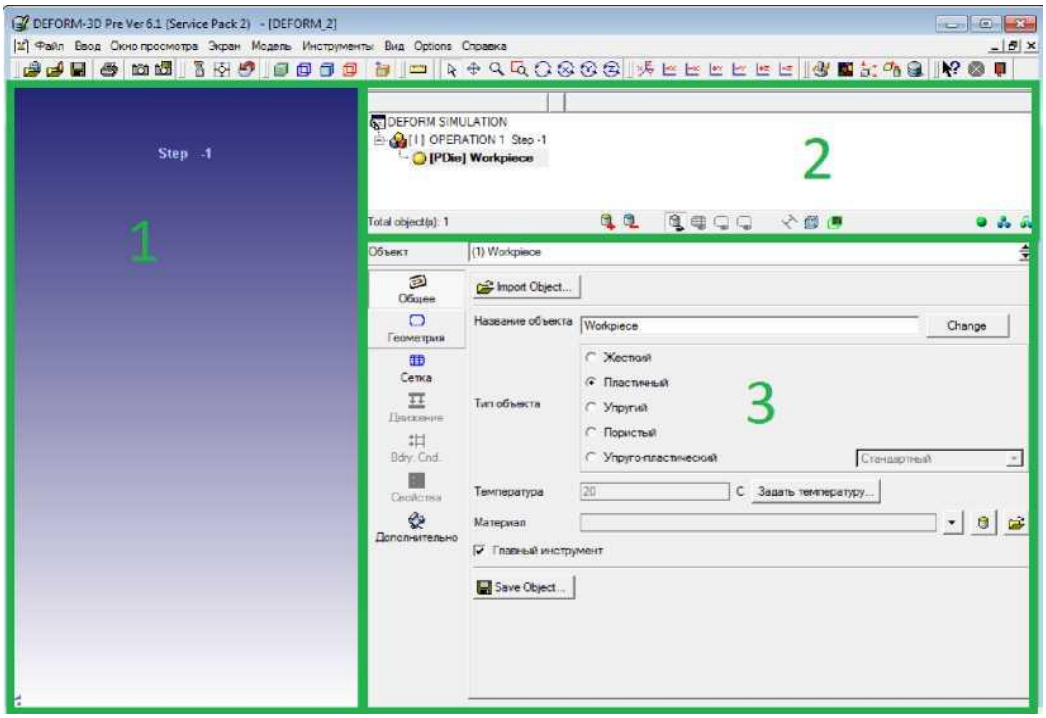


Рисунок 3.2 - Інтерфейс препроцесора.

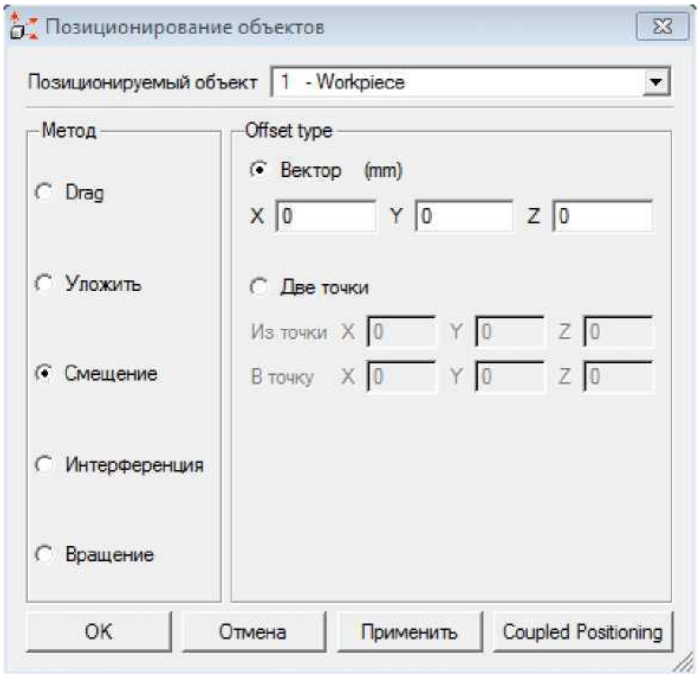
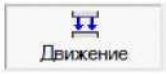


Рисунок 3.3 - Вікно позиціонування об’єктів

У вкладці Геометрия за допомогою команди Импорт геометрии... задають форму та розміри об’єктів імпортуючи раніше розроблені 3D моделі в форматі STL.

За допомогою команди Геометрич. примитивы... можна створити тіла простої форми (паралелепіпед , циліндр, циліндр з отвором). Натиснувши «Object positions» на панелі інструментів, відкриється вікно позиціонування об’єктів.

Використовуючи методи (перетягування, зміщення, укладка, інтерференція, обертання) об’єктам задається конкретне геометричне розташування.

В вкладці 

для рухомих об’єктів (Top die) задаються фізичні параметри, тип , напрямок руху

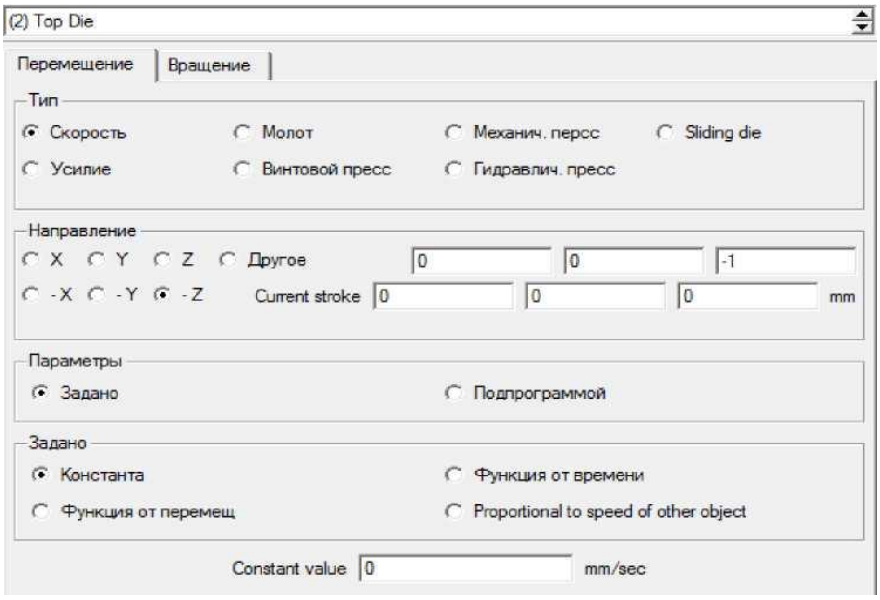


Рисунок 3.4 - Налаштування переміщення рухомих об’єктів

3.2. Робота з препроцесором системи Deform 3D

1. Використовуючи будь-яку доступну CAD систему виконуємо 3D модель поковки та визначаємо її об’єм.

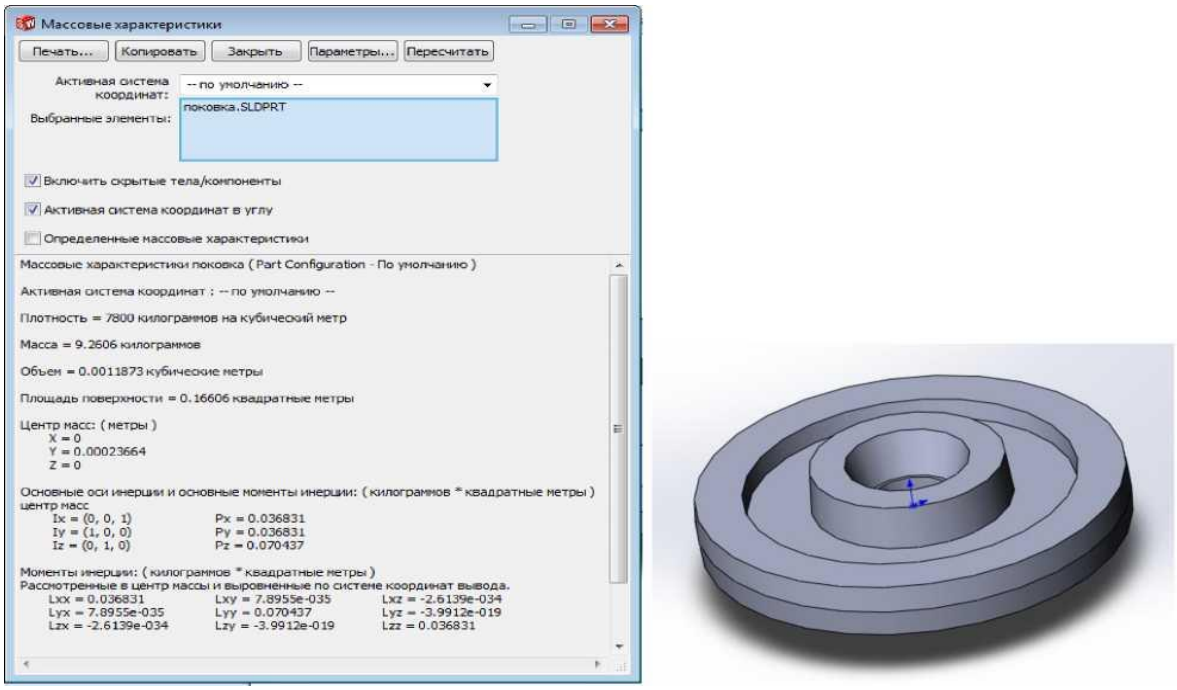


Рисунок 3.5 Модель поковки

1. Виконуємо 3D модель штампа.

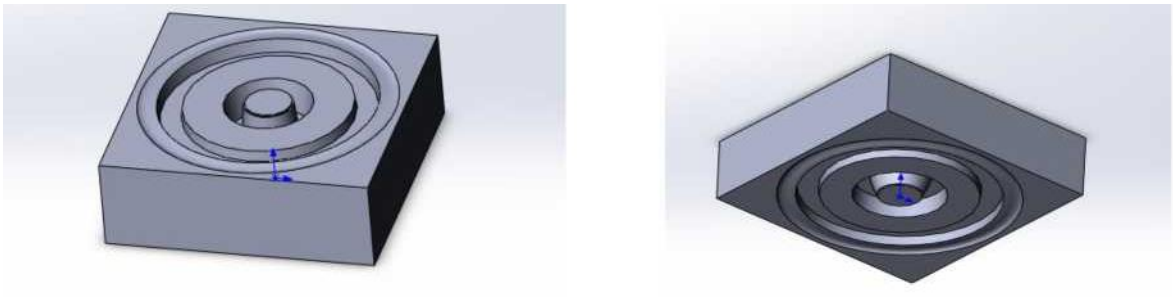


Рисунок 3.6 Модель штампа

2. Маса вихідної заготовки $C_{ЗАГ}$, необхідна для виготовлення поковки зубчастого колеса , визначається за формулою :

$$C_{ЗЛГ} = C_{ПОК} + C_{ОБЛ} + C_{ВИГ} + C_{ПЕР}, \quad (1)$$

де $G_{поК}$ - маса поковки; $C_{ОБЛ}$ - маса облою; $C_{ВИГ}$ - маса відходу металу на вигар; $G_{пЕР}$ - маса перемички.

$$C_{ПОК} = 9{,}26 \text{ кг (див п.1)}$$

$$C_{ОБЛ} = (0{,}5...0{,}8) \bullet \rho \bullet P_{ОБЛ} - L, \quad (2)$$

де ρ - густина металу, г/см ^{3};

$P_{ОБЛ}$ - площа поперечного перерізу канавки для облою, см ^{2};

L - периметр поковки по лінії рознімання, см.

Величини $P_{ОБЛ}$ та L визначаємо з 3D моделі

$P_{ОБЛ}$= 2,9см^2 L = $n \bullet D_{оБл} = 3{,}14 \bullet 28{,}3 = 88{,}86$ см;

$C_{ОБЛ} = 0{,}6 \bullet 7{,}85 \bullet 2{,}9 \bullet 88{,}86 = 1330$ г = 1,213 кг.

G_{UEP} = 3.14 • D2^h • y

$G_{nEP} = 3{,}14 \bullet 5{,}2^2 \bullet 0{,}4\text{^}7{,}85 = 265$ г

Масу відходу металу на вигар при нагріванні в газовій методичній печі приймаємо рівною 2% від маси поковки з облоєм та перемичкою.

Маса вихідної заготовки :

$$G_{SAT} = 1{,}02 \ (9{,}26 + 1{,}213 + 0{,}265) = 10{,}95 \text{ кг.}$$

Поковки круглої форми типу штампованої заготовки зубчастого колеса виготовляють осадкою в торець та прошивкою. Для штампування на пресі приймаємо величину n-1.

За ГОСТ 2590-71 підбираємо найближчий більший діаметр круглого

прокату, що дорівнює 120 мм , та уточнюємо довжину вихідної заготовки:

$$L_{ЗАГ} = У_{ЗАГ} / P_{ЗАГ} = У_{ЗАГ} / n \text{ г}^2 = 1394 / (3{,}14 \bullet 6^2) = 12{,}33 \text{ см} = 123 \text{ мм}.$$

Вихідні заготовки будемо відрізувати за допомогою закритих кривошипних ножиць моделі Н1534 /5 Остаточна довжина вихідної заготовки:

$$L_{ЗАГ} = 123 \pm 2 \text{ мм}.$$

3. За допомогою вкладки «Geometric primitive» створюємо початкову заготовку, вказуємо матеріал заготовки та температуру обробки.

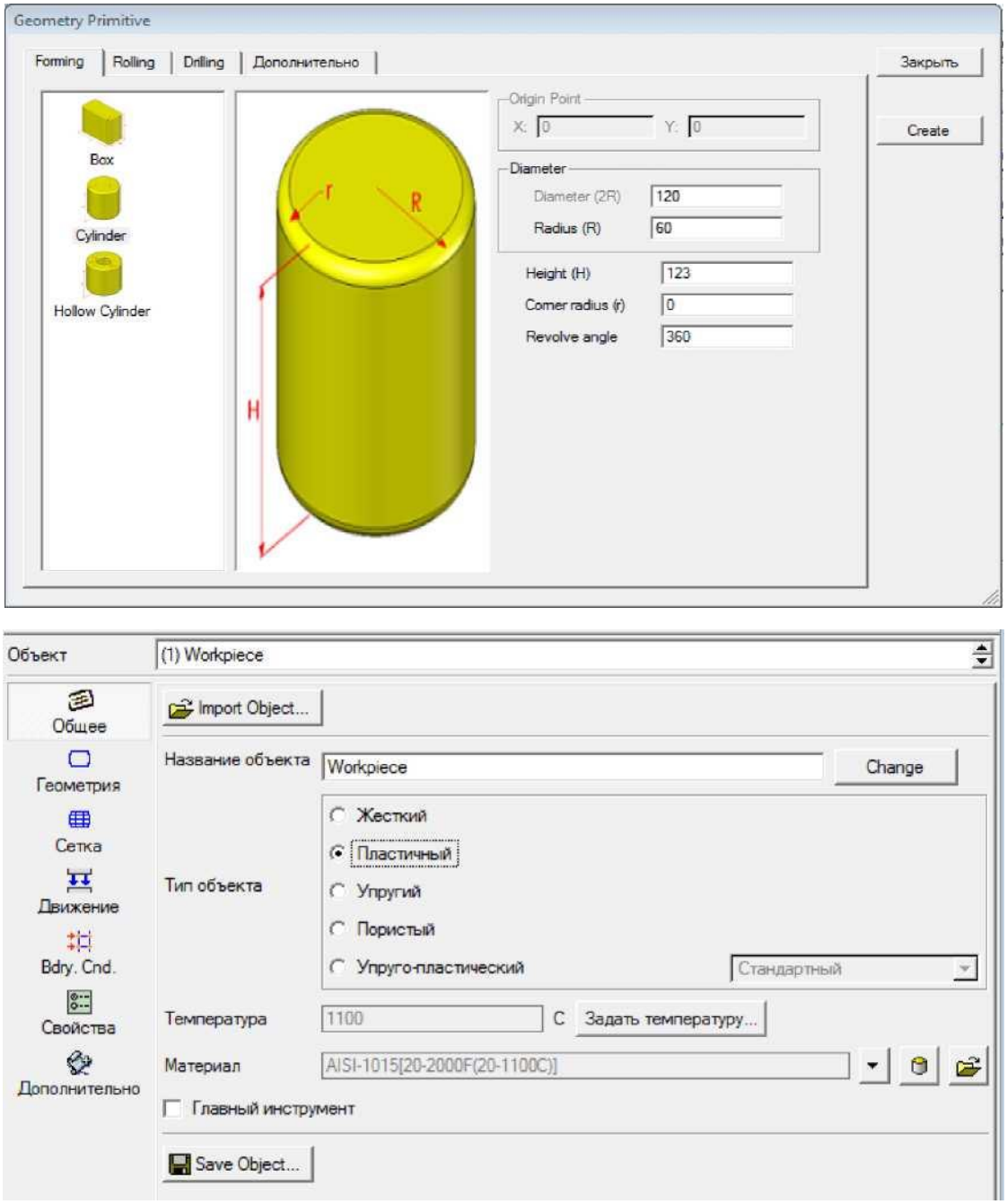
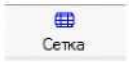


Рисунок 3.7 Форми для введення вихідних даних заготовок

У вкладці 

виконуємо налаштування густини сітки та генеруємо сітку. Перед генерацією візуально перевіряємо налаштування.

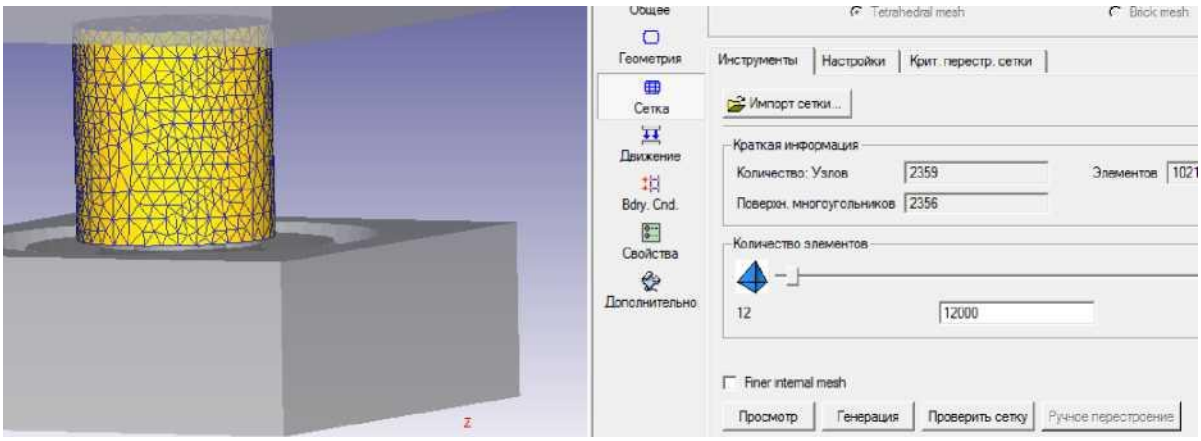


Рисунок 3.8 Генерація сітки кінцевих елементів

4. Створюємо проект в Deform 3D та імпортуємо моделі штампа. Використовуючи вікно позиціонування об’єктів задаємо розміщення тіл.

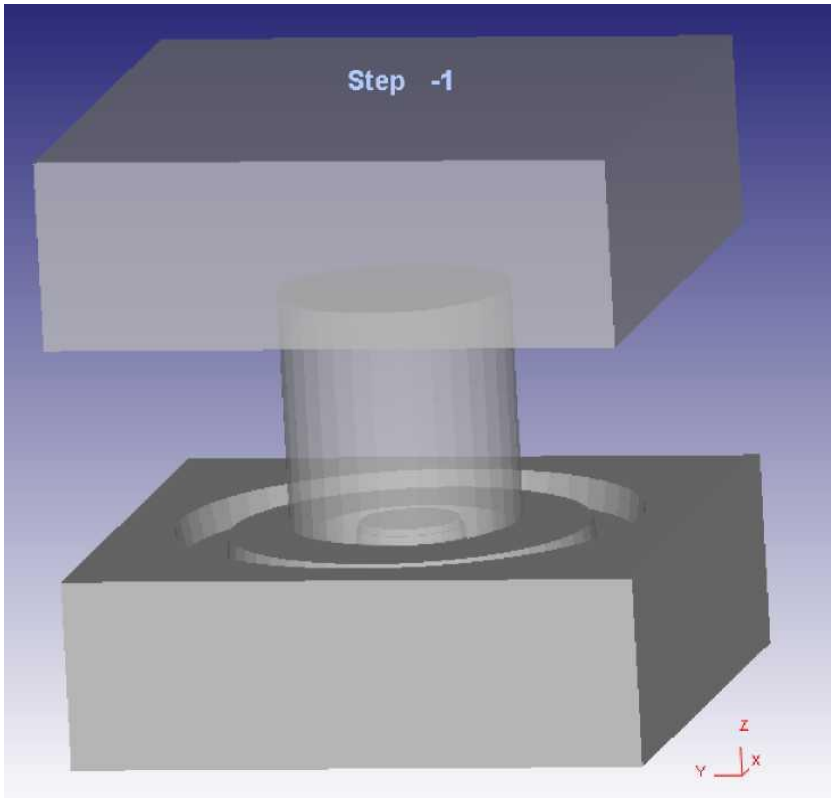
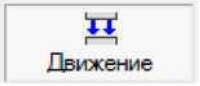


Рисунок 3.9 Розташування моделі штампа та заготовки

5. У вкладці 

виконуємо налаштування переміщення рухомих тіл.

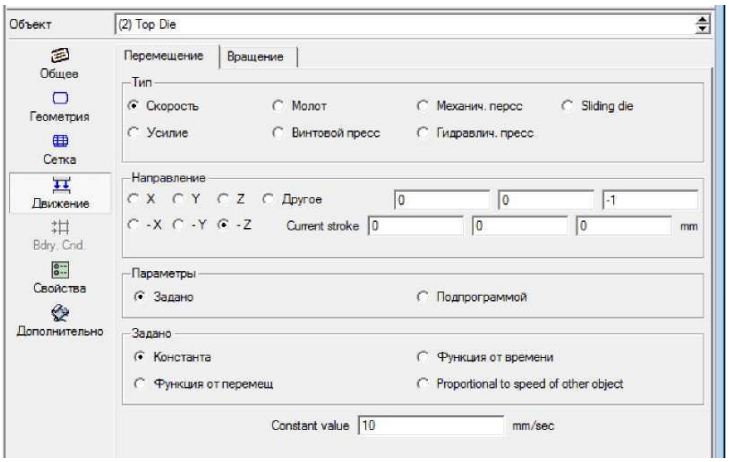


Рисунок 3.10 - Вкладка «Движение»

5. У вкладці Свойства вмикаємо компенсацію об'єму . Натискаючи на кнопку розраховуємо об'єм заготовки

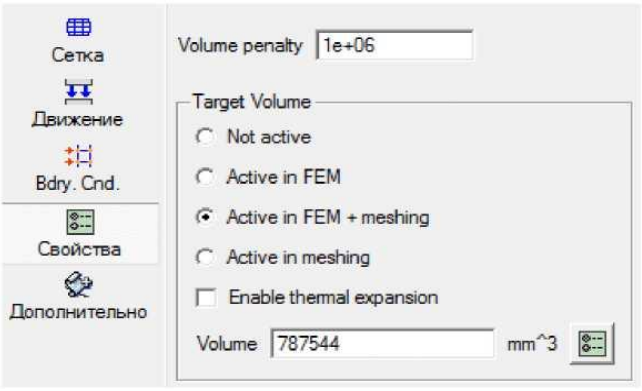


Рисунок 3.11. Вкладка « Свойства »

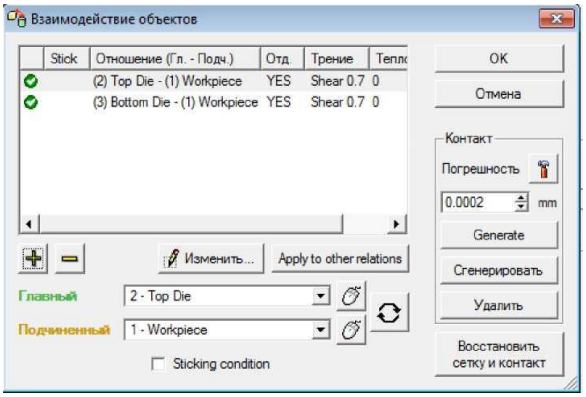


Рисунок 3.12 - Вікно «Inter object»

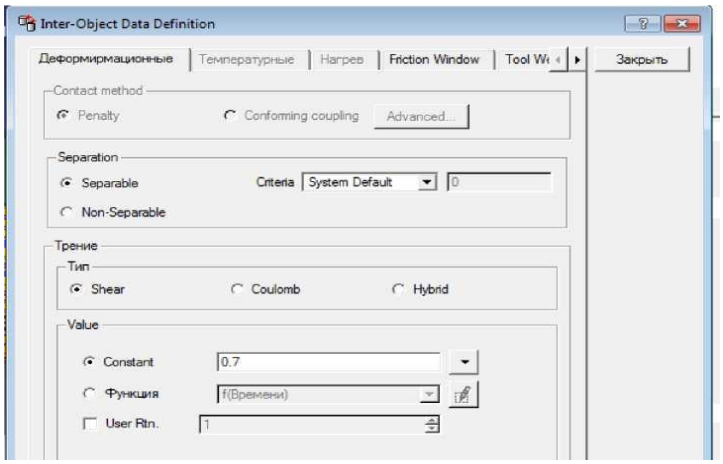


Рисунок 3.13 - Визначення даних

6. Відриваємо вікно «Inter object» . Система автоматично додає між об'єктні зв'язки . Вказуємо коефіцієнти тертя.

Зберігаємо налаштування препроцесора , для цього натиснувши вдкриваємо вікно «генерация баз данных» , перевіряємо можливість генерації нової бази даних. Після повідомлення «база данных может быть сгенерирована» вказуємо шлях збереження та натискаєм Сгенерировать. Після натискання закриваєм програму препроцесор.

3.3. Моделювання процесу штампування

1. Відкриваємо розділ «simulation control». У вкладці задаємо заголовок задачі та назву операції.

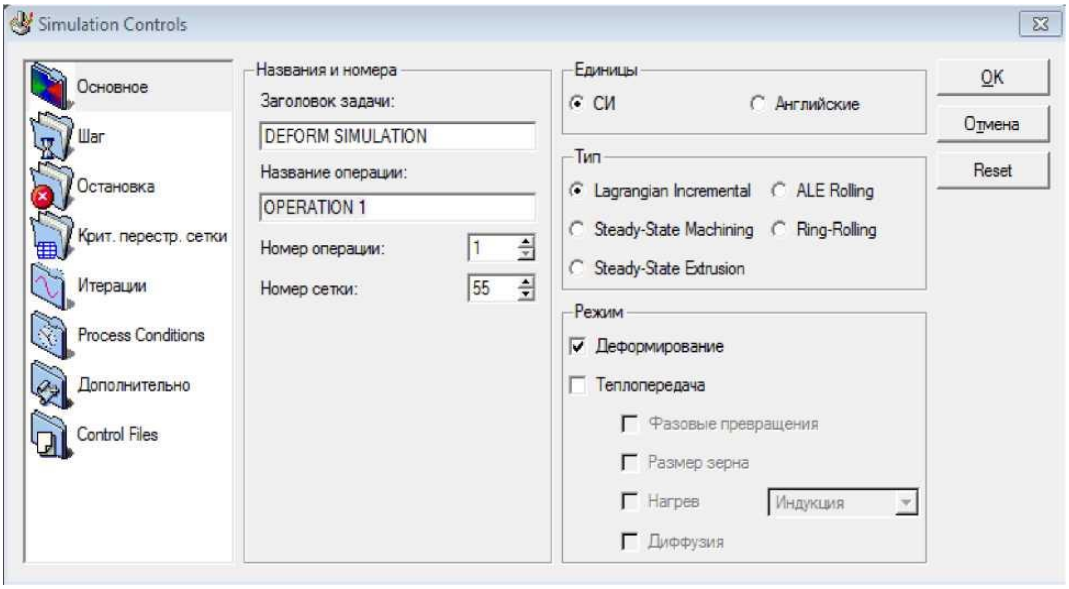


Рисунок 3.14 - Вікно «simulation control».

2. Вибираємо систему вимірів «СІ» та тип розподілення Лагранжа.
3. В вкладці виконуємо налаштування кроків симуляції.

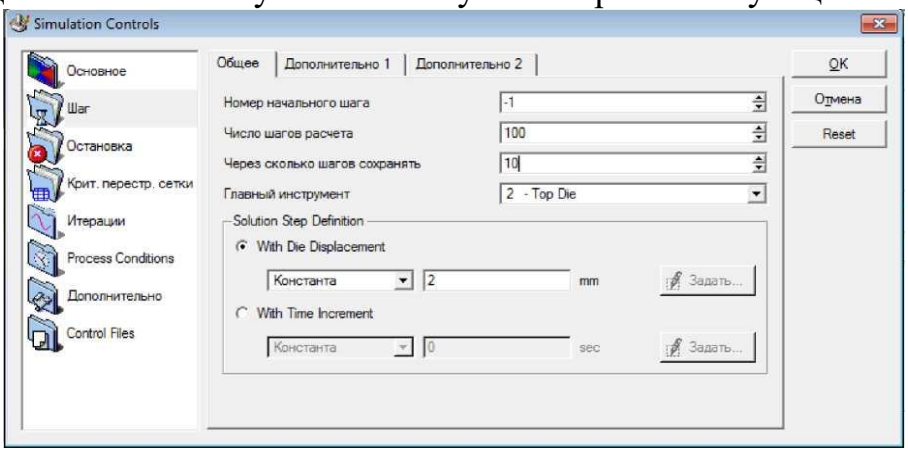


Рисунок 3.15 - Налаштування кроків симуляції

4. Для налаштування температури відкриваємо вкладку «Process Conditions» та встановлюємо температуру

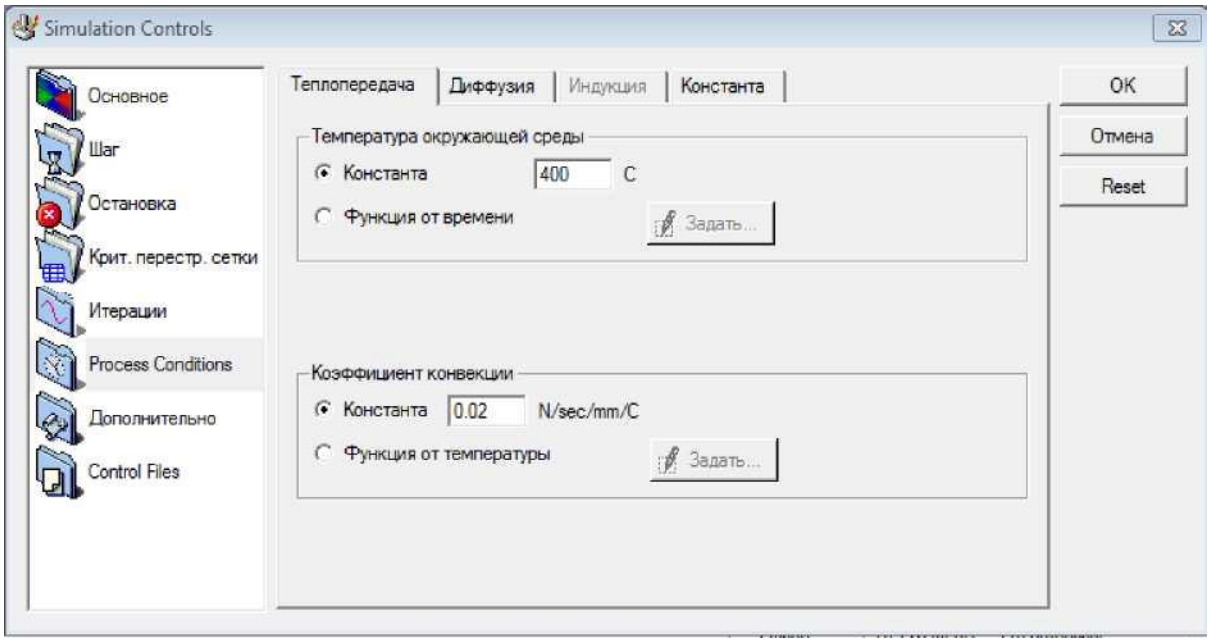


Рисунок 3.16 - Вкладка «Process Conditions»

5. Натиснувши відкриваємо вікно «генерация баз данных», перевіряємо можливість генерації нової бази даних. Після повідомлення «база данных может быть сгенерирована» вказуємо шлях збереження та натискаєм «Закрыть». Закриваєм вікно та закриваєм програму препроцесора.

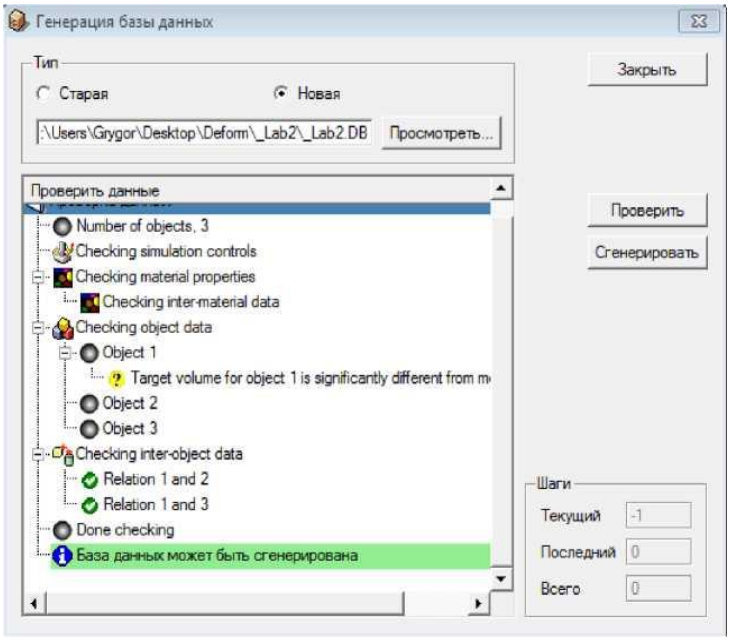


Рисунок 3.17 - Генерація бази даних

Відкривши вікно Deform 3D , в полі компонентів, а саме, в розділі «Simulator» натискаємо «Старт»

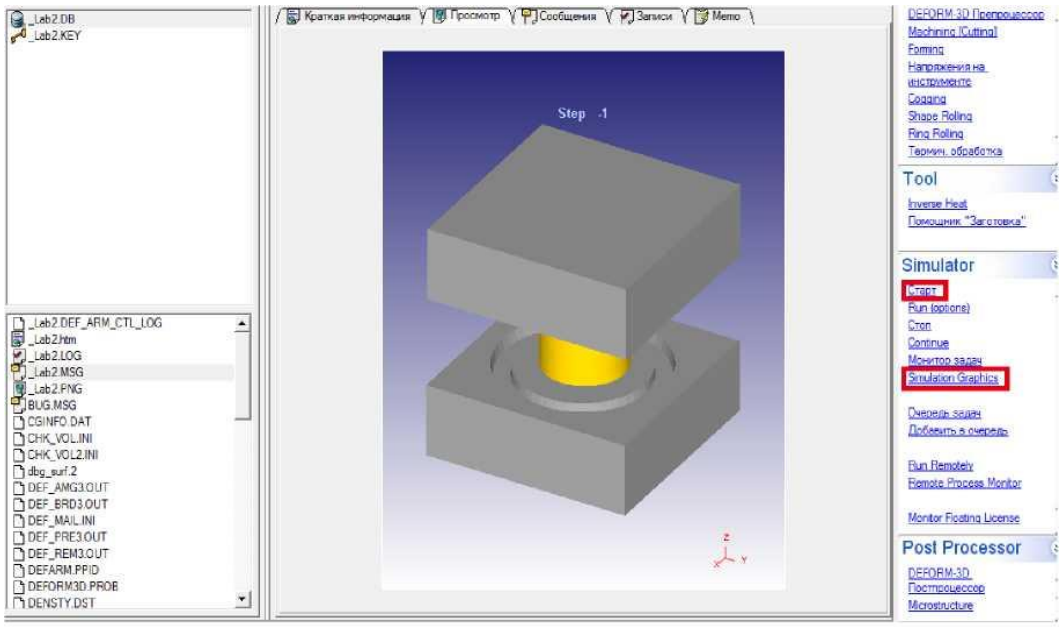


Рисунок 3.18 - Інтерфейс Deform 3D. Запуск симуляції .

Після повідомлення «simulation has been submitted» натискаєм «ОК» це означає чо програма розпочала розрахунок. Результати розрахунку демонструються в вкладці «сообщения» Для візуального перегляду процесу моделювання використовують додаток «Simulation Graphics».

3.4. Робота з постпроцесором

1. Після завершення симуляції процесу в полі компонентів програми Deform 3D натискаємо DEFORM-3D Постпроцессор. Для зручності верхню частину штампа робимо не видимою .

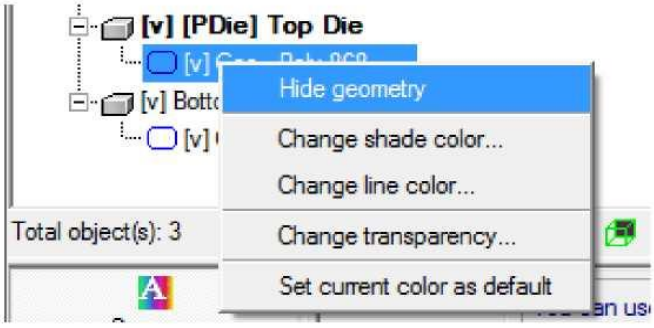


Рисунок 3.19 - Меню параметрів моделі.

Натиснувши відкриваємо вікно «Краткая информация». За допомогою кнопок виводимо на екран діаграми:

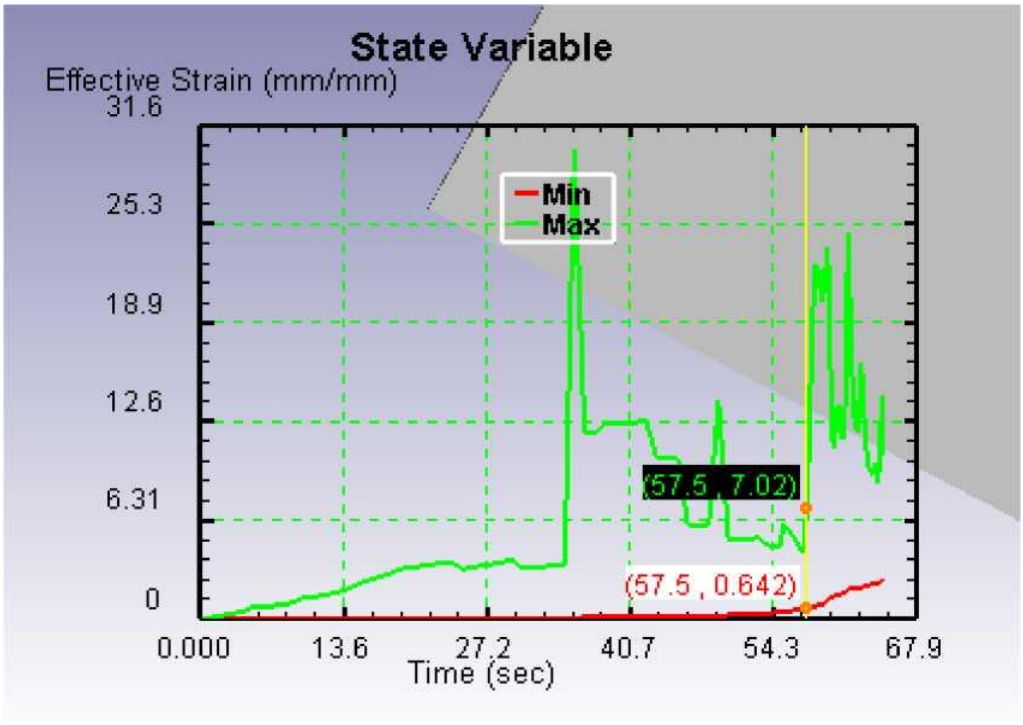


Рисунок 3.20 - Діаграма деформацій

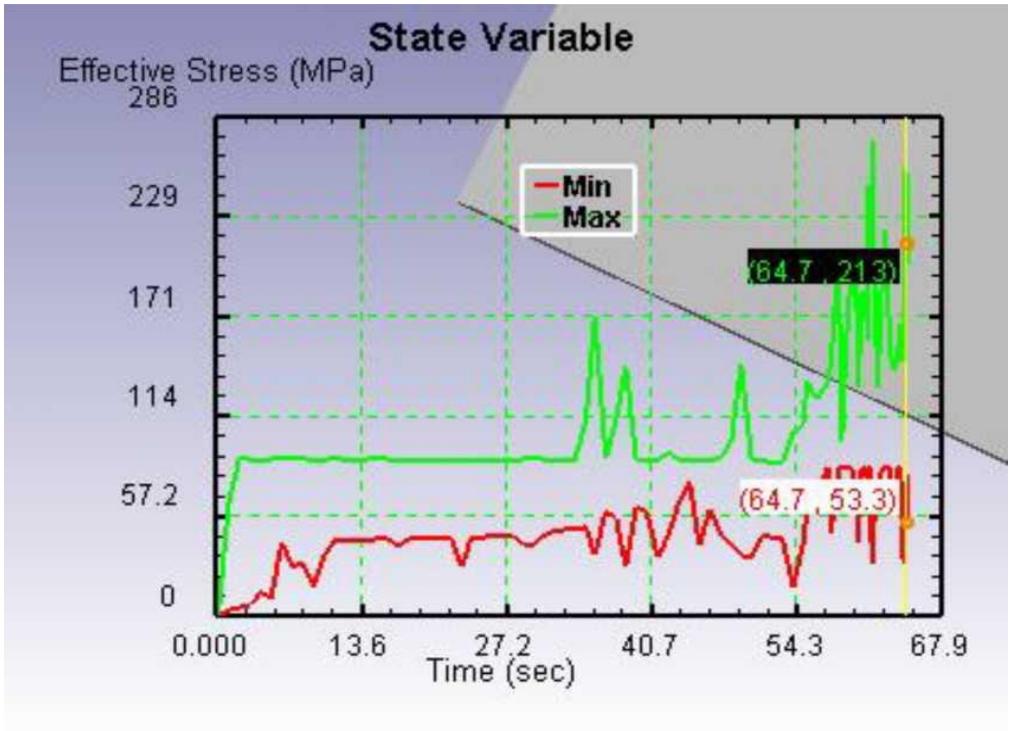


Рисунок 3.21 - Діаграма напружень

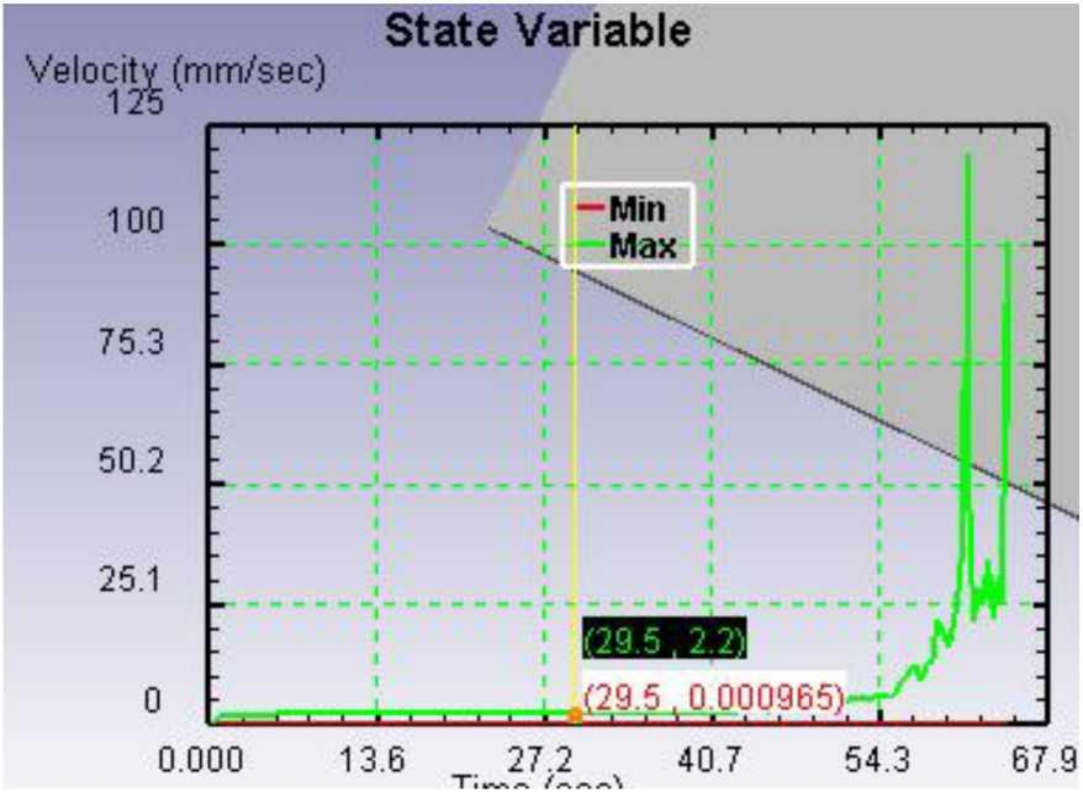


Рисунок 3.22 - Діаграма зміни площі поверхні

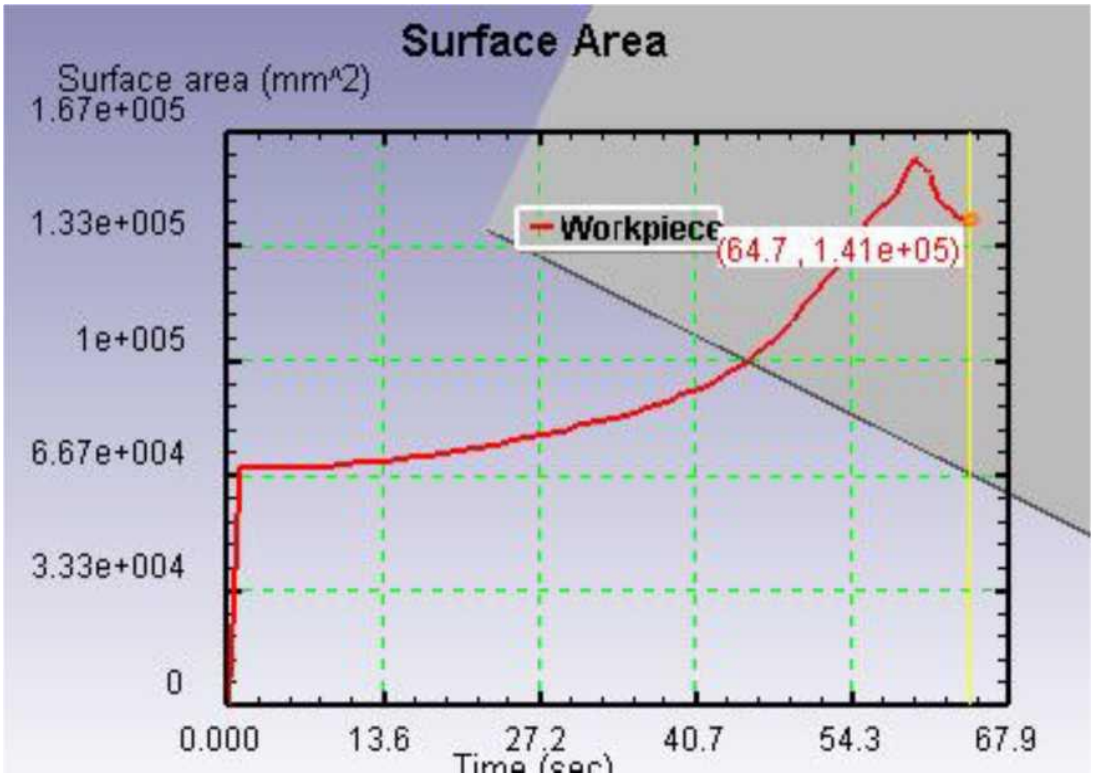


Рисунок 3.23 - Діаграма швидкості

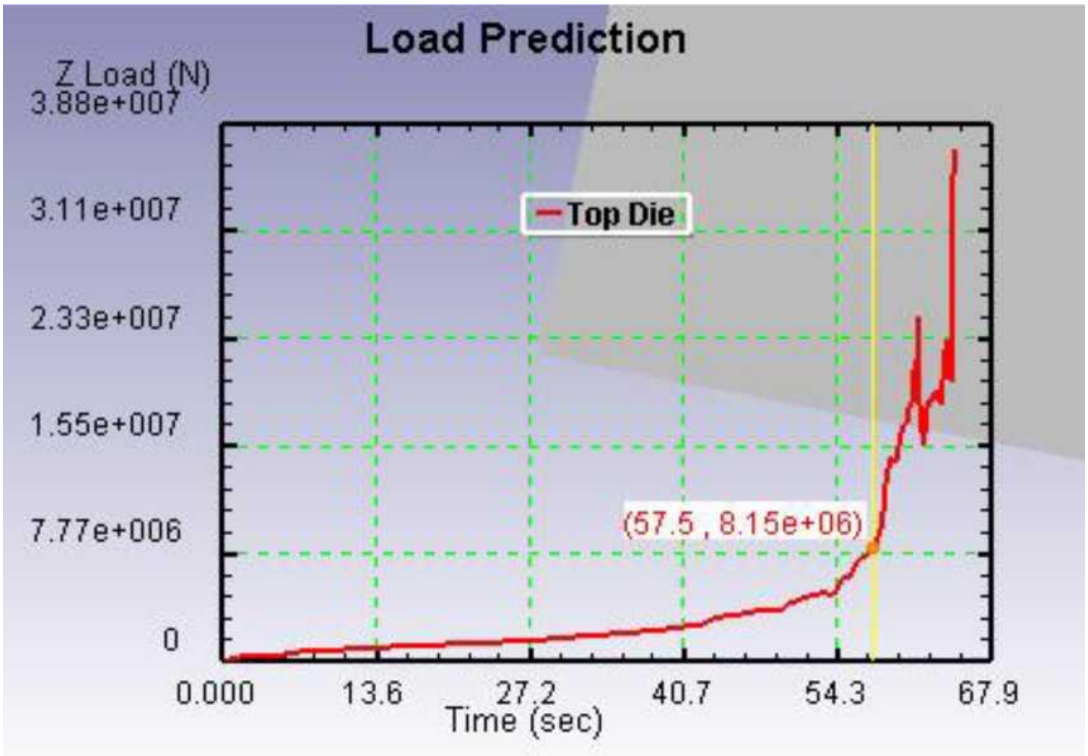


Рисунок 3.24 - Діаграма тиску на інструмент

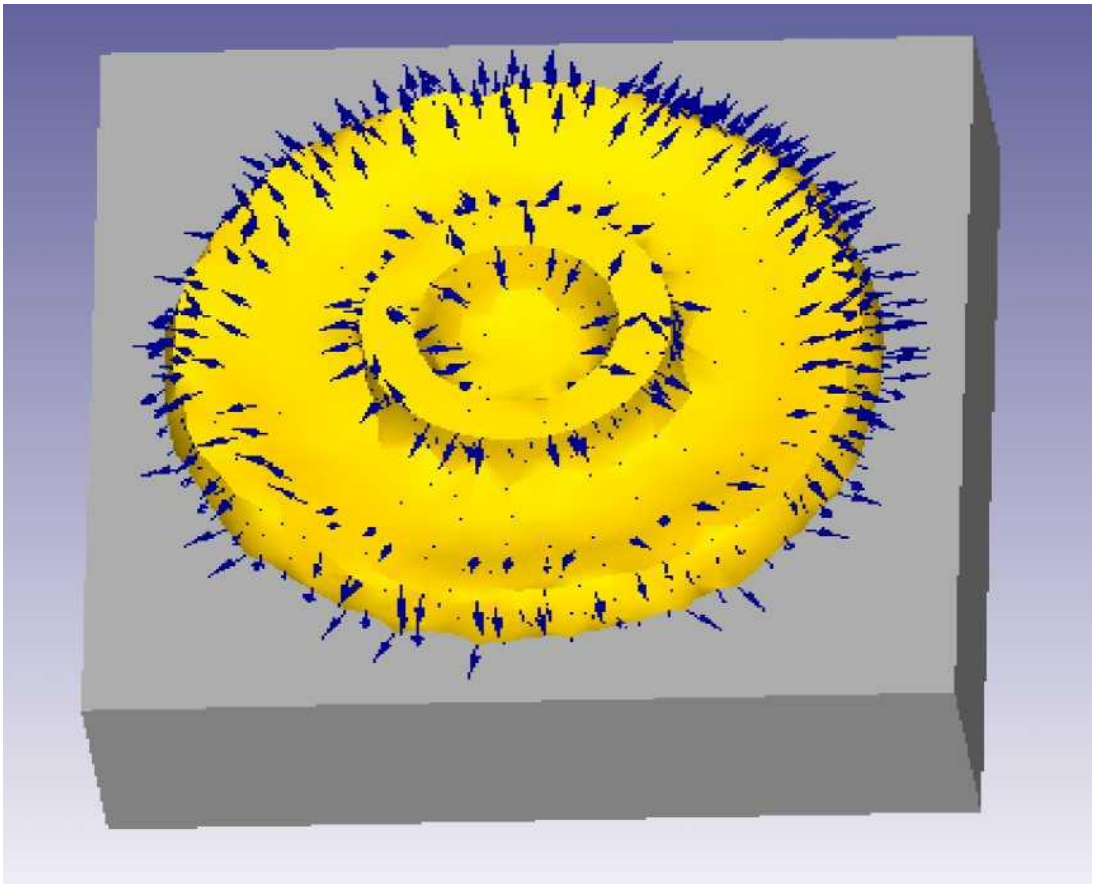


Рисунок 3.25 - Розподіл векторів швидкості деформації

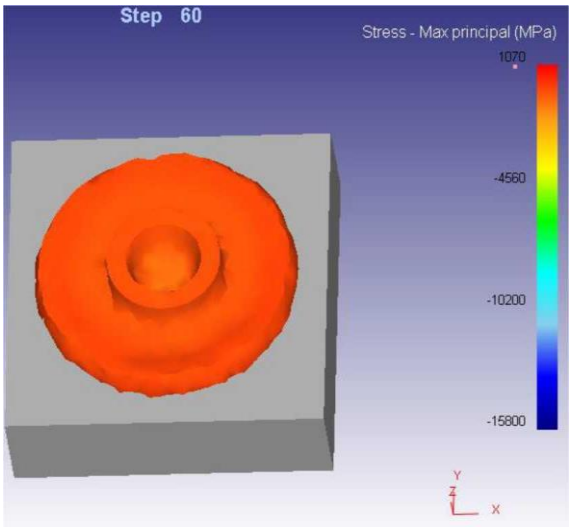


Рисунок 3.26 Розподіл максимальних напружень

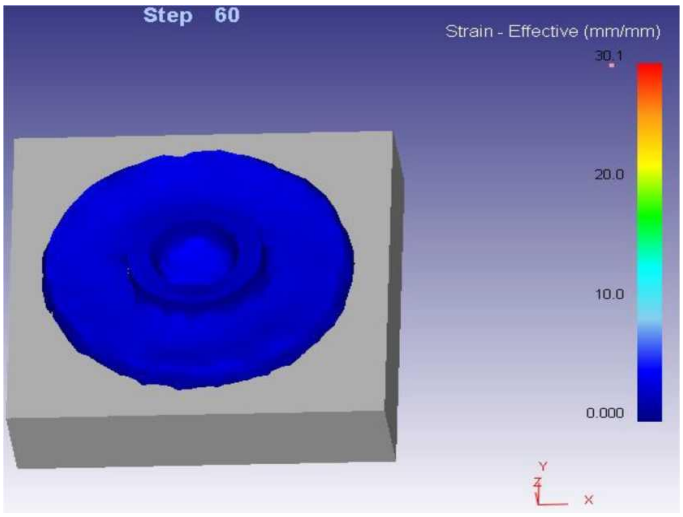
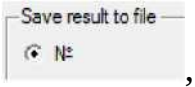
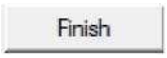


Рисунок 3.27 - Розподіл відносної деформації

3. В меню «настройка шагов»

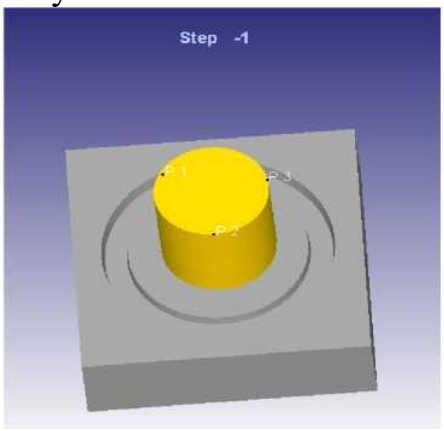
повертаємо заготовку в крок «-1» натискаємо кнопку «отслежевание точек» встановлюємо координати трьох точок. Далі натискаємо

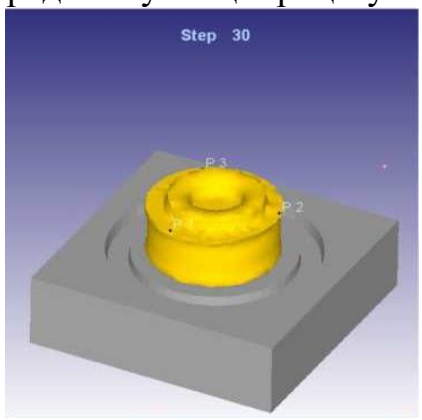
, 

, 

.

Фіксуємо положення точок на початку, у середині і у кінці процесу.





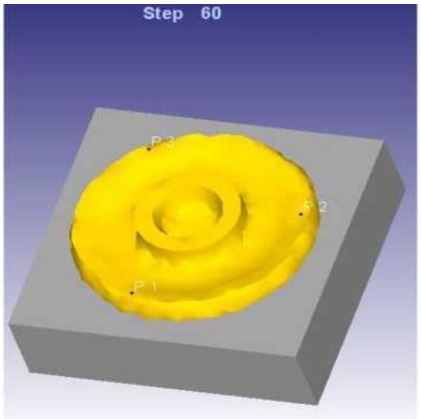


Рисунок 3.28 - Відстеження переміщення точок.

3 Натискаємо кнопку «Разрез» . Вибираємо розміщення площини розрізу натиснувши лівою кнопкою миші на 3D модель . Робимо висновок про заповненість порожнини штампу.

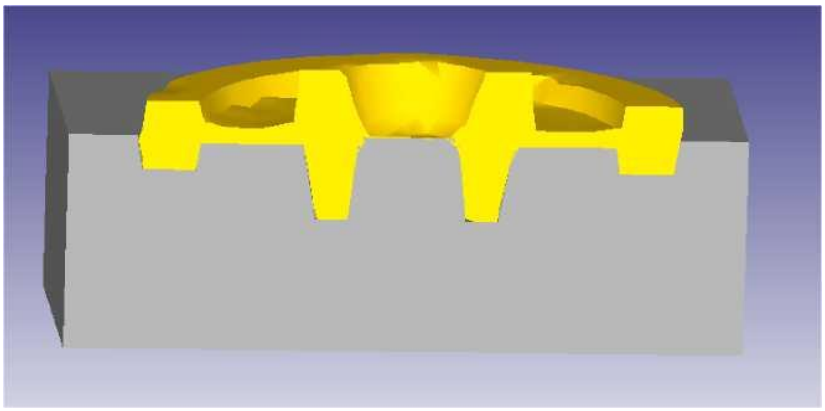
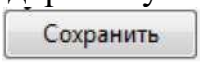


Рисунок 3.29 - Модель поковки та штампу в розрізі.

4. Збереження даних в формат .dat проводиться натисненням «Извлечь данные» . У відкритому вікні натискаємо

, вказуємо ім’я та адресу файлу , тиснемо 

. В результаті отримаємо наступний файл даних.

Deform

SIM1
Version No. : 6010
Release Date : Initial Simulation Date : 03/23/17 Current Simulation Date : 03/23/17

Process Condition

- Units : SI
- Step -1 ~ 10

Operation List

- **Operation:** 1
- Simulation mode : Изотермический
- Simulation No : 1
- No. of Object(s): 3
- Primary die(Object No.): 2

Step No.	Mesh No.	Stroke	Time	Load X	Load Y	Load Z	Speed X	Speed Y	Spee Z
-1	5	0	0	--	--	--	0	0	0
2	5	54.295	5.42949954478	10095	27329.2	482823	0	0	10
-3	6	54.295	5.42949954478	10095	27329.2	482823	0	0	10
5	6	139.81	13.9809943042	8544.24	25975.1	1.12086e+06	0	0	10
-6	7	139.81	13.9809943042	8544.24	25975.1	1.12086e+06	0	0	10
6	7	165.599	16.5598519825	25697.1	4741.82	1.57411e+06	0	0	10
-7	8	165.599	16.5598519825	25697.1	4741.82	1.57411e+06	0	0	10
8	8	196.602	19.6602442537	19472.5	32217.8	3.40979e+06	0	0	10
-9	9	196.602	19.6602442537	19472.5	32217.8	3.40979e+06	0	0	10

Рисунок 3.30. - Вміст файлу даних з результатами розрахунків

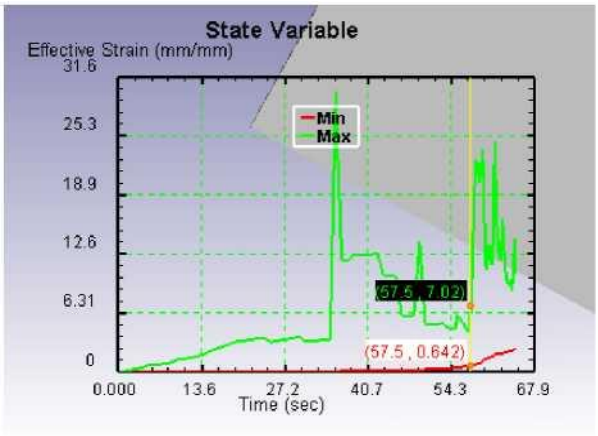


Рисунок 3.31. - Діаграма деформацій

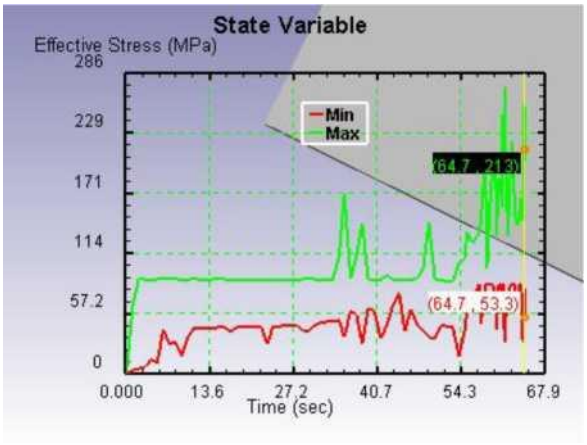


Рисунок 3.32. - Діаграма напружень

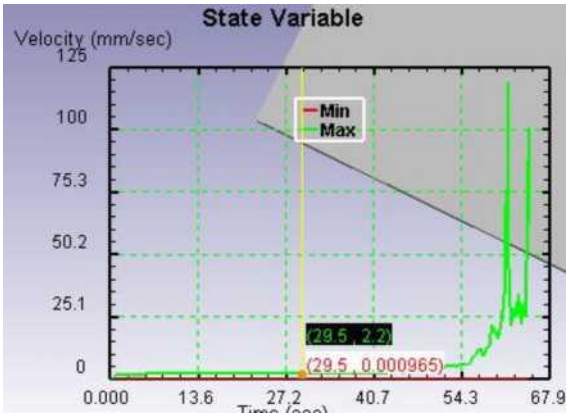


Рисунок 3.33. - Діаграма зміни площі поверхні

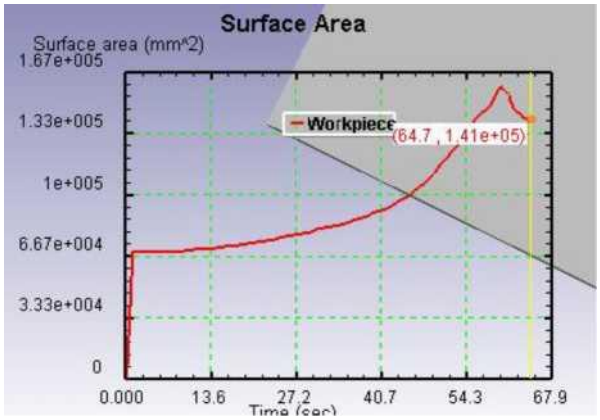


Рисунок 3.34. - Діаграма швидкості

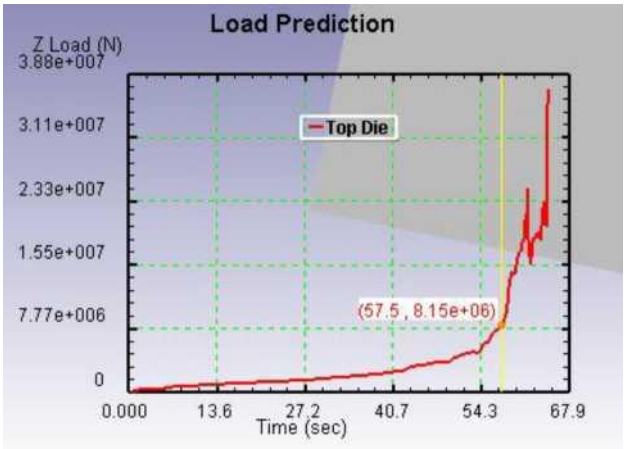


Рисунок 3.35. - Діаграма тиску на інструмент

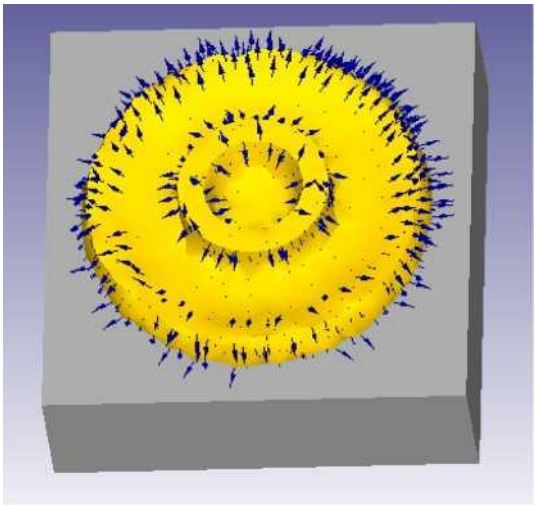


Рисунок 3.36. - Розподіл векторів швидкості

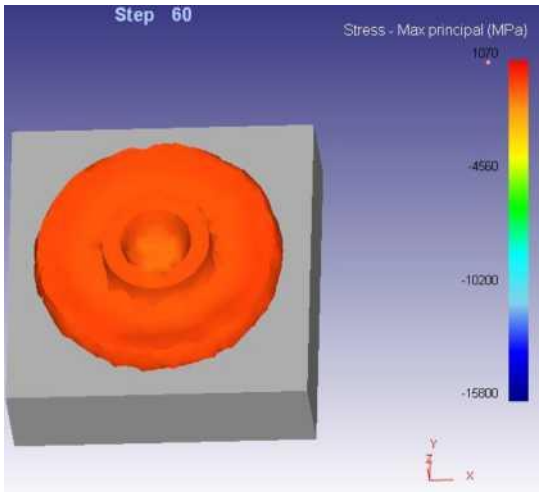


Рисунок 3.37. - Розподіл максимальних напружень

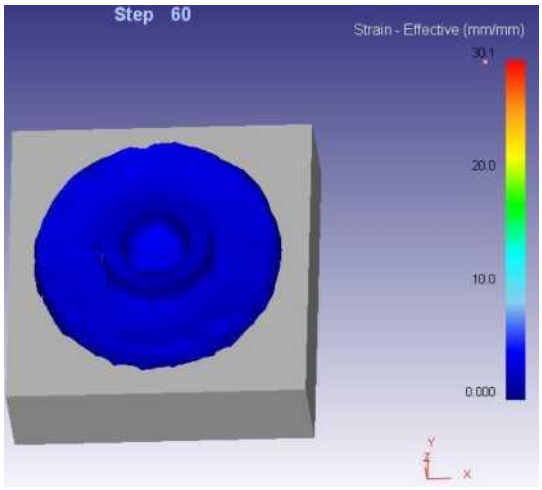


Рисунок 3.38. - Розподіл відносної деформації

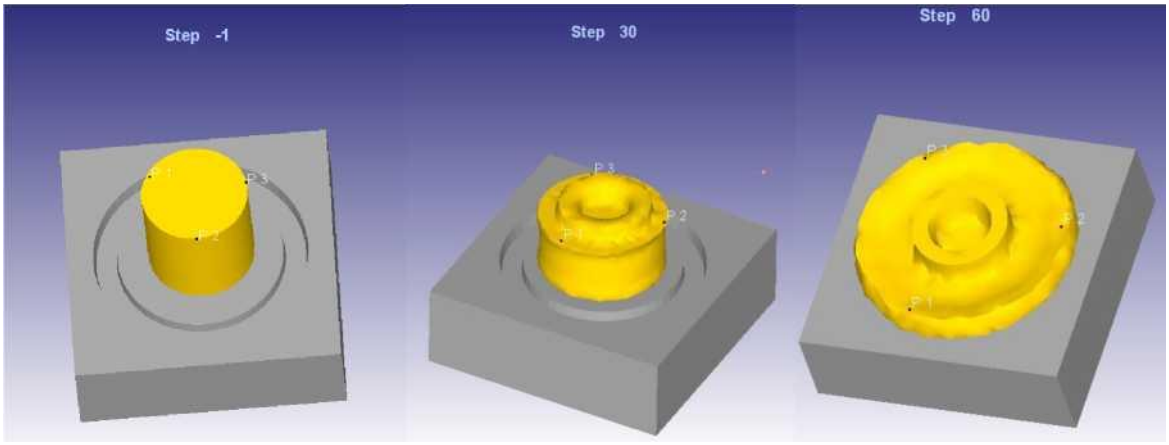


Рисунок 3.39 - Відстеження переміщення точок.

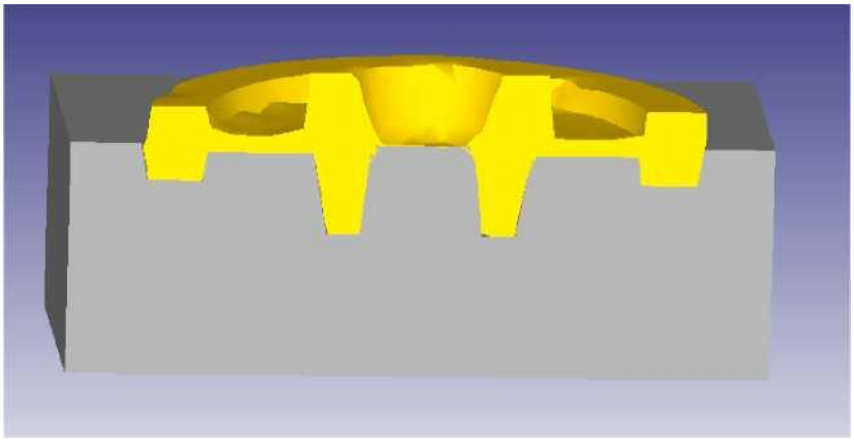
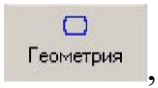


Рисунок 3.40 - Модель поковки та штампу в розрізі.

3.5. Створення математичної моделі позиціонування інструментів для пластичного деформування за допомогою Deform - 3D.

3.5.1. Створення математичної моделі позиціонування верхнього інструмента.

Виберіть **Object 2** у **Дереві об'єктів** і змініть **Найменування об'єкта** на **Top Die**. Для визначення геометрії верхнього інструмента натисніть кнопку 

, а потім

. Відкрийте файл із 3D моделлю інструмента. Геометрія верхнього інструмента повинна з'явитися у **Вікні екран**. Є правильним виконувати перевірку геометрії об'єкта після операції імпорту в Deform для того, щоб переконатися в тому, що геометрія не містить помилок. Для перевірки геометрії натисніть кнопку

. З'явиться вікно **Перевірка Геометрії**, у якому відображається статистика геометрії об'єкта. Для об'єкта, що має закритий об’єм, повинна бути 1 поверхня, 0 вільних граней, і 0 неправильних елементів (як показано нижче).

Імпортований об'єкт не містить вільних граней, але має 1 грань.

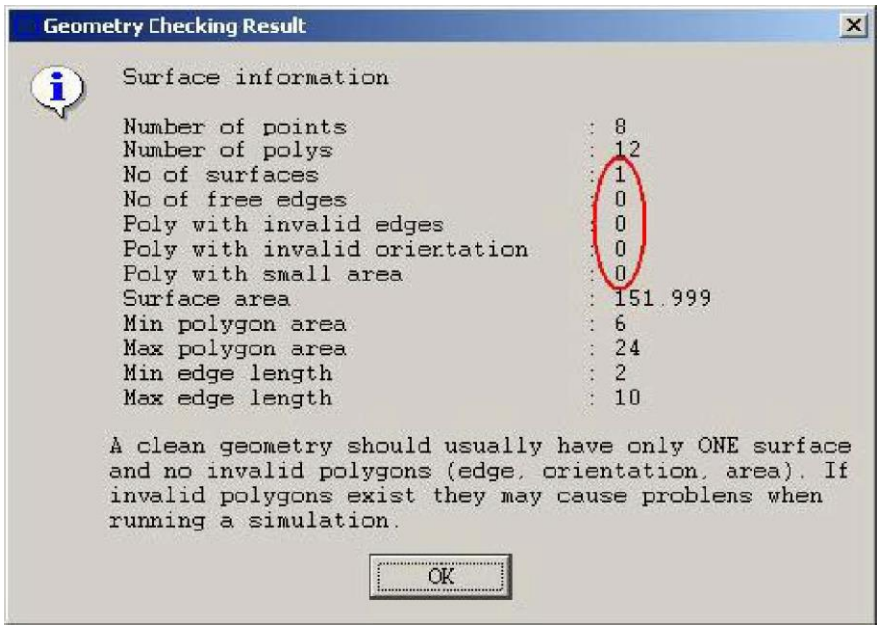


Рисунок 3.41. – Результат перевірки геометрії

У якості додаткової перевірки чи має імпортована геометрія помилки, також може бути перевірена орієнтація геометрії. Якщо геометрія являє собою закритий об’єм, коректна орієнтація повинна бути визначена так, щоб нормалі

до поверхні були спрямовані від об'єкта. Коли геометрія є не закритим об’ємом, а просто поверхнею, коректна орієнтація повинна бути визначена так, щоб нормалі до поверхні були спрямовані назустріч заготовці.

Натисніть кнопку

для перегляду нормалей до поверхонь, і якщо нормалі до поверхні спрямовані некоректно, натисніть кнопку

.

3.5.2. Нижній інструмент

Виберете Object 3 у **Дереві об'єктів**. Натисніть кнопку

і змініть **Найменування об'єкта** на **Bottom Die**. Імпортуйте геометрію натиснувши кнопку

і потім

. Геометрія перебуває у файлі **Block_Bottomdie.STL**. Використовуйте кнопки

для перевірки геометрії та

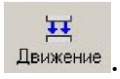
для правильності напрямку нормалей (нормалі повинні бути спрямовані від об'єкта).

Тепер усі три об'єкти повинні бути видні у вікні Екран.

3.5.3. Встановлення переміщення інструмента

Якщо який-небудь інструмент рухається, повинні бути визначені переміщення. У цьому розрахунках Верхній інструмент повинен бути переміщений униз для стиску блоку.

Натисніть на **Top Die** у **Дереві об'єктів**. Оскільки цей об'єкт переміщається, він повинен би призначений як **Головний Інструмент**. Для цього необхідно поставити прапорець поруч із **Головний Інструмент** у розділі **Дані об'єкта**.

Для визначення переміщення натисніть кнопку 

. Інструмент буде переміщатися вниз із постійною швидкістю 1 дюйм/с. Тип переміщення повинен мати значення **Швидкість**. Установите в поле **Швидкість** постійне значення 1 in/sec. Для цих розрахунків установлено за замовчуванням

Напрямок - -Z є правильним.

Що таке хід?

Дані руху при Русі Об'єкта – міра того, як далеко поточний об'єкт перемістився з початку розрахунків. У більшості випадків (крім використання механічної моделі преса) величину ходу потрібно встановити в нуль на початку розрахунків, вона буде змінюватись автоматично протягом розрахунків. Будь-які функції, що визначені як функція ходу, відносяться до значення ходу Головного інструмента.

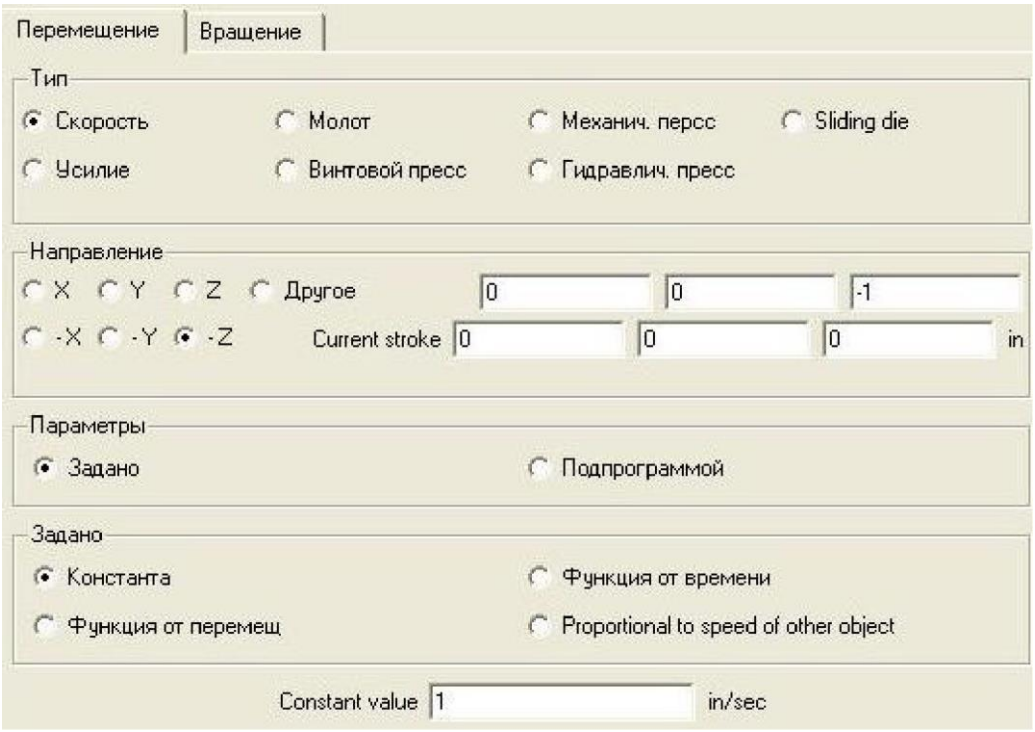


Рисунок 3.42 – Вікно задання параметрів робочого ходу

3.5.4. Задання початкової температури об'єкта

Властивості матеріалів, такі як напруга плинності, визначаються як функція температури, таким чином, хоча в даному розрахунках температура заготовки не змінюється, вона повинна бути задана коректно. Коли об'єкти в перший раз додаються у **Дерево об'єктів**, їх температура за замовчуванням 68°F або 20°C, це залежить від використовуваної системи одиниць. Це відповідає штампуванню при кімнатній температурі, це можна перевірити за допомогою поля **Температура** в **Даних об'єкта**. Для цього розрахунків, 68°F -

коректна температура і не повинна бути змінена.

3.5.5. Задання властивостей матеріалу

При настроюванні розрахунків повинні бути визначені властивості матеріалів об'єктів. Заготовці призначений пластичний тип матеріалу, тому необхідно визначити напругу пластичного плину (flow stress). Додатково, якщо розрахунки не ізотермічний (температура змінюється в часі), також потрібні термічні властивості. Властивості матеріалів для інструментів не потрібні тому що вони мають тип **Твердий** (недеформуємий) (і розрахунок ізотермічний), і тому вони не зазнають ніякого навантаження.

Натисніть кнопку , з'явитися вікно **Матеріал**. Заготовка в цьому розрахунках повинна бути визначена як сталь AISI-1035. Для імпорту цього матеріалу натисніть кнопку

, і потім виберіть матеріал зі списку. Матеріали розділені на категорії, так категорія Сталь, будучи обрана, покаже всі наявні сталі. Так само, є два різні матеріали AISI-1035 - перший для холодного штампування, а другий для гарячого кування. Тому що цей розрахунки відбувається при кімнатній температурі, виберіть матеріал ’AISI-1035, COLD’.

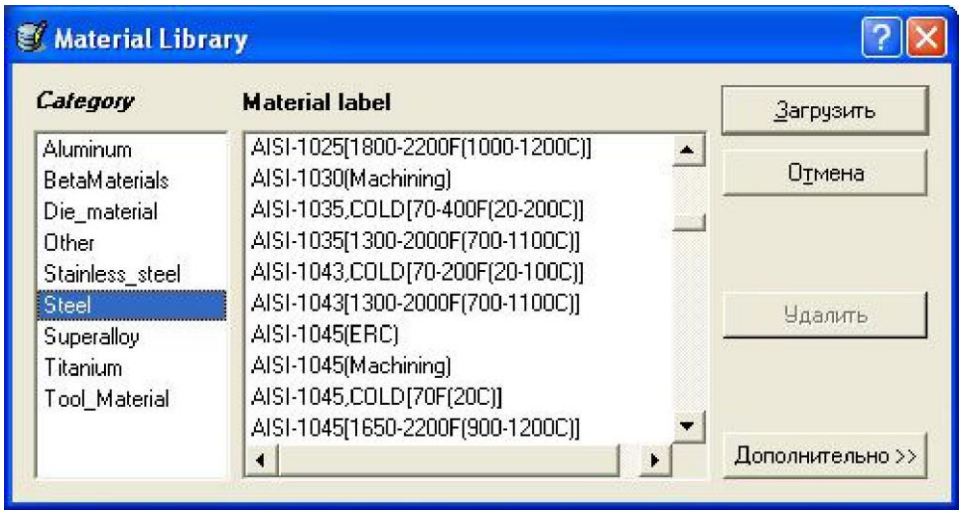
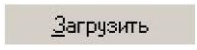


Рисунок 3.43. – Вікно вибору матеріалу.

Після вибору матеріалу в списку натисніть кнопку 

для імпорту матеріалу в завдання. Дані напруги пластичного плину можуть бути

переглянуті на графіку, за допомогою кнопки наступної за списком, що **випадає, Flow stress.** Після завершення перегляду даних матеріалу натисніть кнопку

.

У **Дереві об'єктів**, Ви можете побачити що ’AISI-1035, COLD’ доданий як матеріал для Блока.

3.5.6. Введення параметрів розрахунків

Натисніть кнопку , відкриється вікно **Настроювання завдання**. Натисніть

для перегляду настроювань тимчасових кроків. Переконаєтеся, що **Номер початкового кроку** встановлений як -1. Негативний знак показує, що цей крок записаний препроцесором (кроки розв'язку записані в базу даних у процесі розрахунків мають позитивний знак). Установите **Число кроків розрахунків** як 20. Крім передчасної зупинки розрахунків, розрахунки протривати 20 кроків. Установите **Через скільки кроків зберігати** як 2. Кожний другий крок розв'язку буде записаний у базу даних. Помітьте також, що Головний Інструмент також показаний у цім вікні. Ми спочатку встановили головний інструмент як **Верхній інструмент (Top Die)**, і він буде використовуватися для завдання настроювань останова й кроків.

Тепер повинен бути визначений відповідний розмір кроку розрахунків. Для більшості розрахунків розмір ходу інструмента повинен бути встановлений приблизно 1/3 від довжини грані типового елемента. Для визначення цієї величини може використовуватися інструмент **Вимірювання.**

Натисніть кнопку і виміряйте довжину будь-який грані елемента заготовки (Ви можете натиснути).

Довжина грані типового елемента приблизно 0.4". Одна третина від 0.4" приблизно 0.13". У секції **Завдання кроків розв'язку** встановите **З постійним Переміщенням Інструмента** як 0.13.

Натисніть кнопку

для виходу з вікна **Настроювання завдання**.

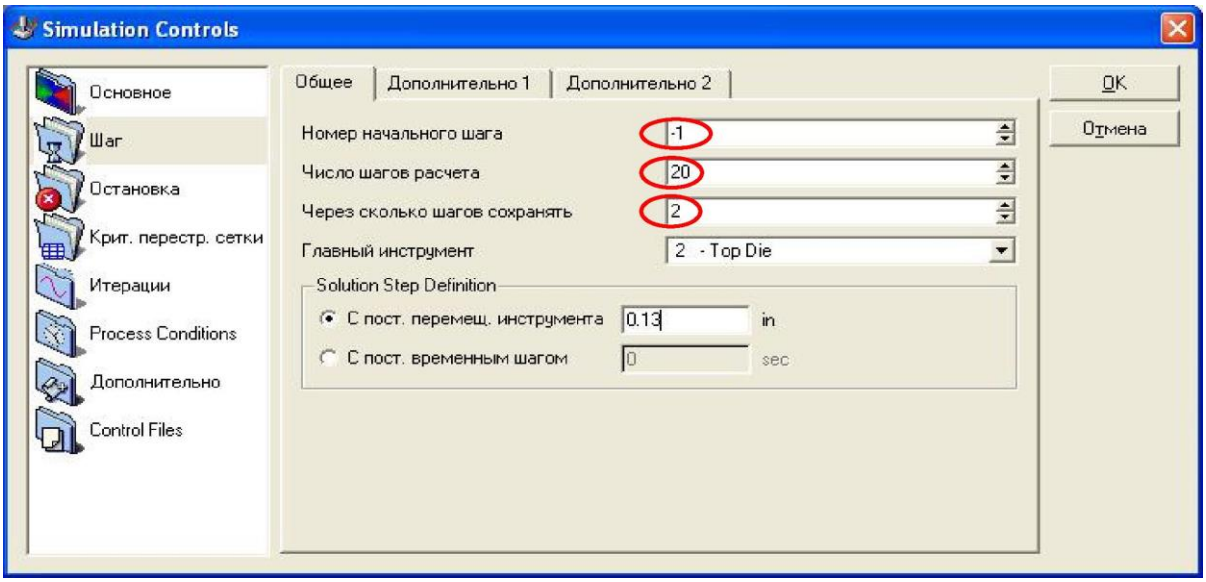
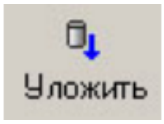


Рисунок 3.44 – Вікно налагоджування завдання

3.5.7. Позиціонування об'єктів

Відкрийте вікно **Позиціонування об'єктів** натиснувши кнопку . В Deform - 3D доступні різні методи позиціонування об'єктів:

Об'єкти можуть бути позиціоновані за допомогою миші, перетаскуванням їх по вікну Екран.



Об'єкти можуть бути опущені в зазначеному напрямку, їм дозволяється переміщатися й обертатися, поки вони не займуть положення рівноваги щодо інших об'єктів. Цей вид позиціонування дуже корисний коли початкове положення об'єкта неточно зазначене, наприклад положення заготовки в штампі.

Об'єкти можуть бути переміщені в заданому напрямку на задану відстань. Вектор переміщення задається початковою і кінцевою точками.

При позиціонуванні інтерференцією, об'єкти при позиціонуванні переміщаються так щоб вони незначно перетиналися з іншими об'єктами.

Об'єкти можуть бути повернені на заданий кут навколо будь-якої осі.

3.5.7.1. Позиціонування перетаскуванням миші

Натисніть кнопку

і виберіть у якості позиціонуємого об'єкта **Block**. У **Вікні Екран**, натисніть на стрілку +Z і перетягнете Блок нагору, так щоб він не стосувався нижнього інструмента. Зірочка, розміщена поруч зі стрілкою +Z показує що обране в даний момент. Змініть позиціонуємий об'єкт **Top Die** і використовуйте стрілку +Z для переміщення його нагору, так щоб він не контактував із Блоком, і потім використовуйте стрілку -Y для розміщення об'єкта так, як показано нижче.

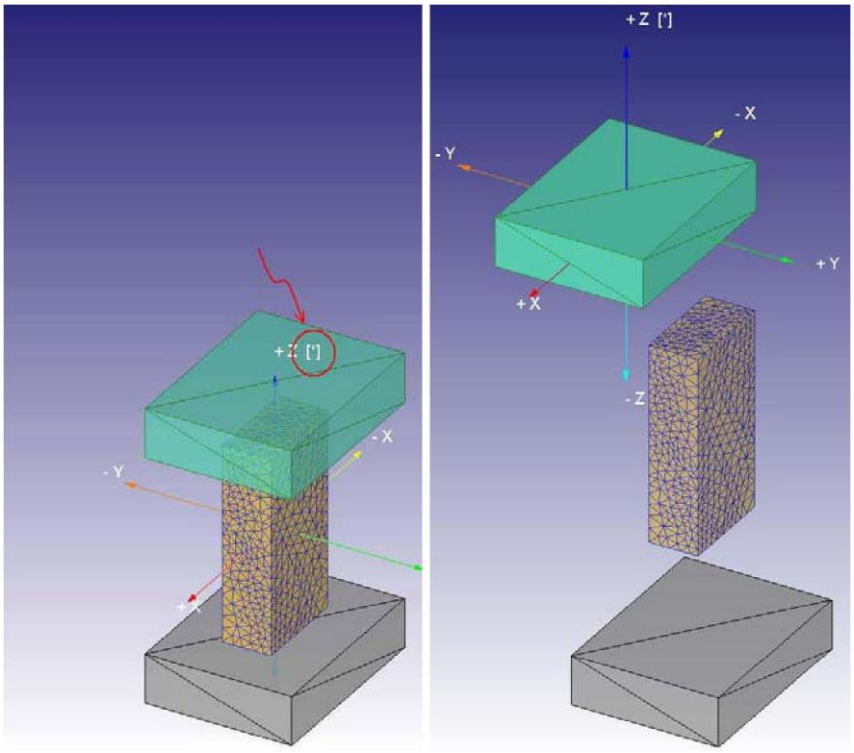
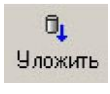


Рисунок 3.45 – Позиціонування елементів моделі за допомогою миші.

3.5.7.2. Позиціонування опусканням

Для прикладу позиціонування опусканням, давайте перемістимо блок на нижній інструмент. Натисніть кнопку 

і змініть позиціонований об'єкт на **Block**. Змініть напрямок на **-Z** і натисніть

для виконання опускання.

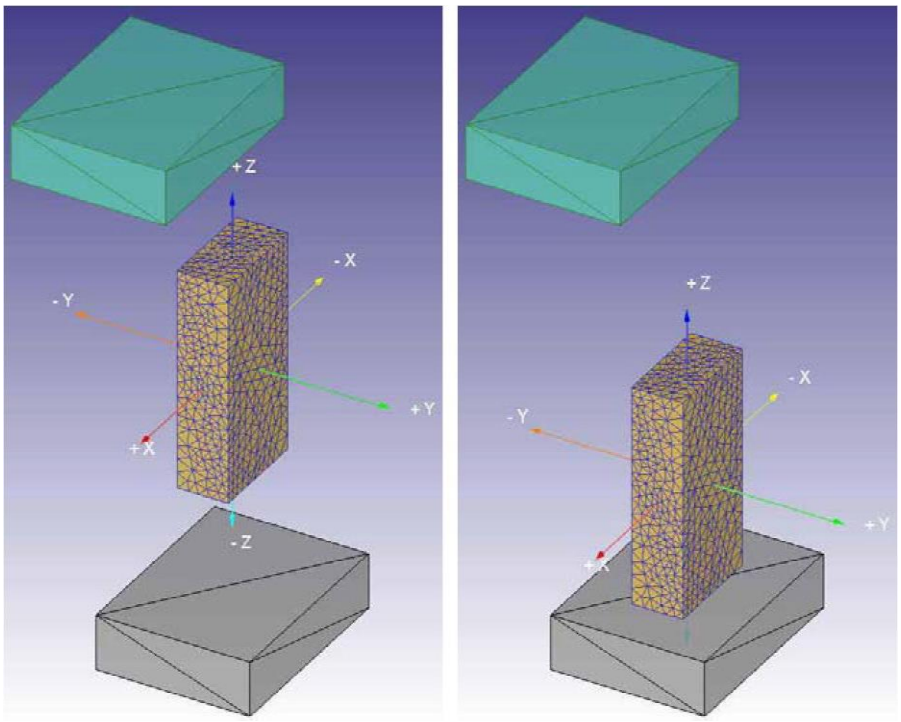
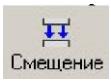


Рисунок 3.46 – Позиціонування елементів моделі опусканням.

3.5.7.3. Позиціонування зсувом

Як приклад позиціонування зсувом, давайте пересунемо Верхній Інструмент, так щоб він сів точно на верх Нижнього Інструмента. Натисніть кнопку 

і змініть позиціоновваний об'єкт на **Top Die**. Існує два методи позиціонування зсувом:

1) завдання вектору відстані
2) завдання початкової й кінцевої точок переміщення.

Обоє цих методи можуть використовувати мишу для вказівки параметрів переміщення.

Найпростіший спосіб позиціонування Верхнього Інструмента вгорі Нижнього Інструмента полягає у використанні опції **Дві Точки**. Виберіть цю опцію і укажіть початкову та кінцеву точки, як показано нижче. Натисніть кнопку

для початку переміщення.

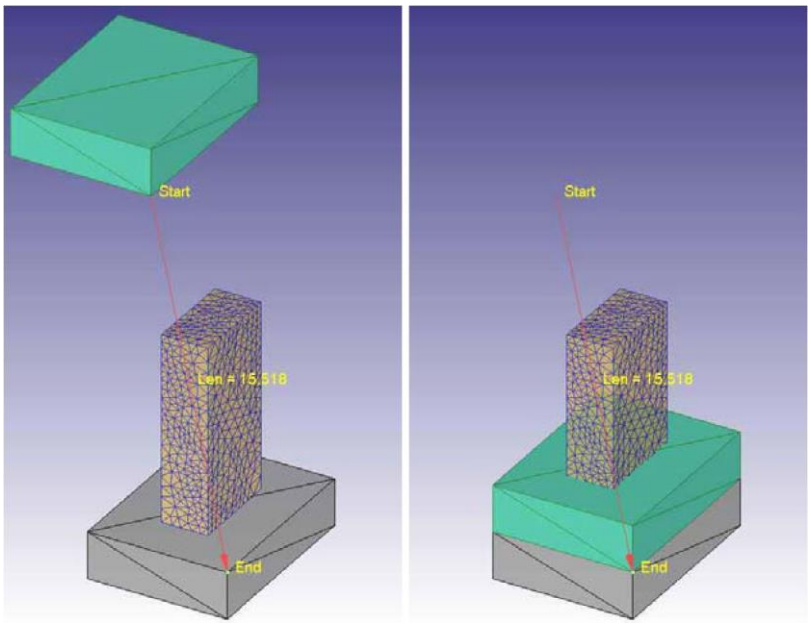


Рисунок 3.47 – Позиціонування елементів моделі зсувом.

3.5.7.4. Позиціонування інтерференцією

Давайте використовуємо позиціонування інтерференцією для переміщення Верхнього Інструмента назад у правильне положення вгорі Блока.

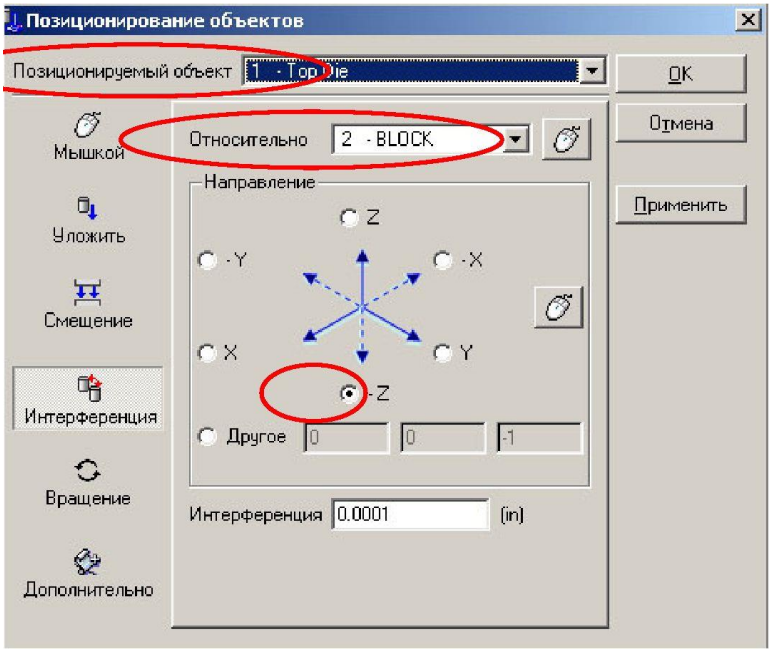


Рисунок 3.48. – Вікно позиціонування об’єктів

Натисніть кнопку Интерференция. У діалозі позиціонування, позиціонуємий об'єкт уже повинен бути **Top Die**. Змініть Призначення на **Block** якщо це не так. Тому що Верхній Інструмент повинен бути переміщений униз до контакту з верхньою частиною блоку, змініть Напрямок Наближення на **-Z**.

Натисніть кнопку Применить для позиціонування Верхнього Інструмента.

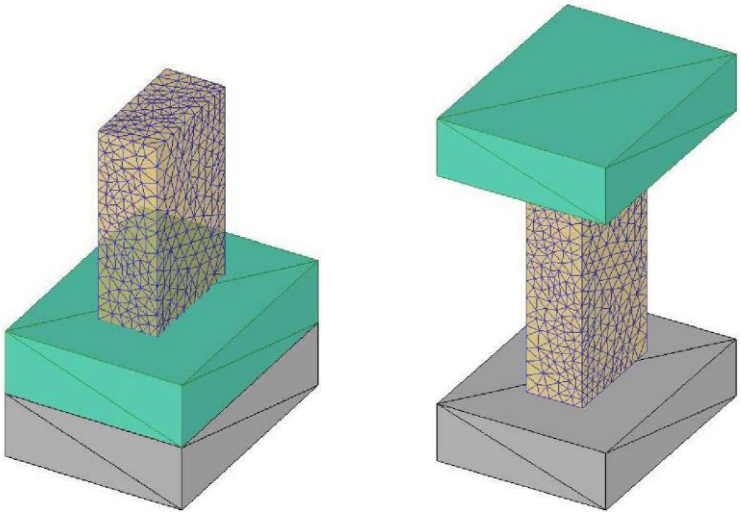


Рисунок 3.49. – Позиціонування об’єктів інтерференцією.

При використанні вікна Позиціонування Об'єктів кнопка Отмена може бути використана для повернення об'єктів у їхнє вихідне положення до входу в режим Позиціонування. Для завершення позиціонування та виходу з вікна Позиціонування Об'єктів натисніть кнопку OK.

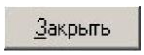
3.6. Задання відносин між об'єктами при створенні моделі.

Натисніть кнопку **Взаємодія Об'єктів** для визначення зв'язків між об'єктами. Тому що відносини ще не визначені, з'явиться спливаюче вікно, що запитує, чи прагнете щоб були створені відносини за замовчуванням. Натисніть Yes.

З'явитися вікно **Взаємодія Об'єктів** із двома певними зв'язками. Зв'язки в Deform визначаються у відношенні Головний - Підлеглий об'єкт. У цьому розрахунку, заготовка, що підлягає деформуванню, розміщена між двома твердими інструментами. Тверді інструменти визначаються як Головні об'єкти, а деформована заготовка як Підлеглий об'єкт.

Для кожного відношення може бути визначений ряд властивостей (коефіцієнт тертя і коефіцієнт теплопередачі). Тому що в цих розрахунках не враховується передача тепла, потрібно визначити тільки коефіцієнт тертя.

Виділіть перше відношення і натисніть кнопку

для редагування відносини. У розділі **екрана тертя** знаходиться випадаючий перебуває список, який містить кілька значень умов тертя, характерних для більшості процесів деформування. Так як розрахунок відбувається при кімнатній температурі, і інструменти сталеві, використовуйте пункт Холодне Деформування (сталеві інструменти) (**Cold forming (steel dies)**) із випадаючого списку. Автоматично буде обране значення коефіцієнта тертя рівне 0.12. Натисніть кнопку 

для повернення в головне вікно **Взаємодія Об'єктів**

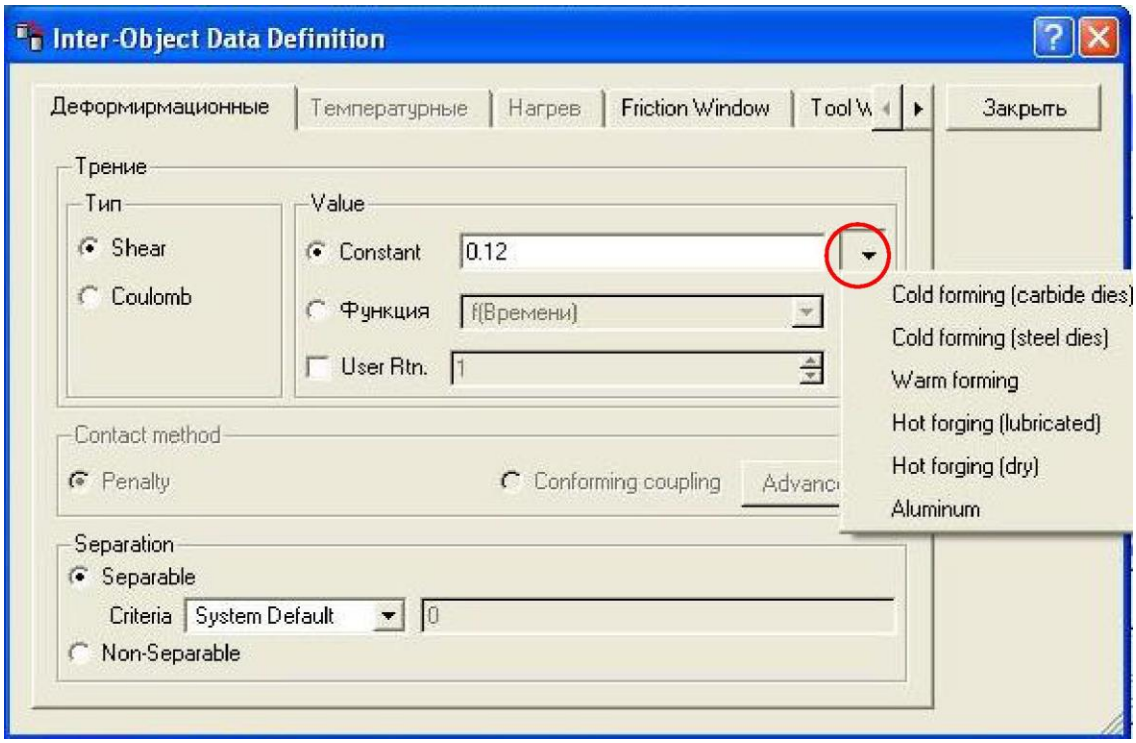


Рисунок 3.50 – Вікно визначення відношень об’єктів

Тепер відношення Верхній Інструмент (Top Die) - Блок (Block) визначене, необхідно визначити відношення між Нижнім Інструментом (Bottom Die) і Блоком (Block). Так умови тертя між заготовкою та обома інструментами однакові, кнопка

може бути використана для копіювання властивостей першого відношення в усі інші. Після цієї операції, обоє відносини будуть мати коефіцієнт тертя рівний 0.12.

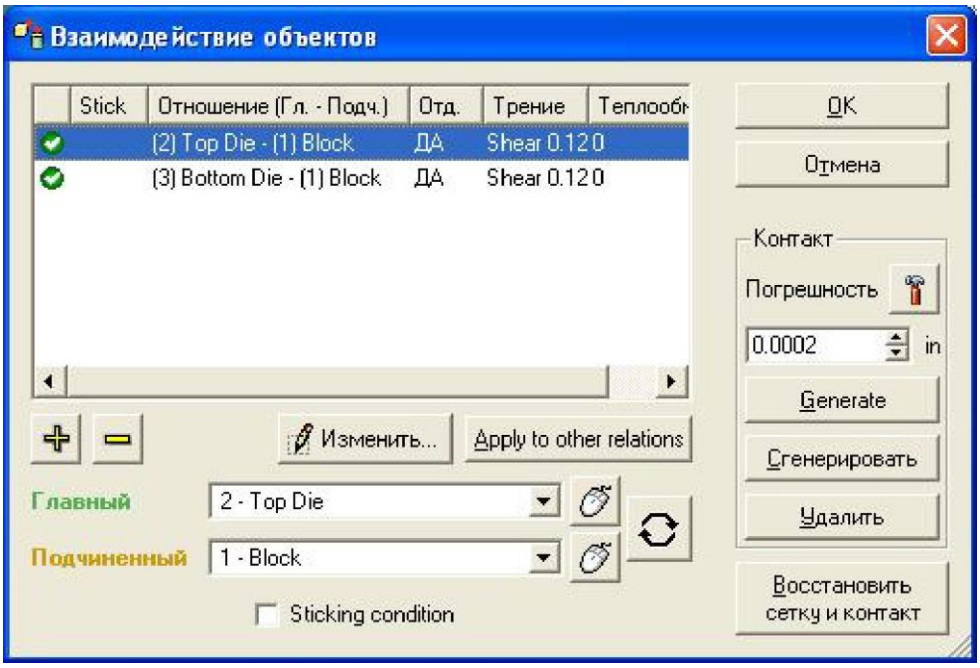
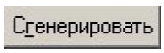


Рисунок 3.51 – Вікно визначення відношень об’єктів

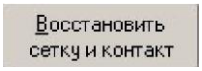
Після визначення відносин необхідно створити контактні поверхні між об'єктами.

Коли створюється контакт, будь-які вузли деформованого (Підлеглого) об'єкта, що попадають на інструмент (Головний об'єкт) з певною похибкою містяться на поверхні інструмента. Перед створенням контакту, нам необхідно визначити розумне значення точності. Велике значення точності може привести до того, що занадто багато вузлів потрапить у контакт із поверхнею інструмента, що може зруйнувати сітку заготовки. Маленьке значення точності може привести до того що деякі вузли не потраплять у контакт і контакт не буде створений. При натисканні на кнопку у розділі **Погрешность**, Deform визначить розумне значення точності.

Буде обчислене значення точності рівне 0.0112" і автоматично поміщене в програму.

Після того як значення точності встановлене, натисніть кнопку  для створення контактних поверхонь між об'єктами. Буде створений контакт між Блоком і обома інструментами, і цей контакт буде відображений у вікні Екран як кольорові точки на верхній і нижній поверхні Блока.

Якщо було використано занадто велике значення точності при створенні

контакту та сітка заготовки зруйнована, кнопка 

може скасувати створення контакту.

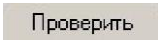
Після того, як контакт створений, натисніть кнопку

для закриття вікна **Взаємодія Об'єктів**.

3.7. Створення бази даних

Після завершення настроювання завдання останній крок - створення файлу бази даних. Ядро FEM (частина Deform яка відповідає за розрахунки) використовує файл бази даних для збереження кінцево-елементного розв'язку завдання. Коли Ви створюєте файл бази даних у препроцесорі Deform, усе інформація в препроцесорі (така як властивості матеріалів, керування переміщенням, геометрія об'єктів, тощо) переноситься у файл бази даних.

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Генерація бази даних**.

Натисніть кнопку 

щоб програма виконала перевірку правильності установок завдання. У ході процесу перевірки:

указує на дані, які повинні бути встановлені до запуску розрахунків (наприклад, коли Ви забуваєте вказувати властивості матеріалів).

указує на дані, які, як думає програма, є незвичайними або неправильними.

База даних може бути створена навіть при наявності декількох полів з S3, але користувач повинен переконатися в тому, що кожний з них не впливає на розрахунки.

У цих розрахунках, з'являється поруч із полем Компенсація Об’єму (Volume Compensation). Цей параметр на хід поточного розрахунків цей параметр впливу не виявляє. Натисніть кнопку

для створення бази даних. Коли програма закінчить запис бази даних натисніть кнопку

.

3.8. Розрахунки поковки та постпроцесор

3.8.1. Запуск розрахунків

Тепер Ви можете почати розрахунки натиснувши **СТАРТ** у списку Simulator.

Рисунок 3.51 – Перелік команд меню Симулятор

За ходом розрахунків можна спостерігати за допомогою файлу **Повідомлень**. Натисніть на закладку **Повідомлення** для перегляду **Файлу Повідомлень**. Як тільки обрана опція

(установлена за замовчуванням).

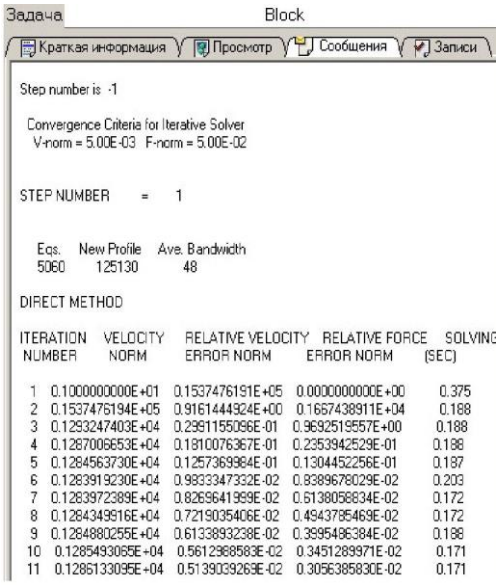


Рисунок 3.52 – Структура файлу повідомлень

Файл Повідомлень обновляється кожні кілька секунд.

Файл повідомлень подає інформацію про кожний крок розрахунків, а також про то, як добре йдуть розрахунки.

Як тільки розрахунки завершаться, в кінець **Файлу Повідомлень** буде додане повідомлення:

NORMAL STOP: The assigned steps have been completed.

3.8.2. Обробка результатів

Після того як розрахунки буде завершено, натисніть на DEFORM-3D Постпроцессор під Post Processor. Буде запушений постпроцесор DEFORM-3D

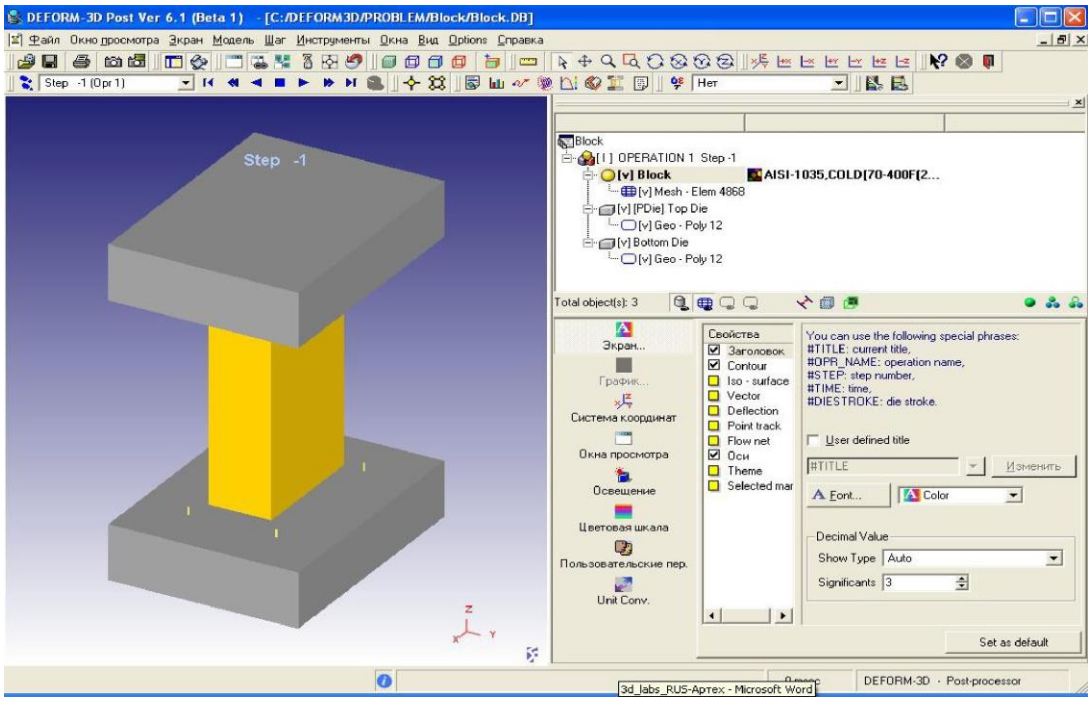


Рисунок 3.53 - Постпроцесор Deform - 3D.

3.8.3. Вибір кроку перегляду результатів математичного моделювання.

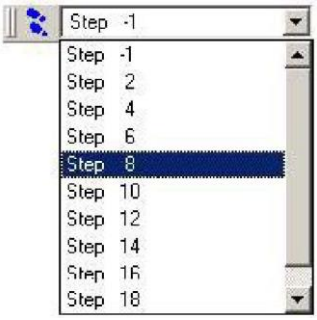


Рисунок 3.54. – Меню вибору кроку розрахунків

Для вибору кроку перегляду призначене випадаюче меню, розташоване у вгорі вікна.Кнопка *’ може бути використана для відкриття вікна **Список Кроків (STEP LIST)**, яке дозволяє користувачеві одержати доступ до більш докладних установок керування кроками. Наступні нижче кнопки також, дозволяють вибирати кроки розрахунків:

	Перший крок
	Один крок назад
	Відіграти назад
	Зупинити програвання
	Відіграти вперед

	Один крок уперед
	Останній крок

3.8.4. Змінні стану досліджуваного об’єкту.

Деякі з найбільше часто використовуваних змінних можуть бути переглянуті з використанням випадаючого меню Параметри у верху вікна.

Рисунок 3.55. – Вибір стану досліджуваного об’єкту.

Виберіть **Ефективні Деформації (Strain-Effective)** зі списку для перегляду накопичених заготовкою деформацій.

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Параметри**, і виберіть опцію **Масштабування (Scaling)**

. Ця опція використовує мінімальні та максимальні значення ефективних деформацій як екстремуми на кольоровому стовпчику. Пройдіть по кроках для перегляду накопиченої деформації.

Випадаючий список, «Параметри» показує тільки деякі змінні з тих, що можуть бути побудовані. Для доступу до всіх змінних використовуйте кнопку .

3.8.5. Спостереження за точкою

У Deform можливо спостерігати за точкою об'єкта протягом усього розрахунку. Можливо не тільки відслідковувати положення точки, але й спостерігати за змінами стану в цій точці. Для відкриття вікна **Відстеження точок** натисніть кнопку .

Ми прагнемо визначити кілька точок на недеформованій геометрії й подивитися де вони виявляться в процесі деформації.

Для перегляду недеформованої геометрії натисніть кнопку для перегляду першого кроку розрахунків. Тепер укажіть три точки на заготовці (як показано нижче) і натисніть кнопку

.

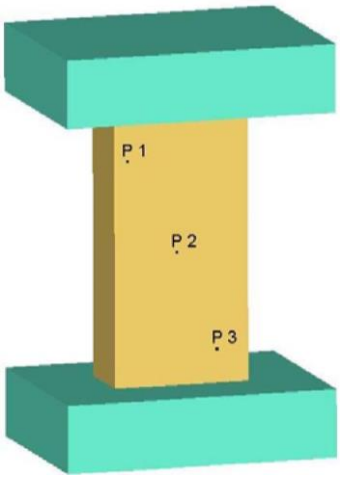
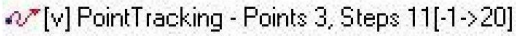


Рисунок 3.55. – Крок перший. Початковий стан системи

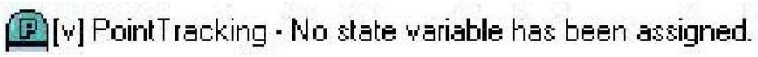
Застосуєте настроювання Спостереження **(Tracking Option)** за замовчуванням і натисніть

.

Якщо **ефективні деформації** були включені у **вікні Екран**, тоді переміщення точок буде показано на діаграмі **ефективні деформації в часі**, і в **дереві Об'єктів** буде додано:



Якщо під час спостереження за точками не було обрано відображення змінних стану в **Дереві Об'єктів** відобразитися наступне:



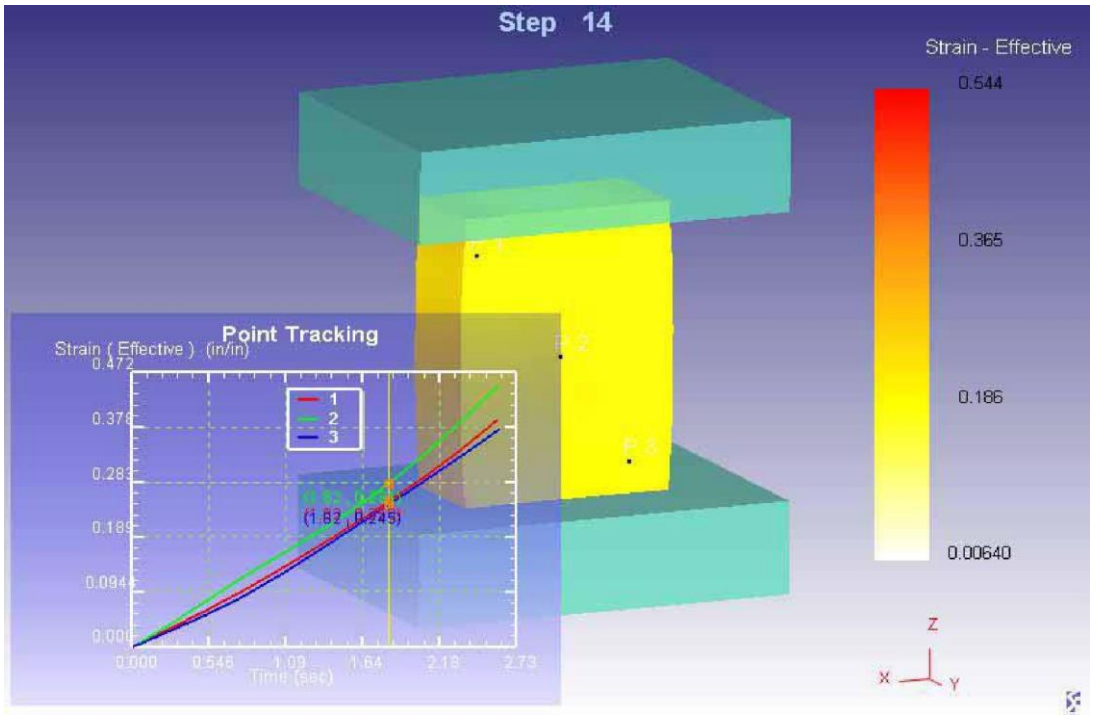


Рисунок 3.55. – Зміна стану обраних точок на протязі розрахунків.

Коли відбувається вибір зі списку, що випадає, змінних стану, **у вікні** Екран відображається графік спостереження для трьох обраних точок. Натисніть кнопку для переходу по кроках. Ви можете спостерігати як змінюється графік захоплення точок зі зміною кроку. Натисніть кнопку для зупинки відтворення. Тепер клацніть де-небудь на графіку **Спостереження За Точкою** - обраний крок буде показаний у **вікні Екран.**

3.8.6. Розрізи об'єктів

У Deform - 3D можливо розрізати об'єкти та переглядати різні змінні стани для цих об'єктів. Спочатку необхідно сховати графіки точок, що Відслідковуються, для цього необхідно клацнути правою кнопкою миші **по Point** Tracking **у Дереву** Об'єктів і вибрати **опцію Сховати спостереження за точкою (Hide Pointt racking).**

Рисунок 3.56. – Меню відображення відслідковування точок.

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Розріз**. Об'єкти можуть бути розрізано декількома різними способами. Об'єкти у **вікні Екран** має жовтий прямокутник навколо себе. Клацанням по вертикальному ребру коробки може бути створена горизонтальна площина розрізу. Клацанням по горизонтальному ребру коробки може бути створена вертикальна січна площина. Клацніть жовту коробку в довільному місці для експерименту з настроюваннями площин розрізу.

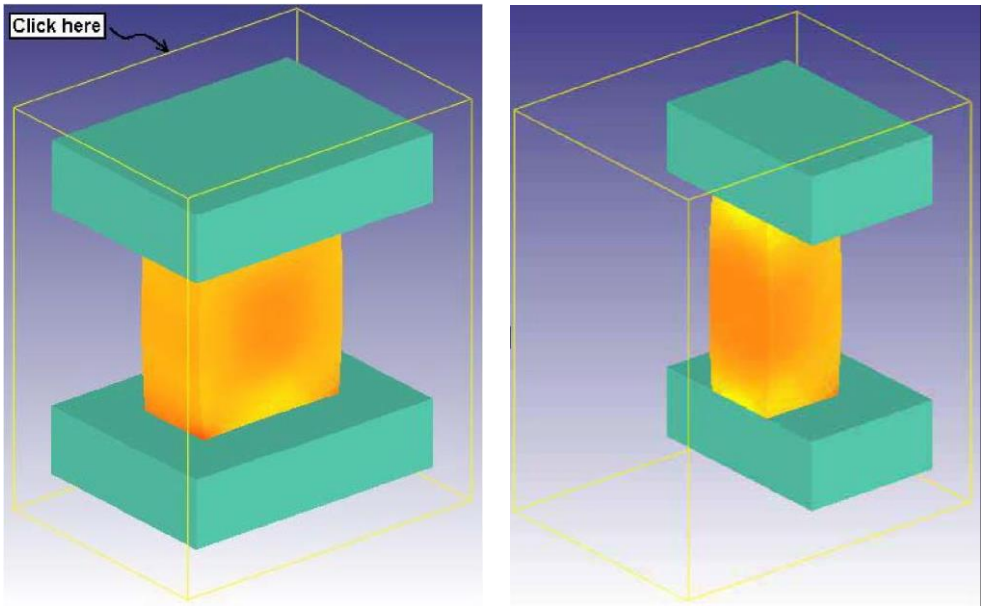


Рисунок 3.57. – Побудова розрізу моделі.

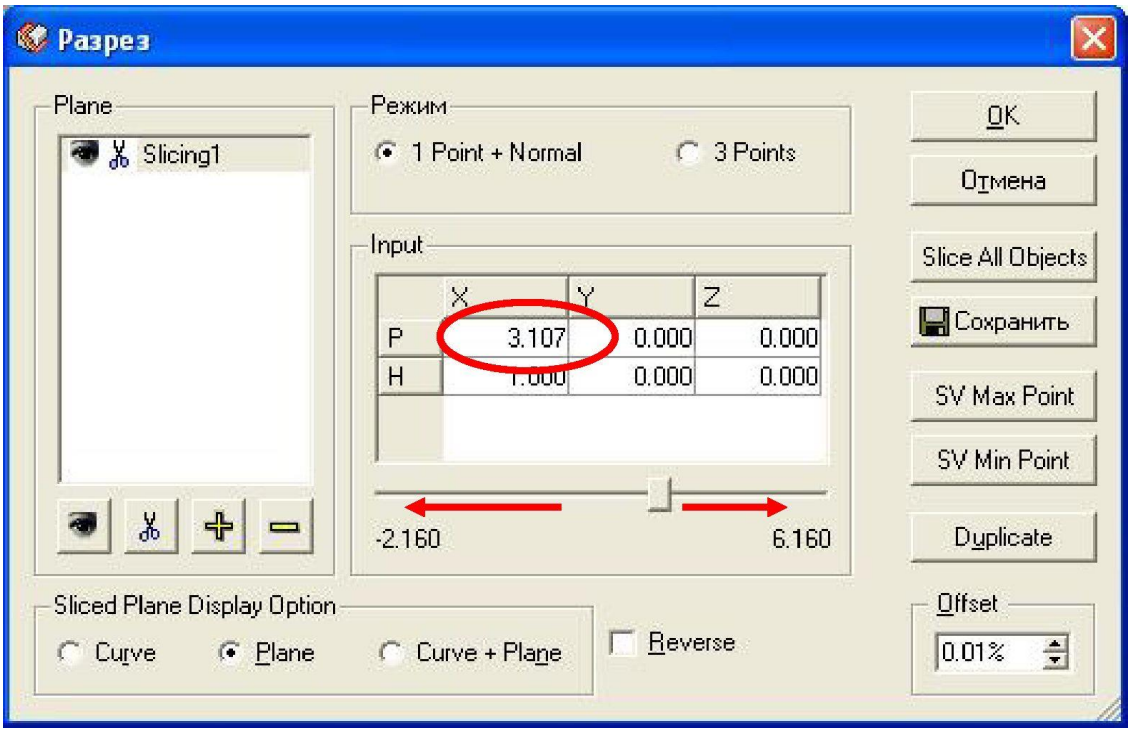


Рисунок 3.58. – Вікно керуванням розташуванням площини розрізу.

Площини розрізу визначаються точкою на площині й нормаллю до цієї площини. Вони визначаються у вікні **Розріз (SLICING)** як P (Point) – Точка та N (Normal) - Нормаль.

Об'єкти також можуть бути розрізані вибором X, Y, або Z координати точки й пересуванням повзунка збільшувати або зменшувати координату. Як

тільки координата змінюється, розріз так само динамічно змінюється. Клацніть X координату Точки, як показано нижче, і потім пересувайте повзунка для одержання розрізу об'єктів.

Для визначення виду розрізаних поверхонь доступні кілька варіантів.

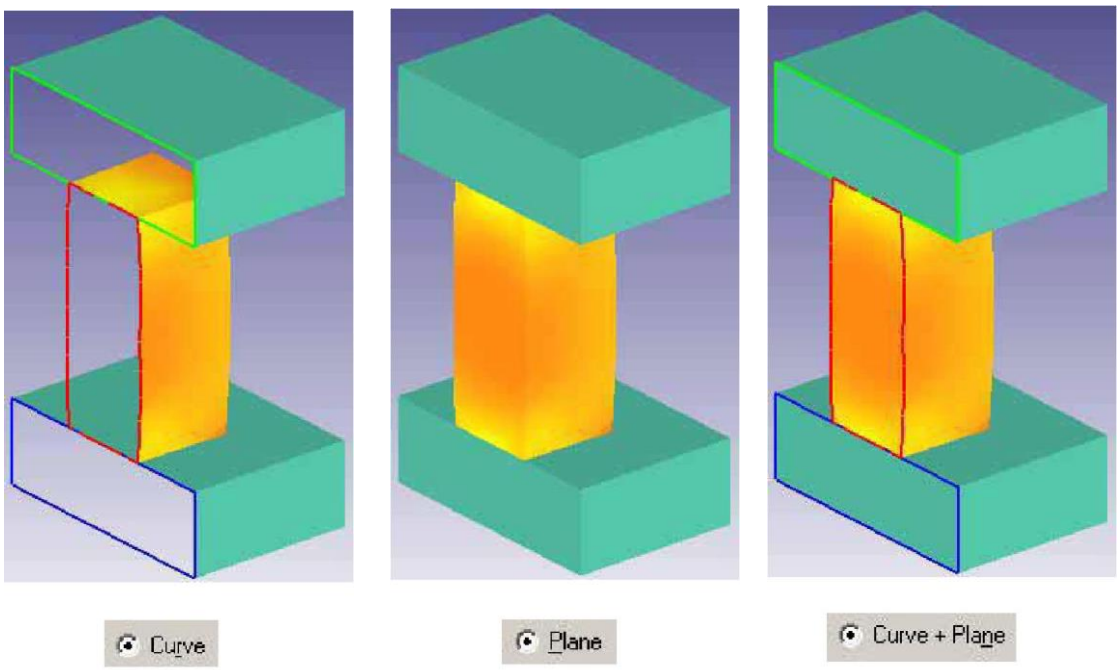
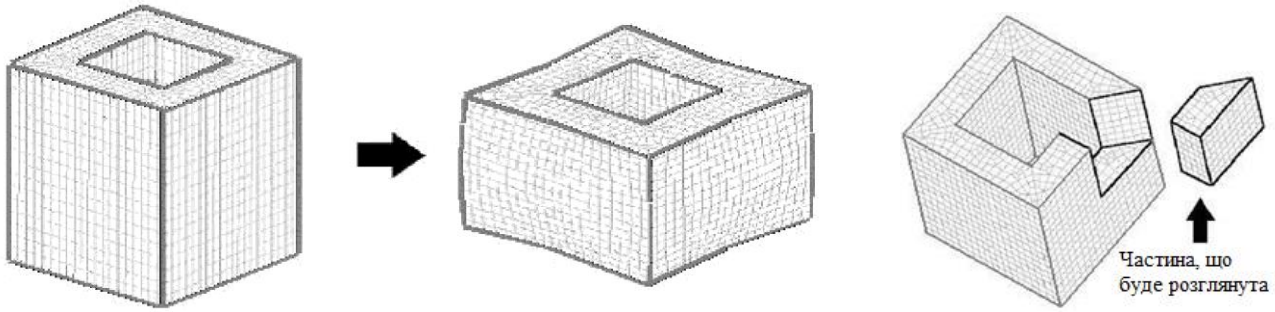


Рисунок 3.59. – Види розрізаних поверхонь

3.9. Розробка математичної моделі деталі «Квадратне кільце»

Даний розділ присвячено розробці математичної моделі осадження квадратного кільця.

З метою спрощення процесу моделювання, коли це можливо, в розрахунках повинна бути використана симетрія. Це заощаджує час розрахунків і може побільшати точність розв'язку. Крім того, повинна бути змодельована найменша секція, що адекватно описує проблему. Квадратне кільце має невелику симетричну частину.

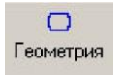


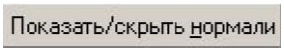
а) б) в)

Рисунок 3.60 – Ескіз деталі: а) ескіз заготовки; б) виріб;
г) об’єкт моделювання.

3.9.1. Створення нових об'єктів

Для моделювання осадки квадратного кільця необхідні тільки заготовка та верхній штамп. Нижній штамп не потрібний, як симетричний. Натисніть кнопку двічі для додавання Об'єктів 1 і 2. Виберіть **Object 1** у **Дереві Об'єктів**. Натисніть кнопку і змініть **назву об'єкта** на **Billet,** а **тип об'єкта** на **пластичний**. Визначите геометрію заготовки натиснувши, а потім . Геометрія перебуває у файлі **Squarering_Billet.STL**. Використовуйте кнопки і для перевірки геометрії.

Виберіть **Object 2** у **Дереві Об'єктів**. Натисніть кнопку і змініть ім'я об'єкта на **Top Die**. Натисніть кнопку  і імпортуйте файл **Squarering_Topdie.STL**.

Використовуйте кнопки і  для перевірки геометрії. Кнопка може бути використано для відображення обох об'єктів у вікні Екран.

3.9.2. Розбивка заготовки

Виберіть **Billet** у Показать/скрыть нормали, і натисніть кнопку Сетка для побудови сітки. Натисніть Просмотр для перегляду того, як виглядає сітка поверхні, при використанні установок по замовчанню. Так як сітка поверхні має гарний вигляд Сгенерировать, натисніть кнопку для завершення побудови сітки. Коли побудова буде завершена, об'єкт повинен мати приблизно 5000 елементів.

3.9.3. Завдання граничних умов

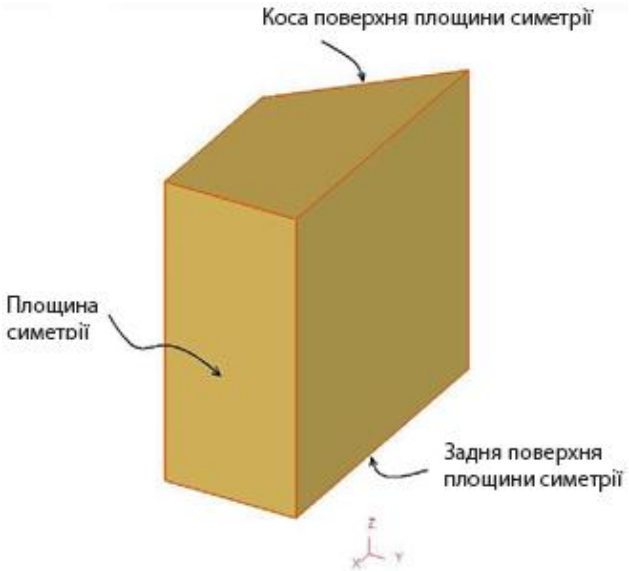


Рисунок 3.61 – 3D модель досліджуваного об’єкта

У цьому розрахунку використовується симетрія та моделюється тільки 1/16 квадратного кільця. Граничні умови повинні використовуватися на всіх площинах симетрії, щоб описати правильну деформацію.

Натисніть кнопку Bdry. Cnd. для перегляду налаштувань **Граничних Умов.**

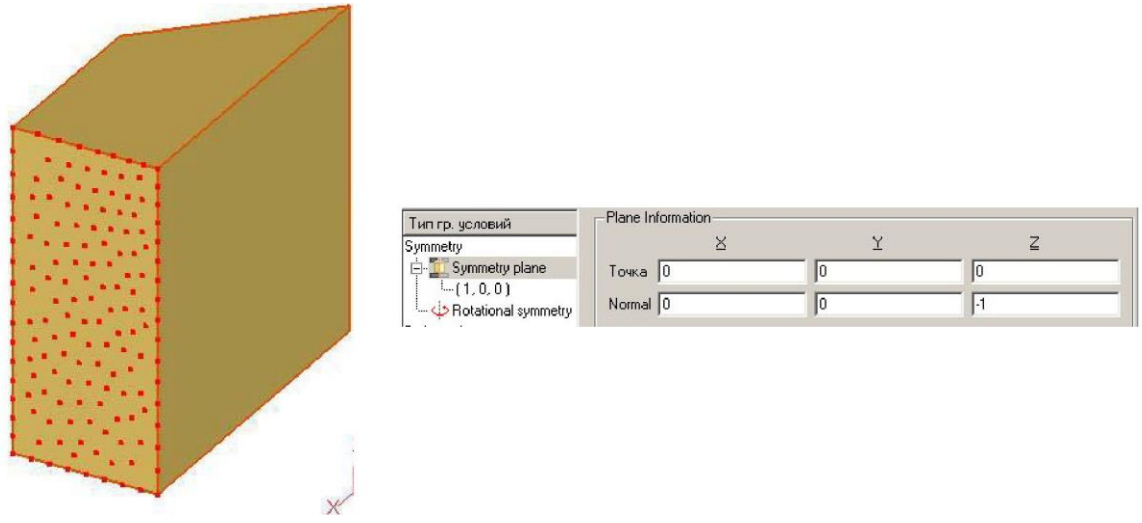


Рисунок 3.62 – Задання граничних умов на 3D моделі досліджуваного об’єкта

Оберіть опцію **Площина Симетрії (Symmetry plane)** і потім поверхню перпендикулярну осі X (як показано нижче). Вузли на цій поверхні стануть виділеними, і **інформація про площину (Plane Information)** відобразиться в розділі **Граничні Умови**.

Натисніть кнопку для додавання цієї граничної умови. Ця площина симетрії відобразиться в списку як (1,0,0) - нормаль до площини.

Додайте граничні умови для інших двох площин симетрії тим же способом.

Спочатку вибирайте площини, вузли яких видні, потім використовуйте кнопку для додавання її. Коли всі три площини симетрії додані, розділ **Граничні Умови** повинен виглядати так:

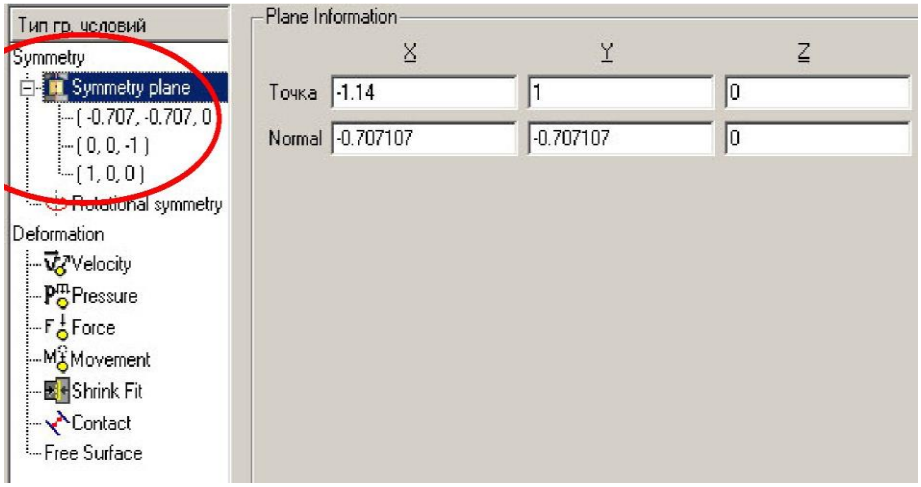
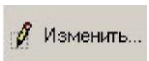


Рисунок 3.63 – Заповнений розділ граничних умов для усіх площин симетрії.

3.9.4. Відносини між об'єктами

Необхідно визначити відносини між **Заготовкою та Верхнім Штампом**. Натисніть кнопку 2. для відкриття вікна **Взаємодія Об'єктів.** Коли Вас запитають, чи прагнете Ви щоб були створені відносини за замовчуванням, натисніть

. Визначте тертя для відношення натиснувши кнопку 

. Використовуйте, список що випадає і оберіть **Холодне Деформування (Сталеві інструменти) (Cold forming (steeldies)).**

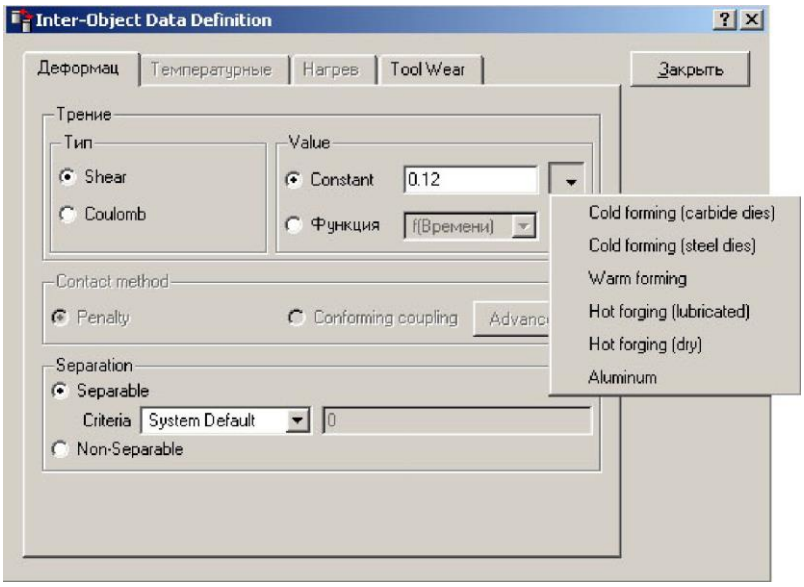


Рисунок 3.64. – Вибір виду обробки та умов проведення операції.

У вікні **Взаємодія об'єктів**, використовуйте кнопку для визначення необхідної похибки створення контакту (буде розраховане значення 0.002”), потім натисніть кнопку

для створення контакту.

Якщо Ви повернете об'єкти навколо, Ви побачите створений контакт між двома об'єктами.

Натисніть кнопку

для виходу з вікна **Взаємодія об'єктів**.

3.9.5. Завершення настроювань і запуск розрахунків

Для завершення настроювань завдання необхідно зробити наступне:

1) Виділити **Top Die** у **Дереві Об'єктів** і нажати кнопку

. Визначите швидкість як **1** дюйм/з у напрямку **-Z**.

2) Натисніть кнопку для визначення матеріалу заготовки. Натисніть

і виберіть матеріал ’ **AISI-1045,COLD**’ з категорії сталі.

3) Натисніть кнопку для відкриття вікна **Настроювання завдання**. Змініть **Назву операції** на **Square Ring**. Натисніть кнопку

і встановіть **Число кроків розрахунків** в **30** і **Через скільки кроків зберігати** в **2**. Встановіть **Головний Інструмент** як **Top Die**.

Для визначення належного розміру кроку, натисніть кнопку і виміряйте довжину грані декількох найменших елементів **Заготовки**. Середня довжина короткої грані елемента рівна приблизно 0.06”. Використовуйте **З постійним переміщенням інструмента** та встановіть розмір кроку **0.02** дюйм/крок, тобто приблизно 1/3 від величини найменшої грані елемента. Натисніть кнопку для закриття вікна **Настроювання завдання**.

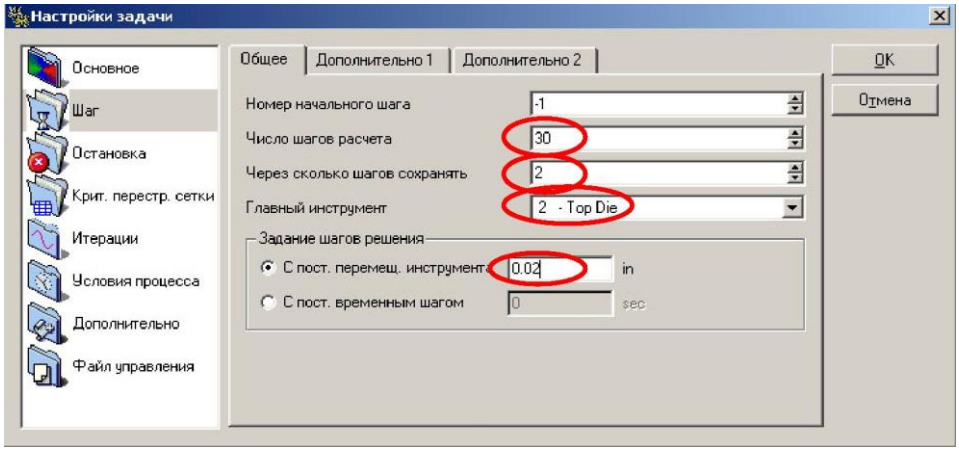


Рисунок 3.64. – Налагодження параметрів задачі

Збережіть ключовий файл завдання, натиснувши кнопку .

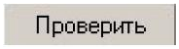
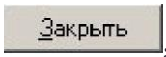
Натисніть кнопку для відкриття вікна **Генерація Бази Даних**. Натисніть  для перевірки завдання. Попередження U буде тільки для **Компенсації Об’єму (Volume Compensation)** - ігноруйте його. Створіть базу даних, натиснувши .

Рисунок 3.65 – Запуск симуляції

Після створення Бази Даних натисніть  , щоб закрити вікно **Генерація Бази Даних**, потім використовуйте для повернення в головне вікно. Запустіть розрахунки, натиснувши **СТАРТ** у списку **Simulator ■.**

Хід процесу розрахунків спостерігайте у **Файлі Повідомлень**, переконаєтеся, що опція обрана.

3.9.6. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз

Після завершення розрахунків для перегляду результатів натисніть DEFORM-3D Постпроцессор . У дійсності ця частина - повне кільце, так що було б корисно мати можливість подивитися його повністю в постпроцесорі. Для створення об'єкта 1/16 частина повинна бути відбита по площинах симетрії.

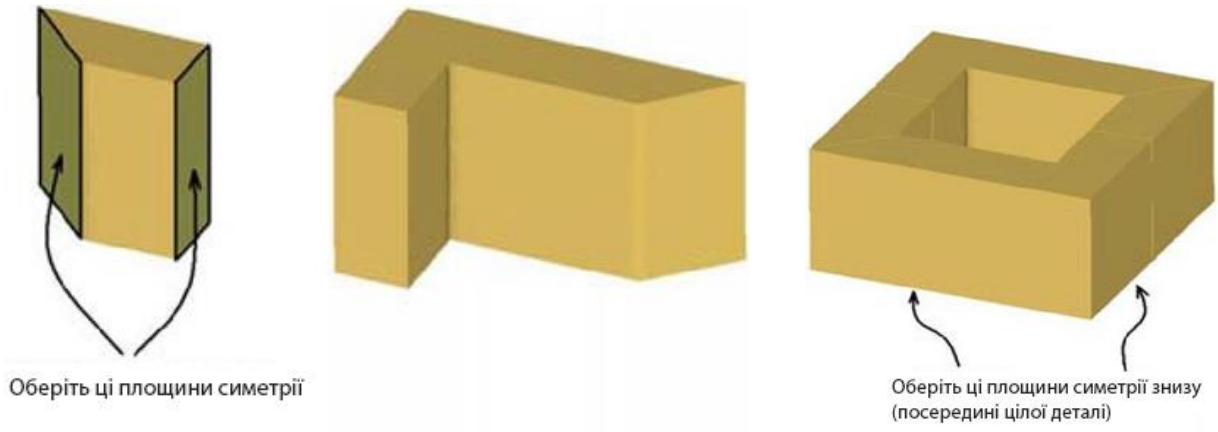


Рисунок 3.66 – Послідовність визначення симетрії.

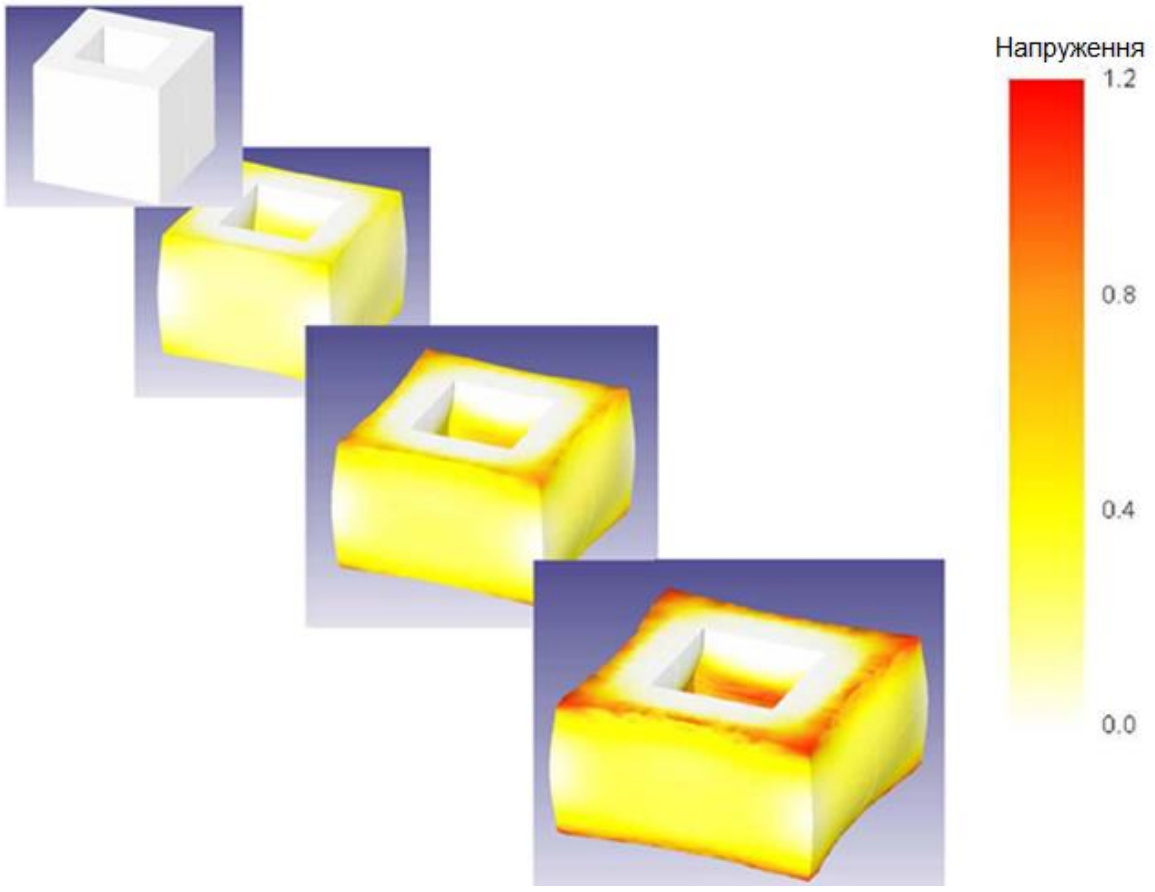


Рисунок 3.67. – Результати моделювання процесу осадження.

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Визначення Симетрії (SYMMETRY DEFINITION)**. Використовуючи мишу, клацайте по площинах симетрії заготовки. Щораз буде відображатися відбита частина заготовки. Повторюйте цей процес поки не буде видна все заготовка. Цей процес показаний нижче.

Як тільки повна частина показана у **вікні Екран**, закрийте **Визначення Симетрії (SYMMETRY DEFINITION)**. Переходьте по кроках, щоб спостерігати як деформується заготовка.

Як видно з отриманих результатів, представлених на рис. 3.67, при осадженні квадратної товстостінної трубки, максимальні напруження діють по кутам заготовки назовні.

3.10. Розробка математичної моделі гарячого кування (перенос від печі до інструмента)

У даному розділі розглянемо етапи та послідовність створення математичної моделі технологічного процесу гарячого кування. Враховуючи те, що процес відбувається при дії значних температур, розрахунок повинен ураховувати не тільки силову дію, але й передачу тепла. Увесь процес буде розділений на такі етапи:

- У цьому розділі моделюється 10 секундний перенос заготовки від печі до штампа. Це тільки розрахунки теплообміну.
- У розділі 3.11 моделюється 2 секундний період знаходження заготовки на нижньому штампі перед операцією кування. Це також завдання тільки теплообміну.
- У розділі 3.12 моделюється перший удар і два кувальні удари.
- У розділі 3.13 буде змінено інструмент і змодельовано секундний кувальний удар.

Так як заготовка та штамп є осесиметричні, процес може бути змодельований в 2D. Однак, щоб далі досліджувати симетрію та інші важливі

поняття 3D, процес буде змодельовано у 3D з використанням симетрії 1/4 частини заготовки та інструмента.

3.10.1. Встановлення параметрів розрахунків

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Настроювання завдання**. Змініть **Заголовок завдання** на **Spike Forging** і **Назва операції** на **Transfer from Furnace (перенос від печі)**. Переконаєтеся, що **Одиниці** встановлені як **English** і активована опція **Теплопередача**.

Загальний час переносу до штампа 10 секунд. Оскільки аналізується передача тепла, кроки необхідно визначати як функцію від часу, а не ходу штампа. Розділимо цю операцію на 50 кроків, таким чином кожний крок буде тривати 0.2 сек.

Натисніть

для перегляду **Керування Кроками**. Встановіть **Число кроків розрахунків** в **50.**

Через скільки кроків зберігати в **10**. Змініть **Завдання кроків розв'язку** на **постійним тимчасовим кроком** в 0.2 сек. Коли закінчите, натисніть кнопку

.

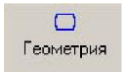
3.10.2. Додавання нових об'єктів

Для моделювання процесу кування необхідно визначити заготовку, верхній та нижній штамп. Для цих розрахунків ми імпортуємо всі три об'єкти, незважаючи на те, що для переносу від печі технічно потрібна тільки заготовка (це зроблене для того, щоб заощадити час у наступних роботах). Натисніть для додавання трьох об'єктів у **Дерево Об'єктів**.

3.10.3. Заготовка

Виберіть **Object 1** у Дереві Об'єктів, натисніть кнопку

і змініть

Назву об'єкта на **Billet, Тип Об'єкта** на **Пластичний**. Тому що на початку розрахунки заготовка дістається з печі, визначимо **температуру** як **2000°F**. Визначите геометрію заготовки натиснувши 

і потім

. Геометрія перебуває у файлі **Spike_Billet.STL**. Використовуйте кнопки

та

для перевірки геометрії.

3.10.4. Верхній штамп

Виберіть **Object 2** у **Дереві об'єктів**, змініть **Назву Об'єкта** на **Top Die.** Натисніть

і імпортуйте файл **Spike_Topdie1.STL**. Використовуйте кнопки

і

для перевірки геометрії.

3.10.5. Нижній штамп

Виберіть **Object 3** у **Дереві об'єктів**, зміните **Назву Об'єкта** на **Bottom Die**. Натисніть

і імпортуйте файл **Spike_Bottomdie.STL**. Використовуйте кнопки і

для перевірки геометрії.

3.10.6. Розбивка заготовки

У цьому розрахунку заготовка переноситься від печі до штампа. Так як заготовка єдиний об'єкт, який одержує або втрачає тепло, тільки він потребує сітки. Пізніше, у процесі знаходження гарячої заготовки на нижньому штампі й проведення кувальних операцій, інструмент також буде потребувати сітки, тому що він також буде брати участь у теплообміні. Штамп ми розіб'ємо в наступних розділах.

У Deform існує два способи визначення сітки - Відносна Сітка (Relativemesh) і Абсолютна Сітка (Absolute mesh).

Relative Mesh - Використовуючи відносні настроювання сітки,

користувач визначає кількість створюваних твердотільних елементів. Незалежно від того які зміни відбуваються з деталлю, число елементів залишиться постійним.

Absolute Mesh - Використовуючи абсолютні настроювання сітки, користувач визначає розмір елемента та система визначає необхідну кількість елементів. Зі збільшенням складності деталі, число елементів може так само збільшитись.

Відносна та абсолютна сітки використовують Вагові Фактори (Weighting Factors) як розподіляються більші та менші елементи в об'єкті. Значення за замовчуванням для Вагових Факторів показані нижче та добре працюють у більшості розрахунків.

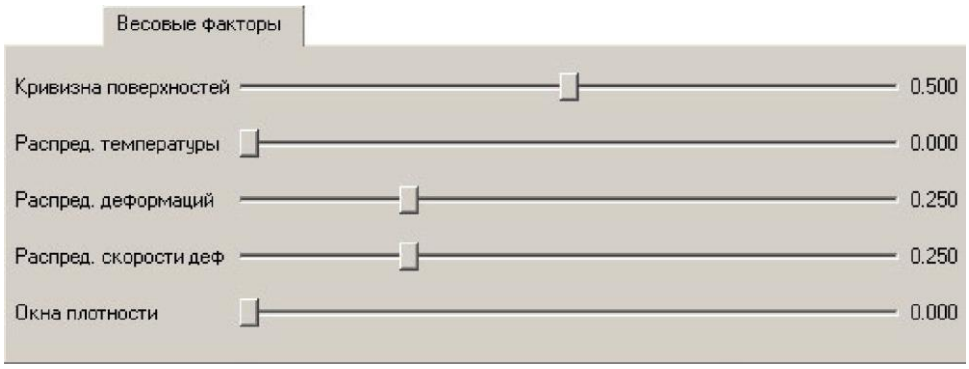


Рисунок 3.68 – Налагодження вагових факторів при настроюванні сітки

Відносна сітка - установка за замовчуванням - використовувалося при розбивці в попередніх розділах. Використання абсолютної сітки має тенденцію збільшувати точність моделювання, тому що заданий крок сітки є постійним в ході розрахунків. Зі збільшенням складності деталі, збільшується кількість елементів для кращого опису поверхні деталі. Абсолютна сітка буде використовуватися, при розбивці заготовки для цього ряду робіт. Щоб визначати сітку, використовуючи абсолютні установки, користувач повинен визначити мінімальний розмір елемента сітки. Цей найменший елемент звичайно визначається виміром найменшої частини на інструменті. Коли процес має кілька операцій, для визначення сітки повинен використовуватись найменший розмір інструмента в будь-якій операції, а не тільки в першій.

У цьому розрахунках, при формуванні, сама складна особливість - радіус у підставі Верхнього Інструмента, використовуваного в Ударі 2. Ви можете імпортувати цю геометрію як новий об'єкт і потім використовувати інструмент для виміру радіуса в підставі штампа. Це значення зразкове 0.08". Обтікання навколо цього радіуса мало б гарний розв'язок, якщо елементи заготовки були приблизно половиною цього розміру, або 0.04". Це повинне використовуватися як значення для найменшого елемента в заготовці. Вилучіть об'єкт Top Die 2 коли Ви закінчите вимірювання.

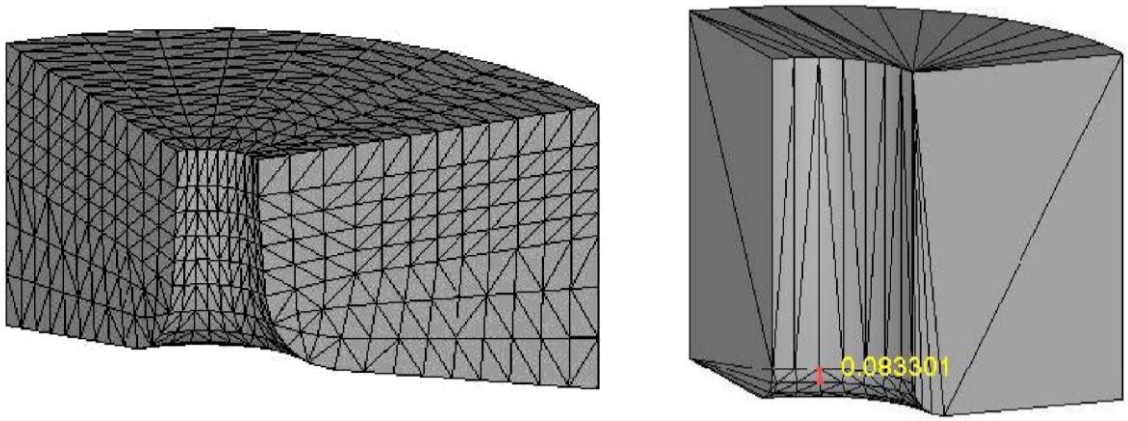


Рисунок 3.69 – Нанесення розрахункової гратки на верхню частину штампа.

Виберете **Billet** у **Дереві Об'єктів** і натисніть кнопку

. Натисніть вкладку **Настроювання**.

Зміните **Тип** на **Абсолютний** і встановите **Мінімальний розмір елемента** в **0.04.** Так само встановите **Коефіцієнт відносини** в **3.**

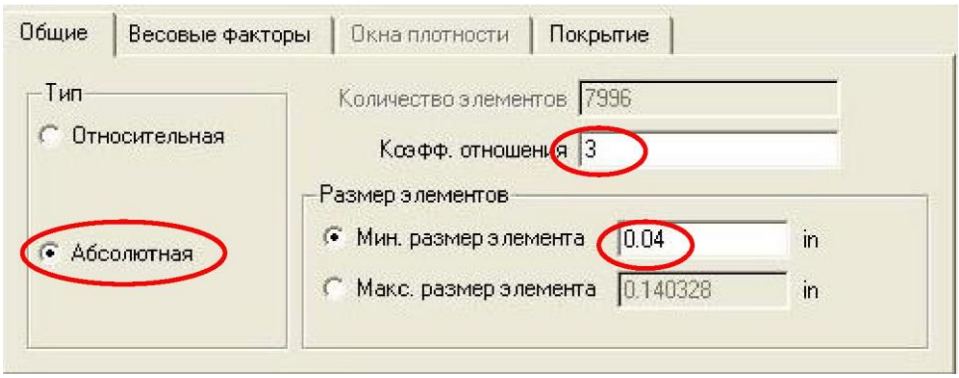


Рисунок 3.70 – Налагодження гратки відповідно до умов.

Після зміни цих настроювань, натисніть кнопку Поверхностная сетка. Створена тільки поверхнева сітка. Натисніть кнопку Объемная сетка.

3.10.7. Визначення граничних умов теплопередачі

Для початкової передачі від печі штампа, для заготовки необхідні тільки теплові граничні умови. Теплові граничні умови для штампа, і всі умови для границі деформації будуть додаватися в подальших лабораторних роботах, коли вони будуть необхідні.

Натисніть кнопку Bdry. Cnd. і виберіть граничну умову **Heat Exchange with Environment** (Теплообмін Із Середовищем). У вікні Екран заготовка буде показана виділеними по границях лініями. Температурна гранична умова повинна бути визначена для всіх поверхонь, що перебувають у контакті з навколишнім середовищем. Заготовка моделюється % частиною, і дві площини симетрії не перебувають у контакті з навколишнім середовищем.

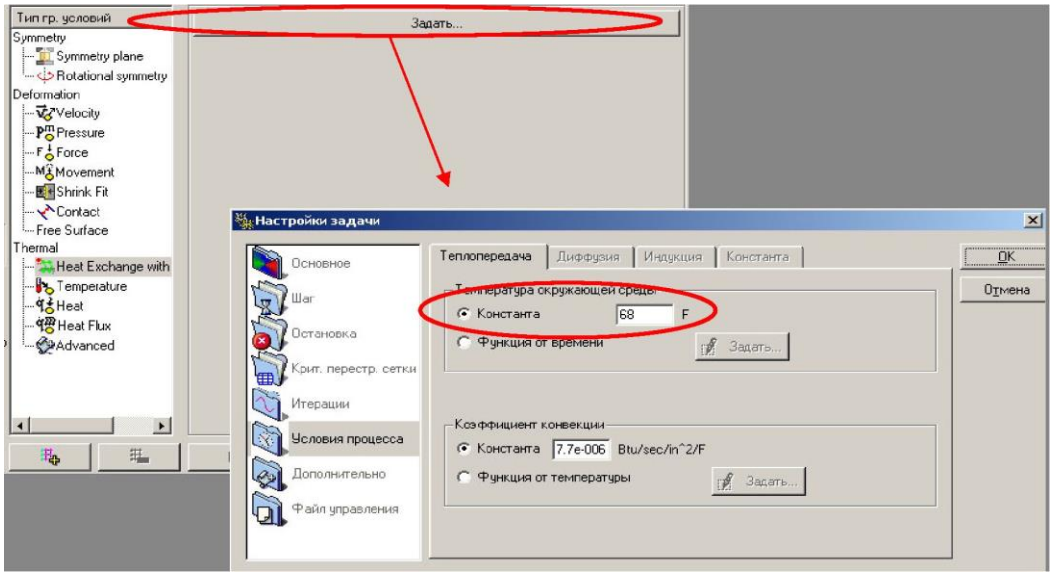


Рисунок 3.71 – Налагодження процесу теплообміну із оточуючим середовищем

При визначенні граничної умови **Heat Exchange with Environment** (Теплообмін із середовищем), Кнопка **Задати...** може бути використана для визначення **Температури Навколишнього Середовища**, використовуваної в цих розрахунках. У такий спосіб ми моделюємо перенос гарячої заготовки від печі до штампа в навколишньому середовищі, що має кімнатну температуру - **68°F**, це настроювання за замовчуванням.

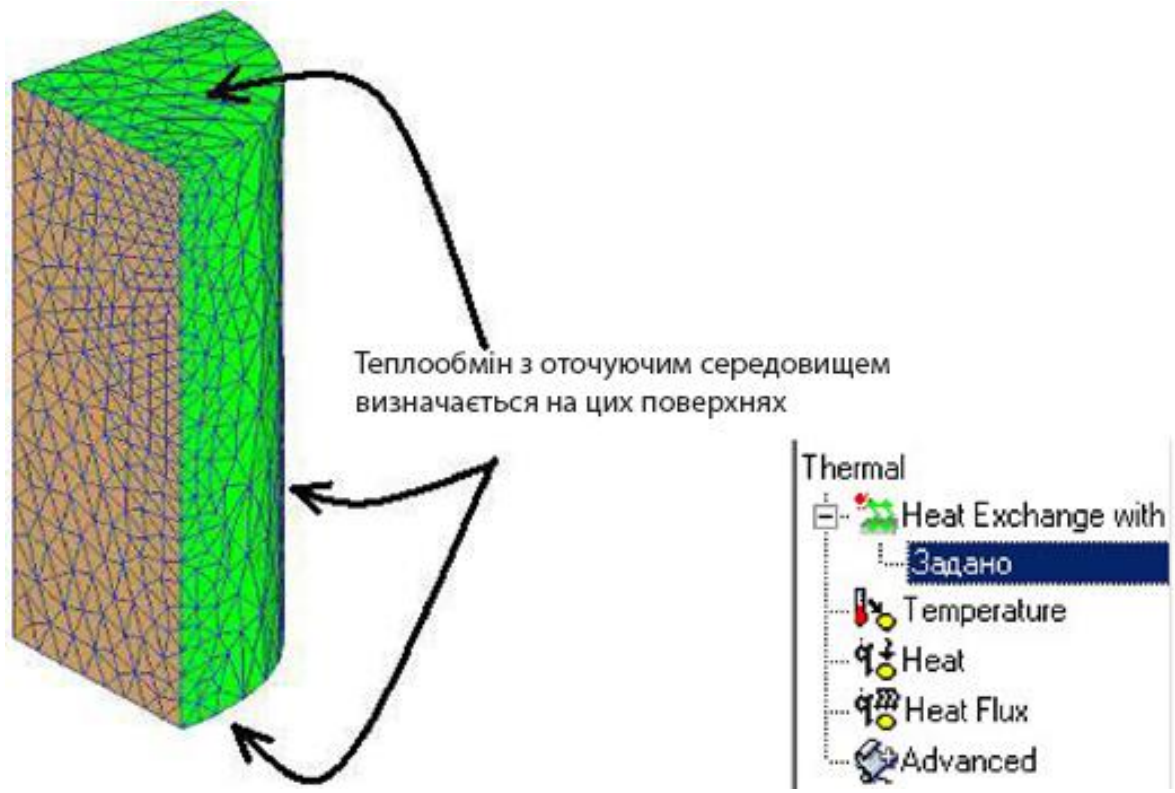


Рисунок 3.72. – Вибір поверхонь тепловіддачі

Клацніть по криволінійній, верхній та нижній поверхням заготовки. Обрані поверхні зафарбовуються зеленим. Використовуйте кнопку для призначення граничної умови для обраних поверхонь. У списку **Граничних умов**, **Задано** додатися під **Heat Exchange with Environment**, і коли **Задана** обрана, тільки що створена гранична умова відображається у **вікні Екран**.

3.10.8. Імпортування матеріалу заготовки

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Матеріал**. Використовуйте кнопку для завантаження **AISI-1025(1800-2200F)**.

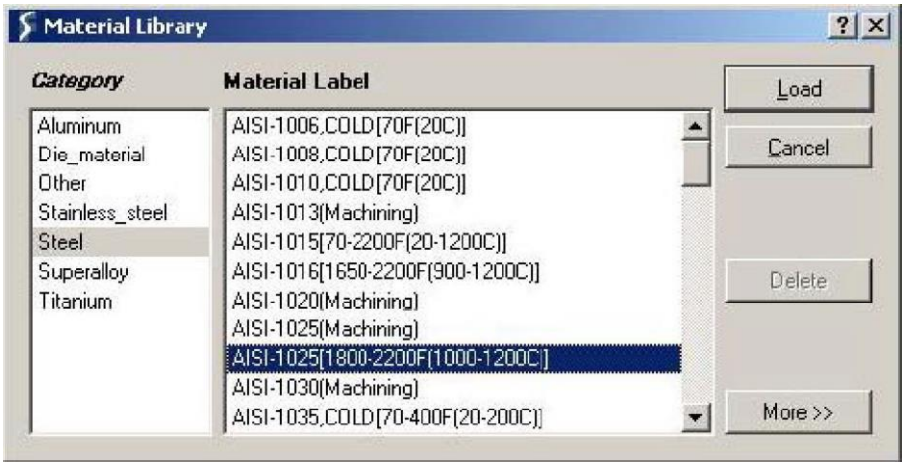
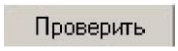
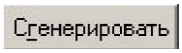


Рисунок 3.73. – Робоче вікно вибору матеріалу заготовки

3.10.9. Початок виконання розрахунків

Тепер, коли настроювання завдання завершене, натисніть кнопку для відкриття вікна **Генерація бази даних.** Натисніть  для того, щоб переконатися в тому, що при настроюванні завдання.

Тому що в цьому розрахунку не потрібно налаштовувати ніяких відносин між об'єктами, якщо з'явитися повідомлення **No intei-object relations defined**, ігноруйте його. Ми створимо ці відносини пізніше, коли заготовка почне перебувати між інструментами. Натисніть кнопку для створення бази даних цього завдання. Після створення, використовуйте  для повернення в головне вікно.

Запустіть розрахунки, натиснувши **СТАРТ** у списку Siulllicitoi. Спостерігайте за ходом розв'язку переглядаючи **Файл Повідомлень**.

3.10.10. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз

Коли розрахунки закінчаться, натисніть Постпроцесор . Буде запушений

постпроцесор Deform 3D. Натисніть кнопку і виберіть **Температура (Temperature)** як змінну та як **Опцію масштабування**. Так само клацніть правою кнопкою на **Колірній Смузі** (**Color Bar**) у **вікні Екран** і виберіть **Temperature (Температура)** як тип **Колірної смуги**. Це дасть більш зрозумілу колірну схему перегляду розподілу температури.

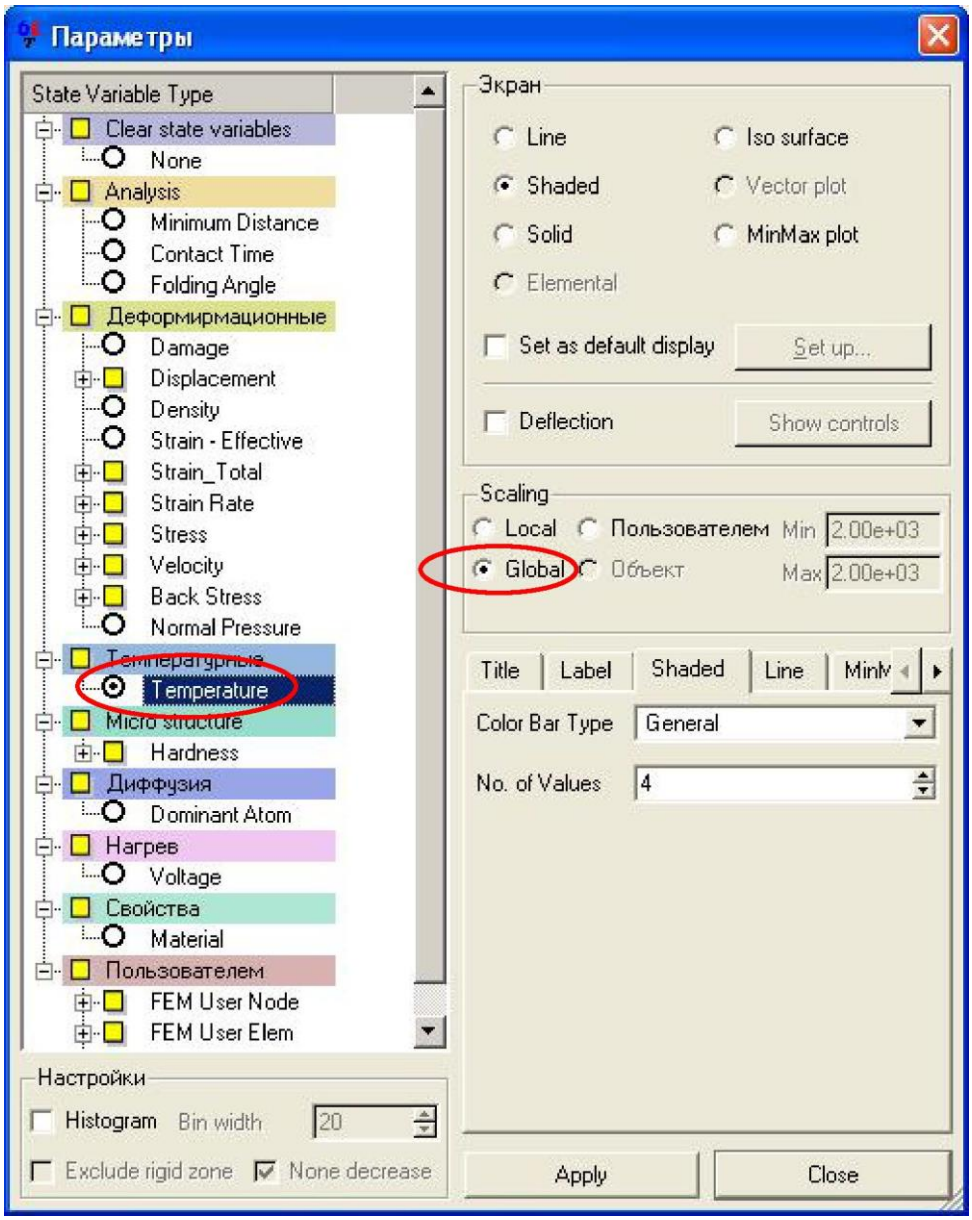


Рисунок 3.74. – Визначення режиму відображення температури.

State Variable menu Temperature Colorbar Type Переходьте по кроках розрахунків і спостерігайте як міняється колір **Заготовки**, коли вона охолоджується при переносі від печі до штампа.

Після закінчення, натисніть для повернення в головне вікно.

3.11. Моделювання процесу кування. Затримка на нижньому штампі

У попередньому розділі заготовка була перенесена від печі до штампа. Коли заготовка поміщається в штамп вона перебуває на нижньому штампі 2 секунди перед здійсненням операції кування. Ця затримка буде змодельована в цьому розділі. Останній крок попереднього розрахунку необхідно завантажити у препроцесор і буде настроєна операція затримки.

3.11.1 Розбивка штампа та температурні граничні умови

Оскільки заготовка буде взаємодіяти зі штампом, необхідно продумати температуру штампа. У Deform - 3D, температуру штампа може бути призначено двома різними способами:

1) Штампу може бути призначена постійна температура, яка не буде мінятись в ході розрахунків. Коли використовується цей спосіб, розбивка на штампі непотрібна та температура задається в розділі

штампа.

2) Штамп може мати температурне поле, яке змінюється в ході розрахунків. Це найбільш точний із двох способів, але на штампі необхідна наявність сітки. Цей спосіб будем використовувати надалі.

3.11.2. Верхній штамп

Оберемо **Top Die** у **Дереві об'єктів**. Штамп моделюється підігрітим, так що необхідно змінити **Температуру** з 68°F на **300°F**. Для цього потрібно натиснути кнопку

для створення сітки, та використати настроювання за замовчуванням, натиснувши

. Коли розбивка закінчиться потрібно натиснути кнопку

і вибрати граничну умову **Теплообмін із Середовищем (Heat Exchange with Environment)**. Після цього потрібно обрати верхню поверхню, внутрішню та зовнішню криволінійні поверхні, вони зафарбовуються зеленим у **Вікні екран**. Потім необхідно використати кнопку

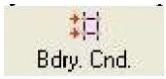
для призначення граничної умови цим граням.

3.11.3. Нижній штамп

Оберемо у **Дереві об'єктів Bottom Die**. Далі необхідно змінити **Температуру** з 68°F на **300°F** і натиснути кнопку

. Як і для **Top Die**, використовуються налагодження за замовчуванням - натисніть

.

Коли розбивка закінчиться, натисніть кнопку 

. Виберіть граничну умову **Теплообмін Із Середовищем (Heat Exchange with Environment)**, виберіть усі грані, крім площин симетрії. Використовуйте кнопку для призначення граничної умови .

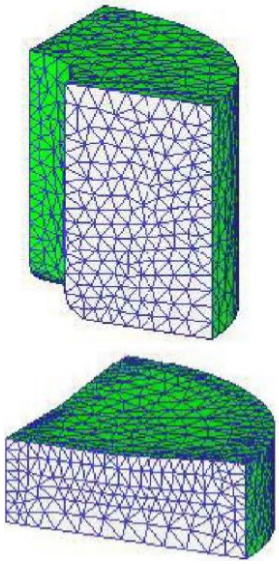


Рисунок 3.75. – Налагодження теплообміну із оточуючим середовищем

3.11.4. Імпорт матеріалу штампа

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Матеріал**. Використовуйте кнопку

для завантаження **AISI-H-13**, як матеріалу для штампа. У вікні **Бібліотека Матеріалів (MATERIAL LIBRARY)** кнопка

може бути використана для перегляду додаткової інформації про обрані дані.

Як показано у полі **Опис (Descriptions),** температура штампа перебуває в діапазоні, певному для H-13. Температурний діапазон відображається в імені матеріалу (145^0F - 185^0F) це діапазон для напруження пластичного плину, і тому що штамп моделюється як **твердий**, нас не цікавить напруження пластичного плину.

Тепер матеріал H-13 необхідно призначити для штампу. Виберіть один зі штампів у **Дереві Об'єктів** і переконаєтеся, що кнопка

натиснута.

Натисніть вкладку **Задане** та перетягніть мишею матеріал H-13 у поле

Назва. Зробіть також призначення H-13 для іншого штампу.

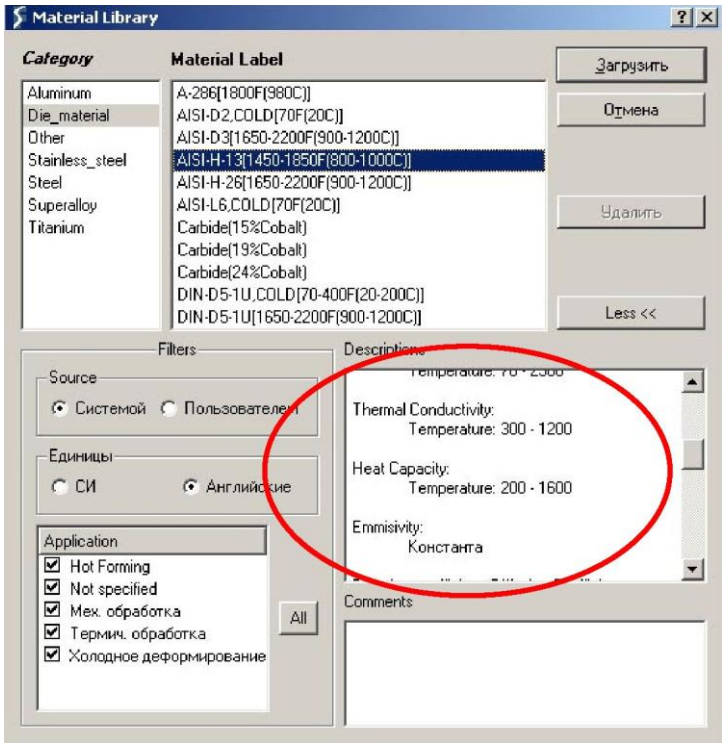


Рисунок 3.76. – Робоче вікно вибору матеріалу.

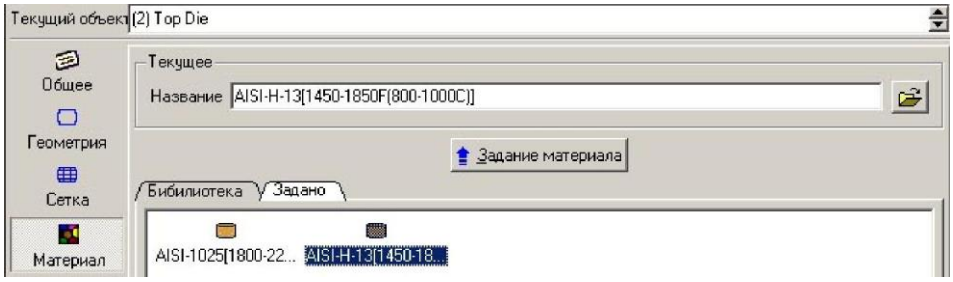


Рисунок 3.77 – Робоче вікно призначення матеріалу верхній частині штампу

3.11.5 Позиціонування заготовки

Заготовку необхідно позиціонувати на **Bottom Die**. Натисніть кнопку і виберіть

. Змініть **Позиціонуємий Об'єкт** на **Billet** і **Відносно** на **Bottom Die**.

Поверніться у вікно **Взаємодія об'єктів**, використовуйте кнопку для визначення підходящої **похибки** й потім натисніть кнопку для створення контакту. Буде створений контакт між **Billet** і **Bottom Die**.

3.11.6. Встановлення параметрів розрахунків

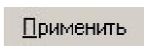
Натисніть кнопку для відкриття вікна **Настроювання завдання**. Змініть **Назву операції** на **Dwell** (Затримка) і **Номер операції** на **2**.

Заготовка знаходиться на **Bottom Die** 2 секунди. Використовуємо теж час кроку - 0.2 сек, усього необхідно 10 кроків. Натисніть і змініть **Число кроків розрахунків** на **10** і **Через скільки кроків зберігати** на **5**. Помітьте, що **Номер початкового кроку** тепер **- 51**. Цей розрахунок - продовження розрахунку переносу від печі (Кроки - 1 to 50). Натисніть кнопку коли закінчите.

3.11.7 Збереження завдання та запуск розрахунків

Тепер, коли налагодження завершене, натисніть кнопку для відкриття вікна **Генерація бази даних**. Натисніть для перевірки правильності настроювання. Натисніть для створення бази даних завдання. Після створення бази даних використовуйте кнопку для повернення в головне вікно.

Запустіть розрахунки, натиснувши **СТАРТ** у списку Sinilllcitoi[1]. Спостерігайте за ходом розрахунків за допомогою **Файлу Повідомлень**.

Змініть **Напрямок** на **-Z** і потім натисніть  .

3.11.8. Відносини між об'єктами

Необхідно визначити відносини між заготовкою та штампом. Натисніть кнопку для відкриття вікна **Взаємодія об'єктів** Коли Вас запитають чи прагнете Ви щоб були додані відносини за замовчуванням – натисніть

. Виберіть відношення **Bottom Die - Billet** і натисніть кнопку

. Так як в цих розрахунках враховується тільки теплообмін, зміни потрібні тільки на вкладці **Температурні**, а не на вкладці **Деформації**. Виберіть **Вільне Положення (Free resting)** зі списку, що випадає.

3.11.9. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.

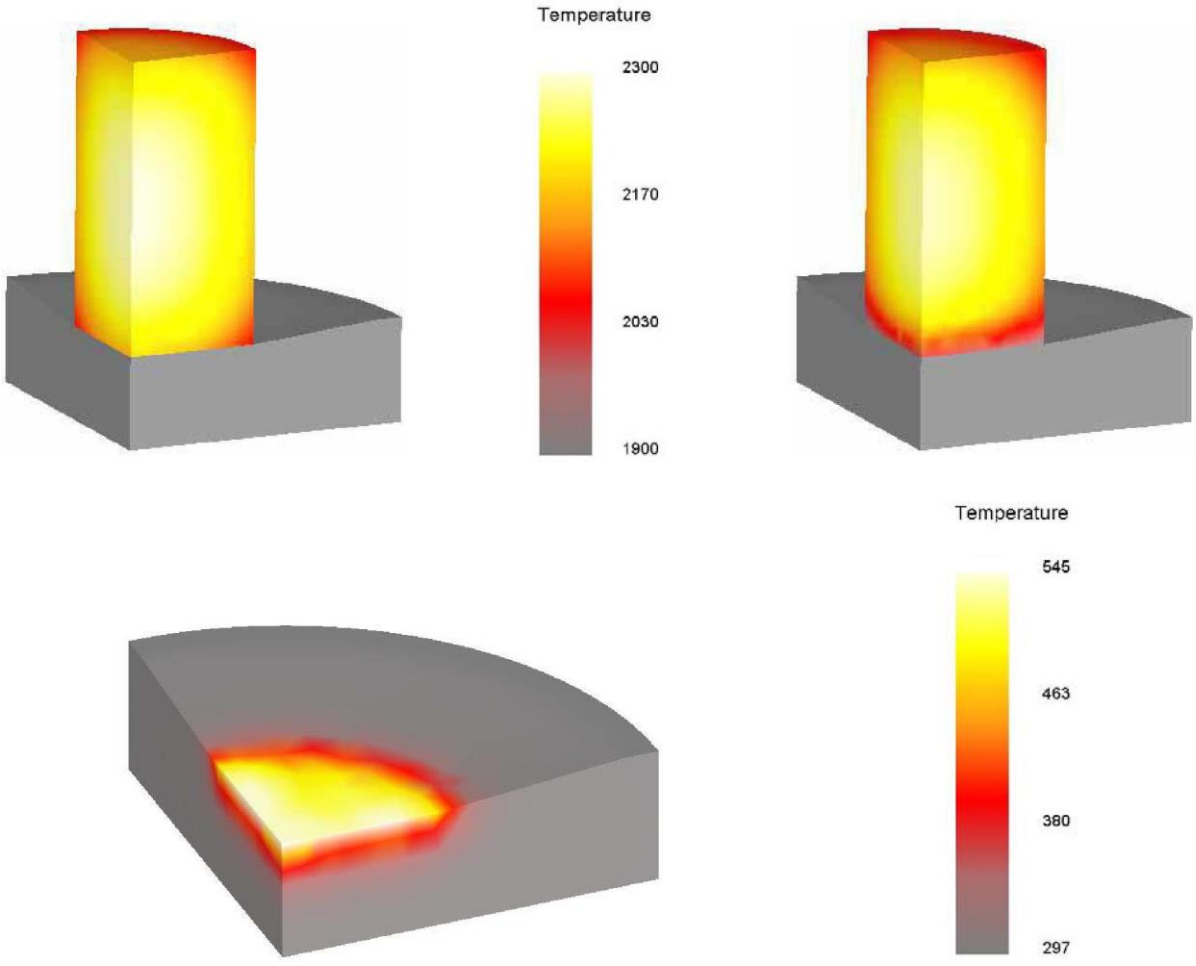


Рисунок 3.78. – Результати моделювання процесу затримки деталі на нижньому штампі при куванні.

Коли розрахунок закінчено, натисніть DEFDRM-3D Постпроцесор під

. Натисніть кнопку для відкриття вікна **Список Кроків (STEP LIST)**, натисніть

для перегляду всіх кроків.

Для кращого перегляду охолодження заготовки на штампі, виберіть **Billet** у **Дереві об'єктів** натисніть кнопку **Режим одного об'єкта (Single object mode)** . У **вікні Екран** буде відображена тільки заготовка. Виберіть **Температура (Temperature)** зі списку, що **випадає, Змінні Стани (State Variable**) і натисніть правою кнопкою миші **на Колірній Смузі (Color Bar**), **виберіть** Temperature як **тип Колірної** Смуги.

Переміщуйтесь по кроках розрахунків для перегляду температури заготовки. На Кроці - 51 заготовка зрушується вниз і розміщується на нижній штамп. Помітьте як основа заготовки охолоджується починаючи з - 51 кроку до 60 кроку за рахунок контакту з більш холодним штампом.

3.12. Моделювання процесу що відбувається при ударі при куванні.

3.12.1. Установка параметрів розрахунків

Натисніть для входу в **Настроювання завдання**. Змініть **Назву операції** на **Forging Blow 1** і **Номер операції** на **3**. Ввімкніть **Деформування**, так щоб також була включена **Теплопередача**.

Натисніть кнопку для перегляду сітки, використовуйте інструмент для виміру довжини найменшого елемента заготовки. Ця довжина приблизно 0.06". Хід штампа повинен становити приблизно 1/3 - 1/2 від цього значення або приблизно 0.025". Ми прагнемо щоб верхній штамп стиснув заготовку на 0.75" за цю кувальну операцію. Для цього необхідно 30 кроків.

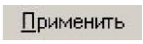
Натисніть кнопку

і встановіть **Число кроків розрахунків** в **30** і **Через скільки кроків зберігати** в **5**. Змініть **Головний Інструмент** на **Top Die,** тому що Top Die переміщається, і під **Завдання кроків розв'язку**

встановіть **постійне переміщенням інструмента** в **0.025**".

3.12.2. Позиціонування верхнього штампу

Натисніть для відкриття вікна **Позиціонування Об'єктів** і виберіть

. Змініть **Позиціонуемий Об'єкт** на **Top Die** і **Відносно** на **Billet**. Зміните **Напрямок** на **-Z.** Натисніть 

.

3.12.3. Визначення граничних умов деформації

У двох попередніх розрахунках моделювався тільки теплообмін. Таким чином, визначені лише граничні умови теплообміну. У цій роботі будуть моделюватися деформації, тобто всі граничні умови повинні бути перевизначені.

3.12.4. Заготовка

Виберіть **Billet** у **Дереві Об'єктів** і натисніть кнопку

. Виберіть **Площину Симетрії** (**Symmetry plane)** і, потім, виберіть одну із площин симетрії заготовки мишею (вузли підсвітяться червоним). Натисніть для застосування граничної умови обраної поверхні. Проробіть теж саме для інших поверхонь симетрії. У списку BCC повинно бути визначено дві граничні умови.

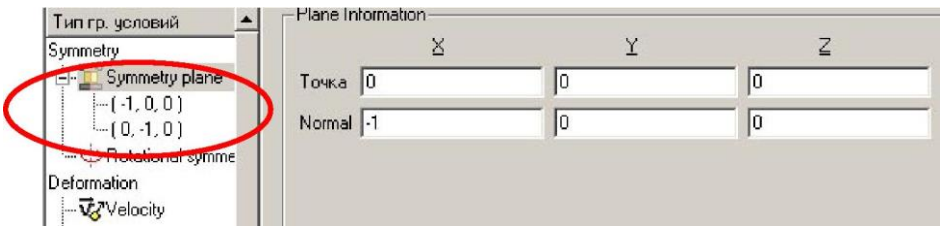


Рисунок 3.79 – Задання площин симетрії.

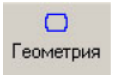
3.12.5. Верхній штамп

Оскільки штампи тверді, вони набагато відрізняються від деформованих об'єктів. Для деформованих об'єктів, таких як заготовка, симетрія визначається для їхньої **Сітки (Mesh)**. Для твердих об'єктів, таких як наші штампи, симетрія визначається для їхньої **Геометрії (Geometry)**.

Виберіть **Top Die** у **Дереві Об'єктів** і натисніть кнопку

. Виберіть вкладку **Поверхні симетрії та**, потім, виберіть **обидві** площини симетрії, так щоб вони стали підсвічені зеленим.

3.12.6. Нижній штамп

Виберіть **Bottom Die** у **Дереві Об'єктів** і натисніть кнопку 

. Виберіть вкладку **Поверхні симетрії** а потім клацніть **обидві** площини симетрії, так щоб обидві вони стали пофарбовані зеленим.

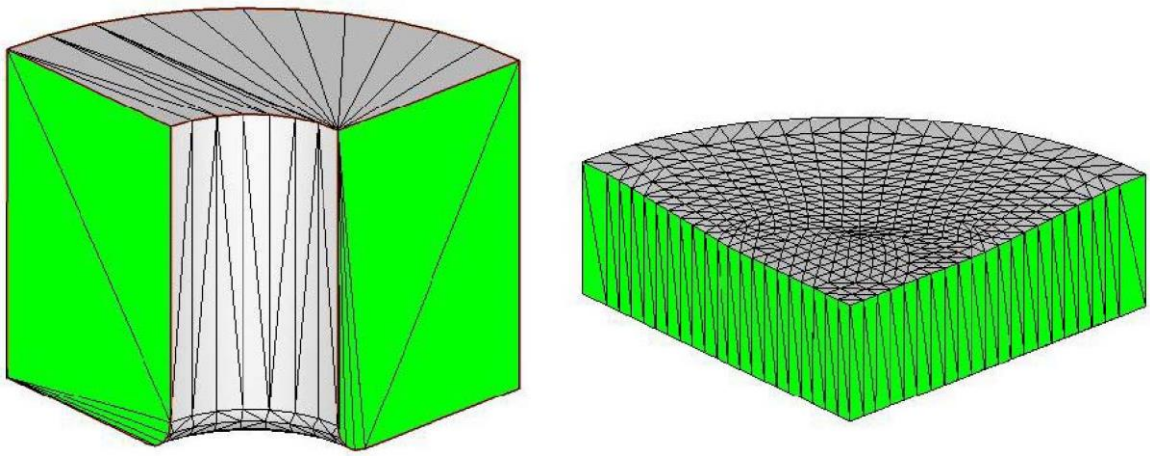
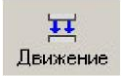


Рисунок 3.80 – Позначення площин симетрії.

3.12.7. Установка переміщення штампа

Виберіть **Top Die** у **Дереві Об'єктів** і натисніть кнопку 

. Встановіть **Швидкість 2** дюйма в секунду в **Напрямку -Z**.

3.12.8. Повторна установка відносин між об'єктами

Натисніть для відкриття вікна **Взаємодія об'єктів**. Необхідно визначити тертя між заготовкою й штампом, тому що тепер моделюється деформація. Так само необхідно змінити **Температурні** дані на **Коефіцієнт Теплообміну Формування (Forming heat transfer coefficient)** замість **Коефіцієнта спокою (Free resting coefficient)**, використаного в попередній роботі.

Виберіть перше відношення в таблиці й натисніть Изменить... . На вкладці **Деформації**, використовуйте список, що випадає, тертя для **вибору Hot forging (Гаряче кування**). На вкладці **Температурні**, використовуючи список, що випадає, **виберіть** Формування **(**Forming) у якості коефіцієнта теплообміну. Поверніться у вікно **Взаємодія об'єктів**.

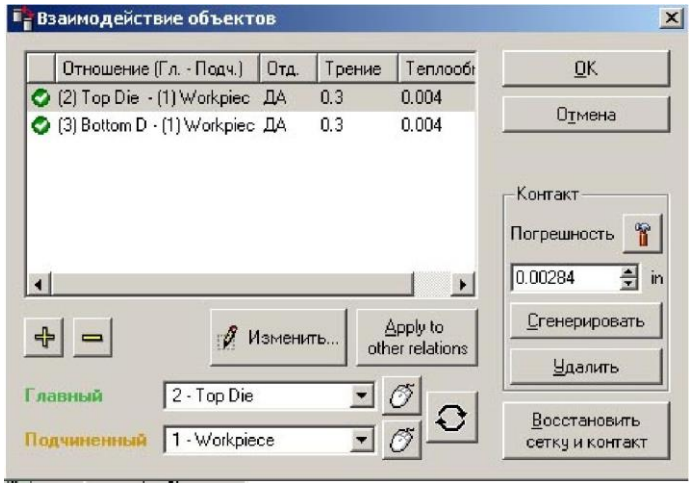


Рисунок 3.81 – Налагодження взаємодії об’єктів

Натисніть Apply to other relations для зміни інших відносин на ці настроювання.

Використовуйте для визначення підходящої похибки та натисніть Сгенерировать для створення контакту. Між заготовкою і обома штампами буде створений контакт.

3.12.9. Збереження завдання та запуск розрахунків

Виберіть **Файл>Зберегти як...** і збережете дані як **Spike_Blow1.KEY**. Далі, натисніть для відкриття вікна **Генерація бази даних**. Натисніть

Проверить. Ігноруйте попередження **Компенсація об'єму (Volume Compensation warning)** ' TRIJVOL fvolume compensation) has not been activated for object 1 натисніть Сгенерировать для створення бази даних.

Після створення бази даних, натисніть для повернення в головне вікно й запустите розрахунків натиснувши **СТАРТ**. Спостерігайте за ходом розрахунків за допомогою **Файлу повідомлень**.

3.12.10. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.

Коли розрахунки завершаться, натисніть на DEFORM-3D Постпроцессор под Post Processor. Натисніть і виберіть усі кроки для перегляду All. Виберіть **Billet** у **Дереві об'єктів**, натисніть для відображення обох штампів прозорими, натисніть кнопку для перегляду контакту між заготовкою й інструментом. Переміщайтеся по кроках, зверніть увагу на кувальні кроки з **-61** по **90**. Подивіться **Температуру (Temperature)** і **Ефективні Деформації (Effective Strain)**.

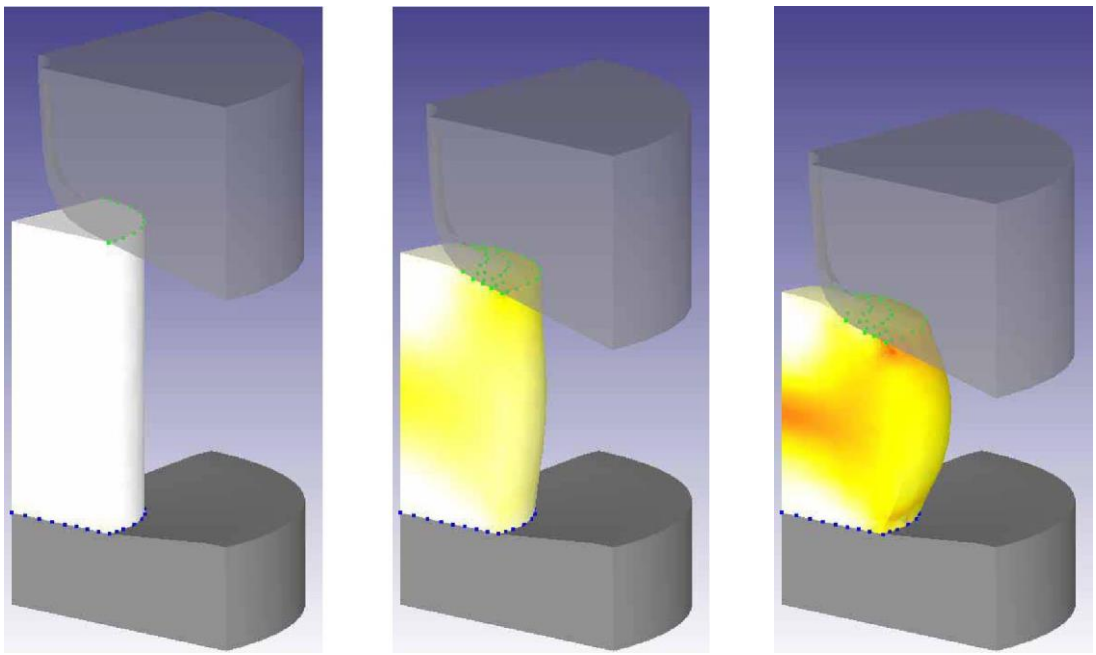


Рисунок 3.82 – Результати моделювання процесу удару при куванні

Залежно від змінних, що проглядаються ви можете перемикатися між геометрією й сіткою на інструменті. Коли дивитеся температуру, градієнт

сітка/температура на штампі може бути відображений за допомогою кнопки **Show Mesh (Показати сітку)** (і також натиснувши на кнопку **Show Geo (Показати геометрію)** можна відключити геометрію). Так само при перегляді змінних, таких як Ефективні Деформації, цікавлять тільки деформовані об'єкти, замість сітки, імовірно, повинна бути відображена геометрія.

Величина зусилля, необхідного для деформації об'єкта - важливий параметр - може бути отримана з розрахунку. Натисніть кнопку угорі екрана. Коли з'явиться вікно **Графік**, змініть настроювання так, щоб був обраний ноль до **Top Die,** для осі **X** встановіть **Переміщення,** для осі **Y** установите **Z Load.** Натисніть OK з'явитися прозора крива **Load-Stroke (Зусилля-Переміщення**) поверх інших об'єктів **Вікна екрана**

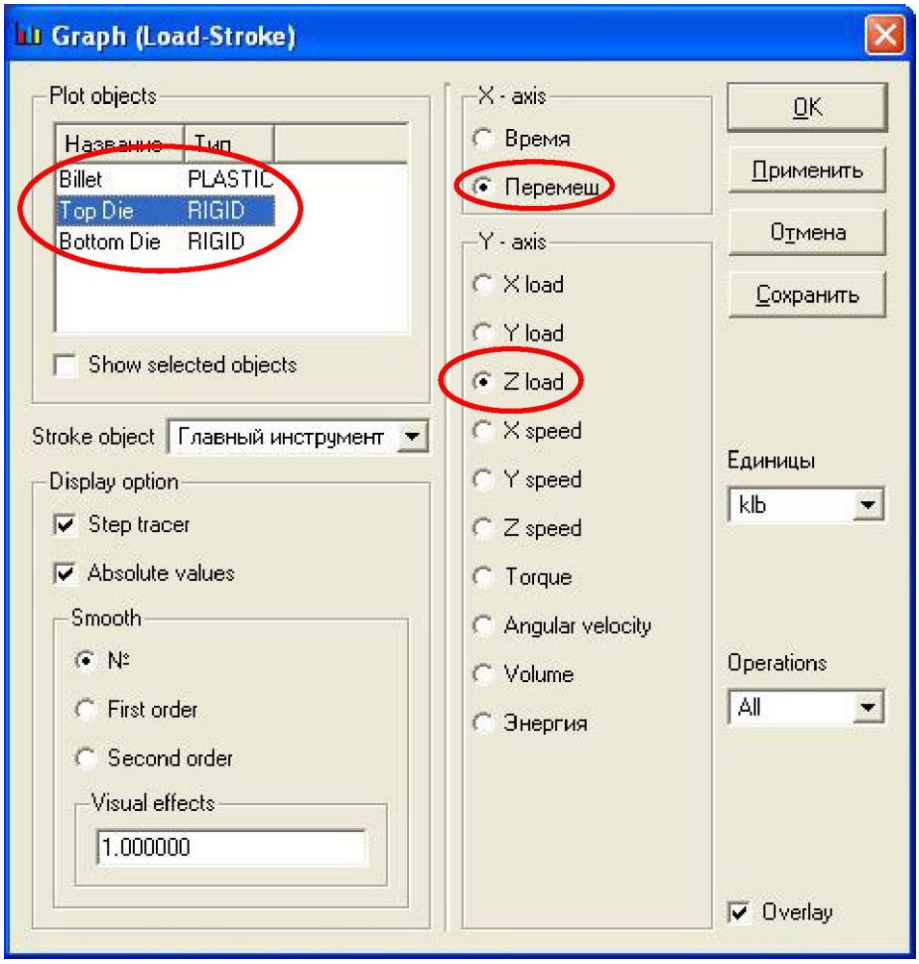


Рисунок 3.83 – Робоче вікно налагодження відображення результатів моделювання

При виборі різних кроків, смуга на кривій Load-Stroke виділяє поточний крок і на графіку показується навантаження для цього кроку. Так само, точка на графіку може бути обрана мишею й відображуваний крок автоматично змінитися, так щоб відповідати цій точці на графіку.

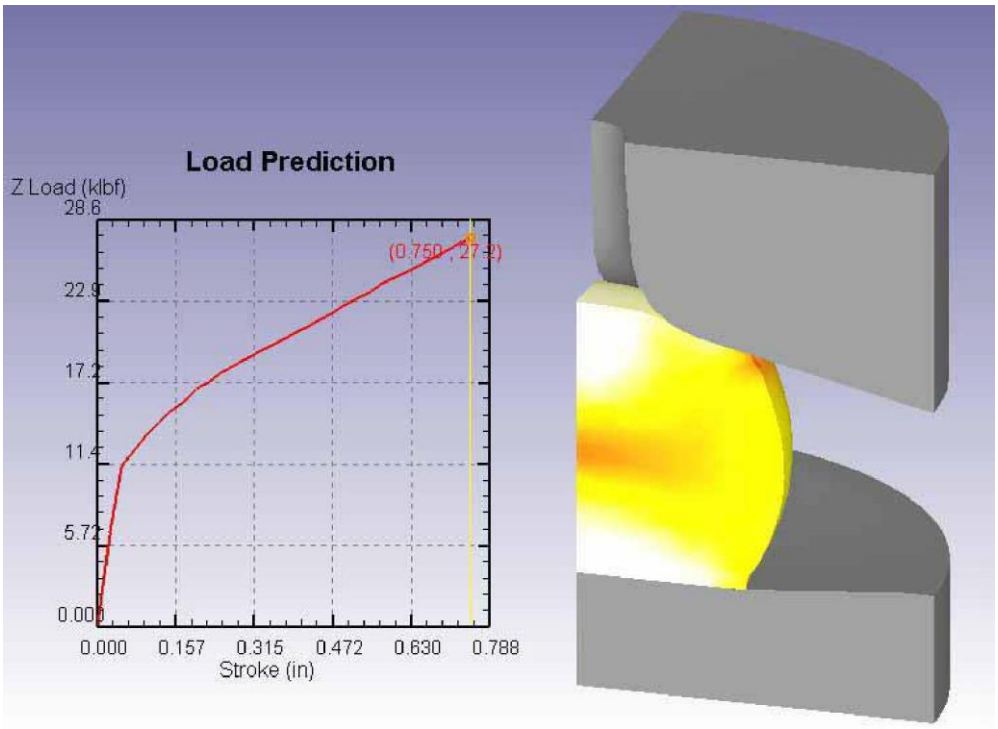


Рисунок 3.84 – Результати математичного моделювання процесу удару при куванні.

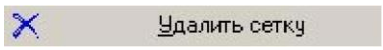
3.13. Кування - заміна штампа та удар 2

Даний розділ присвячено питанню моделювання другої ковальської операції, для якої буде потрібно інший штамп. Для другої ковальської операції буде імпортована нова геометрія та виконано налагодження завдання.

3.13.1. Заміна верхнього штампа для другого удару

Необхідно замінити геометрію й сітку верхнього штампа. Виберіть **Top**

Die у **Дереві об'єктів**, натисніть

і вилучіть сітку, натиснувши 

. Стара сітка Верхнього штампа вилучена, але геометрія усе ще залишається.

Натиснемо кнопку

і імпортуємо геометрію із попередньо підготовленого файлу.

Нова геометрія Верхнього Штампа відобразитися у вікні Екран. Для побудови сітки нового

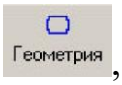
штампа використовуємо налагодження за замовчуванням, натискаємо

і потім,

та обираємо матеріал для нового верхнього штампа як **H-13**.

3.13.2. Визначення нових граничних умов для верхнього штампа

Оскільки верхній штамп змінений, необхідно перевизначити граничні умови теплообміну і деформації для нової геометрії.

Деформації: натисніть 

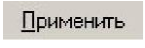
, виберіть вкладку **Поверхні симетрії**, виберіть обидві площини симетрії так, щоб вони офарбилися зеленим.

Теплообмін: натисніть

і виберіть **Теплообмін з навколишнім середовищем (Heat Exchange with Environment)**. Виберіть усі поверхні верхнього штампа, за винятком площин симетрії та натисніть для застосування граничних умов.

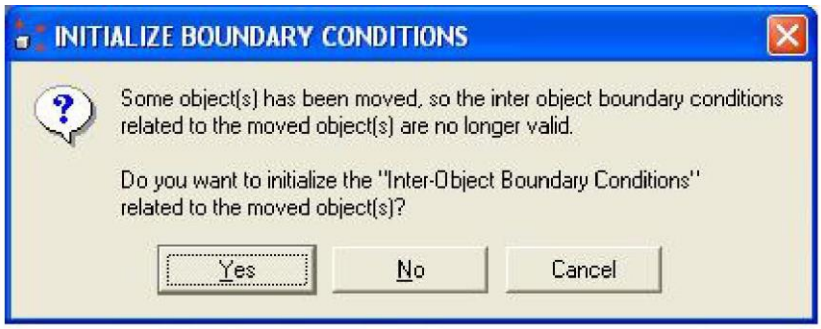
3.13.3. Позиціонування верхнього штампа

Натисніть і виберіть

. Змініть **Позиціонуємий Об'єкт** на **Top Die** і **Відносно** на **Billet**. Зміните **Напрямок** на **-Z** і натисніть 

.

Після позиціонування з'явитися наступне повідомлення:



Натисніть для видалення контакту між Заготовкою та старим штампом.

3.13.4. Перевизначення контакту

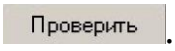
Оскільки геометрія верхнього штампа змінена, то необхідно заново створити контакт між заготовкою та верхнім штампом. Натисніть для відкриття вікна **Взаємовідношення об'єктів**, натисніть для установки підходящої точності. Натисніть .

3.13.5. Установка параметрів розрахунків

Натисніть для входу в **Настроювання завдання**. Змініть **Назву Операції** на **Forging Blow 2** і Номер Операції на **4**. Ми прагнемо, щоб Верхній Штамп пройшов 0.25" за другу кувальну операцію.

Натисніть і встановіть **Число кроків розрахунків** в **10**. Установіть інші параметри так, щоб 10 кроків були пройдено з умови 0.025 дюйма за крок.

3.13.6. Виконання розрахунків

Натисніть для відкриття вікна **Генерація бази даних**. Натисніть кнопку  .

Ігноруйте **Попередження компенсація об'єму (Volume Compensation)**, натисніть Після створення бази даних натисніть для повернення в головне вікно. Запустіть розрахунки, натиснувши **СТАРТ**. Спостерігайте за

ходом розрахунків за допомогою **Файлу Повідомлень**.

3.13.7. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз.

Коли розрахунки закінчаться, натисніть DEF0RM 3D Постпроцесор та кнопку і переглянете (усі кроки) .

Пройдіть по кроках, зверніть увагу на другу ковальську операцію, кроки з **-90** по **100**.

Використовуйте кнопку для перегляду того, як контактують об'єкти в цих розрахунках. Так само досліджуйте температуру, ефективні деформації та залежність навантаження про ходи штампа.

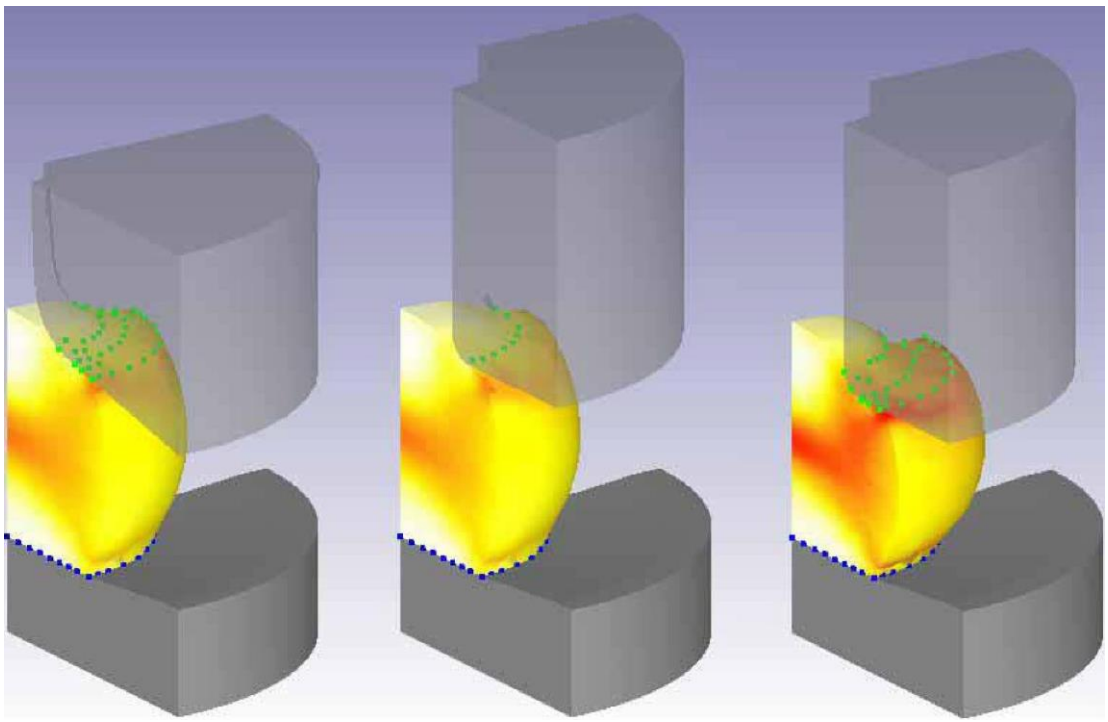


Рисунок 3.85 – Результати математичного моделювання процесу кування.

3.14. Аналіз напруженого стану інструмента

Даний розділ присвячено питанню розробки математичної моделі для аналізу напруженого стану інструмента. Коли аналіз напруженого стану

робиться тільки на одному інструменті, одного кроку моделювання достатньо для одержання точних напружень. Коли аналіз напружень робиться на збірних штампах, де є взаємодія між інструментами, звичайно необхідний більш ніж один крок для того, щоб одержати стан рівноваги при навантаженні, що прикладається.

У типових розрахунках напружень штампа, оброблювана деталь видаляється, а сили з якими деталь діє на штамп інтерполюються на інструмент. У цій роботі також буде змодельована гаряча посадка.

3.14.1. Установка параметрів розрахунків

Натисніть для входу в **Настроювання завдання**. Змініть **Заголовок завдання** і **Назву операції** на **Die Stress** і встановіть **Номер Операції** в **1**. Переконайтесь, що встановлені одиниці вимірювання **English, Деформування** включене, а **Теплопередача** виключена.

У розрахунки будуть додано два супорти, які взаємодіють із верхнім і нижнім штампами. Оскільки буде взаємодія між набором інструментів, потрібно більш одного кроку розрахунків, щоб була досягнута рівновага. Встановіть **Номер початкового кроку** в **-1**, **Число кроків розрахунків** в **6** і **Через скільки кроків зберігати** в **1**. Встановіть **Завдання кроків розв'язку** в **З постійним кроком зміни часу у 1** сек.

3.14.2. Додавання додаткових інструментів і видалення заготовки

Використовуйте для додавання двох додаткових об'єктів (Об'єкт 4 і 5) Дерево Об'єктів. Дотримуйтесь наведених нижче інструкцій для кожного об'єкта.

3.14.3. Верхній штамп

Змініть **Тип** Верхнього Штампа на **Пружний**.

1) Натисніть

Виберіть граничну умову **Площини Симетрії (Symmetry plane)**, потім додайте граничну умову для кожної із площин симетрії Верхнього Штампа.

2) Застосуйте граничну умову Vz = 0 **Швидкість (Velocity)** для верхньої поверхні Верхнього Штампа. Ця гранична умова не дозволить штампу відлетіти при додатку навантаження.

3) Виберіть граничну умову **Сила (Force).** Для інтерполяції формувальних навантажень від заготовки інструменту натисніть кнопку Interpolate.

Знайдіть файл бази даних із попередніми розрахунками, і потім виберіть Крок 90, який був завантажений у препроцесор. Інтерполюйте навантаження від заготовки використовуйте ***Точність Помилки (Error Tolerance)*** як 0.1 (повинна приблизно дорівнювати розміру елемента оброблюваної деталі).

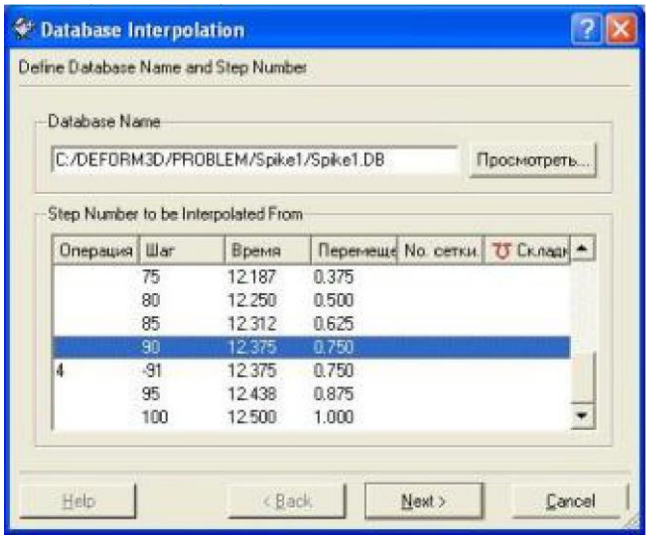


Рисунок 3.86 – Вибір кроку

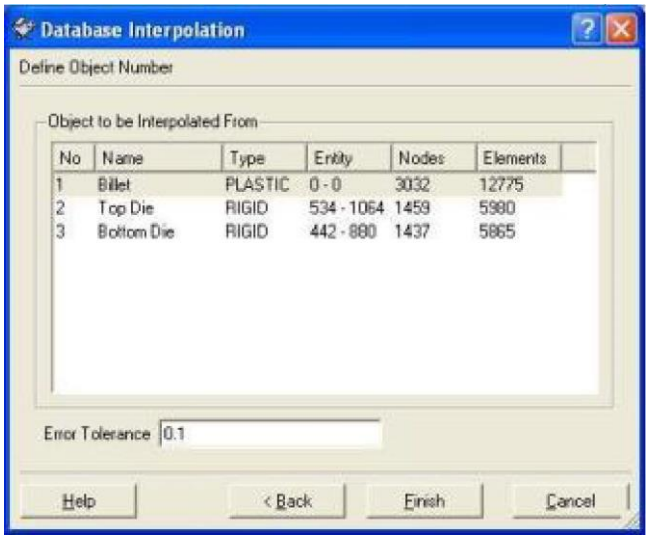


Рисунок 3.87 – Сили та деформації у системі.

Повинно з'явитися підсумкове вікно, показуючи сили на заготовці та сили, які були інтерпольовані до штампа.

Ці сили взагалі не будуть точно рівні. Цим певною мірою управляє **Допуск Похибки (Error tolerance)**. Включення більш високого допуску буде інтерполювати сили від більшої кількості поверхневих вершин заготовки, збільшуючи сили, інтерпольовані до штампа. Поки сили для Оброблюваної деталі та Штампа досить близькі, інтерполяцію вважають успішною.

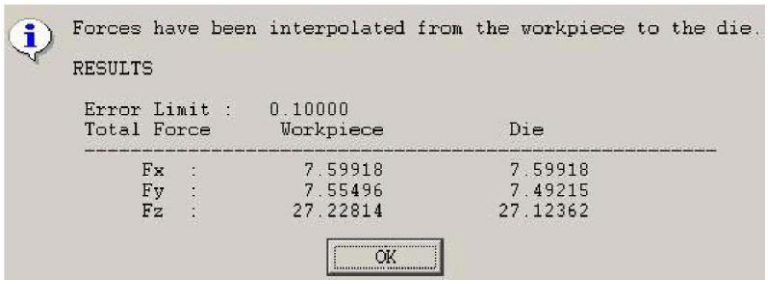


Рисунок 3.88 – Інформаційне вікно, що показує які сили були на заготовці та сили що були інтерпольовані до штампа.

Якщо Ви зробили об'єкт прозорим (натиснувши кнопку поки Верхній Штамп обраний у Дереві Об'єктів) інтерпольовані сили будуть видні.

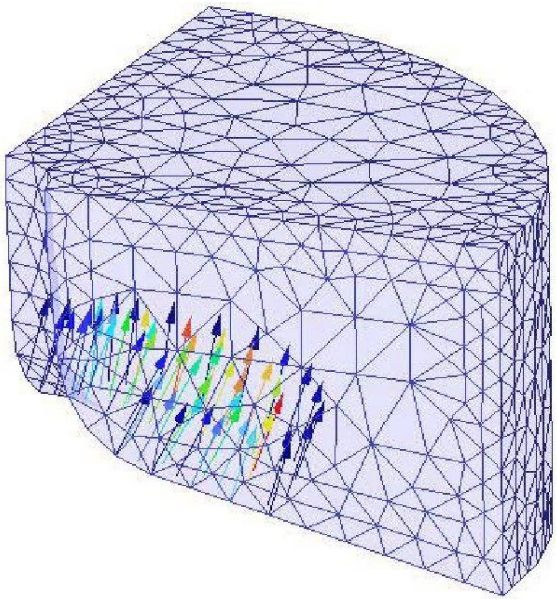


Рисунок 3.89 – Інтерпольовані сили, що діють на верхній штамп.

3.14.4. Нижній штамп

Змініть **Тип Нижнього** Штампа на **Пружний**.

1)

виберіть граничну умову **Площини симетрії (Symmetry plane)**, додайте граничну умову для кожної площини симетрії.

2) Виберіть граничну умову **Сила (Force)** і інтерполюйте сили від Заготовки, так як Ви робили для Верхнього Штампа.

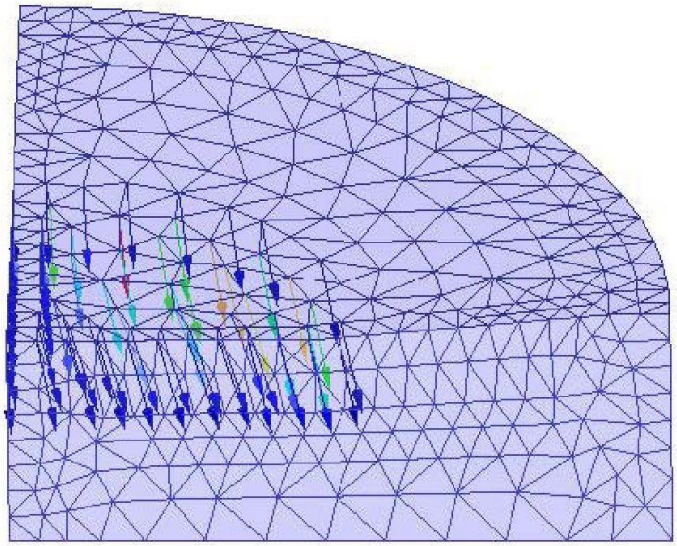


Рисунок 3.90 – Інтерпольовані сили, що діють на нижній штамп.

3.14.5. Визначення відносин між об'єктами

Відносини необхідно визначити між Верхнім Штампом і Верхнім Супортом, а так само між Нижнім Штампом і Нижнім Супортом.

Натисніть кнопку для відкриття вікна **Взаємодія об'єктів**. Додайте відносини використовуючи кнопку та визначаючи відносини як показано нижче.

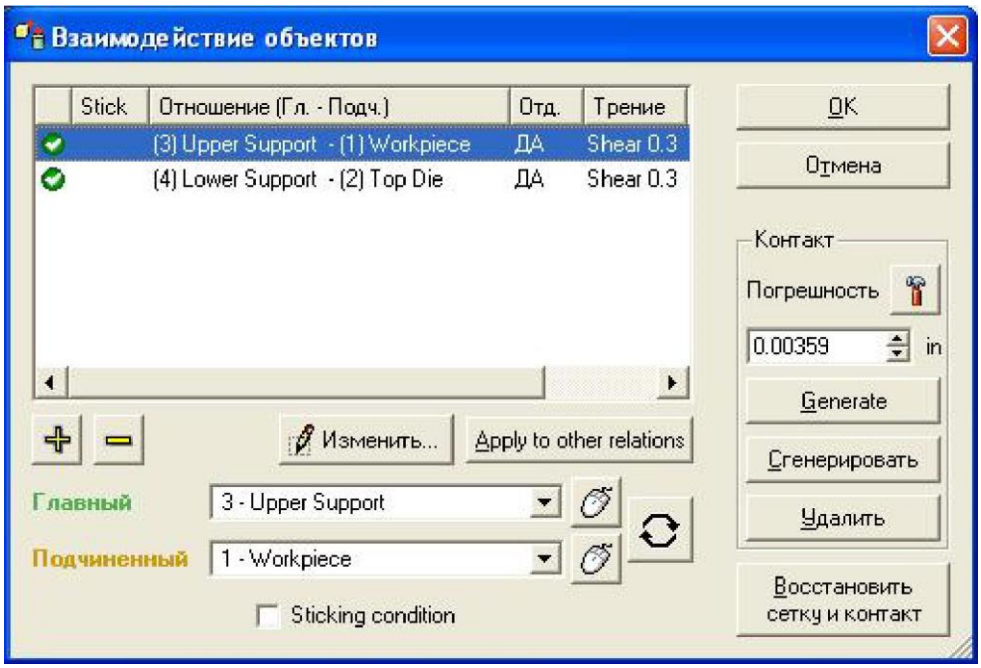
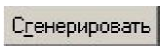


Рисунок 3.91 – Робоче вікно діалогу взаємодії об’єктів

Використовуйте для установки підходящої точності контакту й натисніть

.

3.14.6. Запуск розрахунків

Натисніть кнопку для збереження даних. Натисніть кнопку 

і потім для створення бази даних.

Після створення бази даних поверніться в головне вікно й запустіть розрахунки, натиснувши **СТАРТ.**

3.14.7. Перегляд результатів розрахунків та їх аналіз

Коли розрахунки закінчаться, натисніть DEFDRM 3D Постпроцесор.

Натисніть для перемикання в **Обумовлений користувачем режим об'єктів (User-Defined Object Mode)**, який дозволяє Вам змінити видимість об'єктів. Використовуйте для включення контакту Верхнього й Нижнього Штампів і встановіть прозорість для обох об'єктів, використовуючи кнопку для кожного з них.

Цей розрахунок моделювання запускався з декількома кроками так, щоб контакт і напруження могли стабілізувати й установитися в рівновагу. Програйте кроки, і спостерігайте, як змінюється контакт. Контакт у Верхнього штампа залишається по суті однаковим протягом аналізу, але контакт на Нижньому Штампі дещо змінюється. Прикладене навантаження давить центр штампа вниз, віддаляючи його від супорта. Наприкінці моделювання контакт стабілізується і більше не змінюється протягом декількох кроків.

Використовуючи, випадаюче меню **Змінні Станів (State Variable)**, побудуйте **Ефективні напруги і Максимальні Головні Напруги (Max Principal stress)**, дві найважливіші змінні для цього розрахунків. Використовуйте кнопку .

Коротка інформація. Натисніть кнопку

і виберіть **Об'єкт**

як **Top Die**, натисніть відразу за **Eff. Stress**.

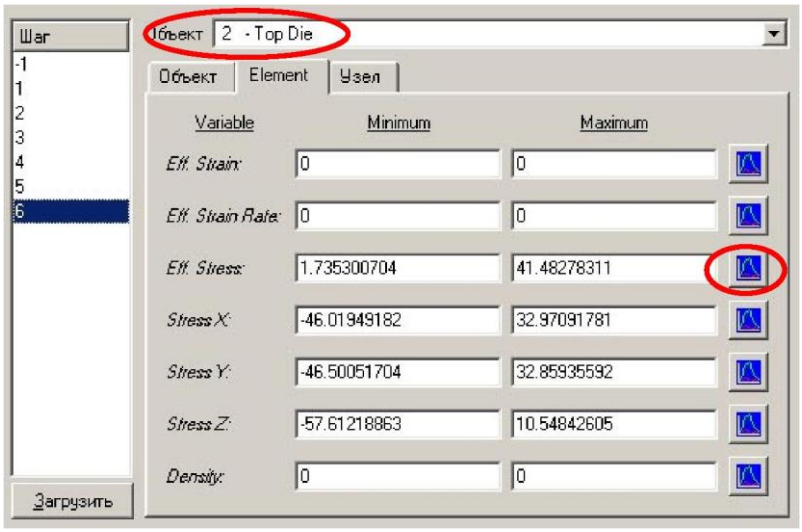


Рисунок 3.92 – Робоче вікно змінних станів досліджуваного об’єкта

Для Нижнього Штампа відображаються Max і Min ефективні напруження. Ви можете бачити, що наприкінці розрахунків, коли контакт перестає мінятися, напруження стабілізуються і не міняються надалі.

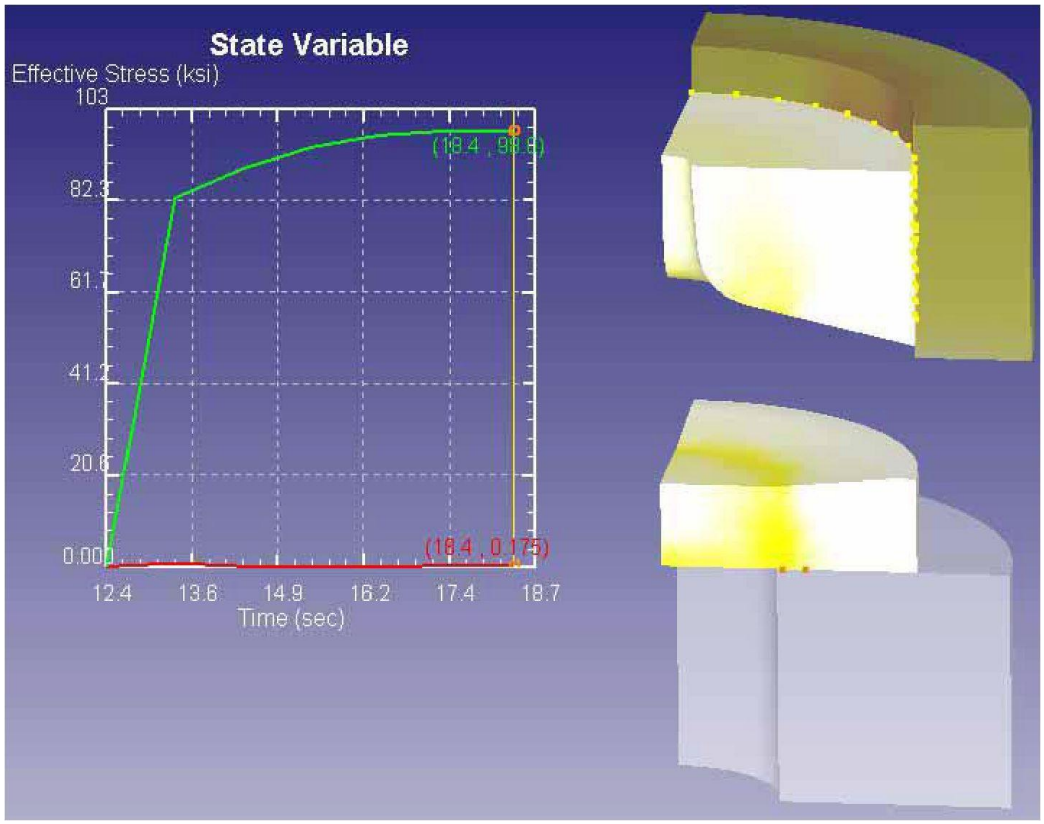


Рисунок 3.92 – Результати математичного моделювання

3.15. Сутність основних параметрів напружено-деформованого стану в процесах обробки металів тиском

Важливими при аналізі процесів ОМТ і особливо при оцінці реформованості матеріалів є визначення накопиченої деформації $\varepsilon_u(t)$

$$\varepsilon_u(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u(\tau) d\tau, \tag{3.1}$$

де τ, t – час; $\dot{\varepsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій, яка визначається наступною залежністю:

$$\dot{\varepsilon}_u = \sqrt{\dot{\varepsilon}_\varphi^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_z\right)^2}, \tag{3.2}$$

де $\dot{\varepsilon}_i$, $(i = \varphi, r, z)$ – значення головних компонент тензора швидкостей деформацій, або інтенсивність логарифмічних деформацій $e_u(t)$.

Необхідним є визначення геометричного та фізичного змісту накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій.

Довжина кривої в просторі, що задана параметрично:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\varphi(\tau), \varepsilon_r = \varepsilon_r(\tau), \varepsilon_z = \varepsilon_z(\tau), \quad (0 \le \tau \le t), \tag{3.3}$$

де $\varepsilon_\varphi(\tau), \varepsilon_r(\tau), \varepsilon_z(\tau)$ — неперервно диференційовані функції, визначається відповідно як:

$$l = \int_0^t \sqrt{\dot{\varepsilon}_\varphi^2(\tau) + \dot{\varepsilon}_r^2(\tau) + \dot{\varepsilon}_z^2(\tau)} d\tau, \tag{3.4}$$

де $\dot{\varepsilon}_i(\tau) = \dfrac{d\left(\varepsilon_i(\tau)\right)}{d\tau}$, (i = φ, r, z).

Довжина радіус-вектора $R(t)$ поточної точки даної кривої визначається сумою квадратів його координат:

$$R(t) = \sqrt{\varepsilon_\varphi^2(t) + \varepsilon_r^2(t) + \varepsilon_z^2(t)}. \tag{3.5}$$

При розрахунках деформацій слід враховувати умову нестискуваності:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_r = 0. \tag{3.6}$$

Довжина кривої в просторі, що задана параметрично:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\varphi(\tau), \varepsilon_r = \varepsilon_r(\tau), \varepsilon_z = \varepsilon_z(\tau), \quad (0 \le \tau \le t), \tag{3.7}$$

де $\varepsilon_\varphi(\tau), \varepsilon_r(\tau), \varepsilon_z(\tau)$ — неперервно диференційовані функції, визначаються відповідно до виразу:

$$e_u(t) = \sqrt{\varepsilon_\varphi^2(t) + \frac{1}{3}\cdot\left(\varepsilon_r(t) - \varepsilon_z(t)\right)^2}, \tag{3.8}$$

де ε_i , ($i = \varphi, r, z$) – значення головних компонент тензора деформацій.

Вираз для обчислення накопиченої деформації (3.1) можна також представити і як залежність від однієї із компонент деформацій:

$$\varepsilon_u\left(\varepsilon_\varphi\right) = \frac{2\sqrt{3}}{3}\cdot\int_0^{\varepsilon_\varphi}\sqrt{\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi}\right)^2 + \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} + 1}\cdot d\varepsilon_\varphi . \tag{3.9}$$

$$\varepsilon_u(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot l(t), \tag{3.10}$$

$$e_u(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot R(t), \tag{3.11}$$

Отже, накопичена деформація та інтенсивність логарифмічних деформацій, з точністю до коефіцієнта, дорівнюють, відповідно, довжині траєкторії деформацій в координатах головних деформацій та довжині радіус-вектора поточної точки даної траєкторії.

Слід зазначити, що така аналогія справедлива тільки за умови відсутності поворотів головних осей під час деформування, оскільки лише в цьому випадку справедливий закон адитивності деформацій: сума послідовних натуральних подовжень дорівнює сумарному натуральному подовженню. При цьому інтеграли від швидкостей деформацій мають простий фізичний зміст, наприклад для осьової деформації ε_z за умови розтягу або стиснення справджується співвідношення:

$$\int_0^t \dot{\varepsilon}_z d\tau = \ln\left(\frac{h(t)}{h(0)}\right), \tag{3.12}$$

де $h(t)$ – довжина або висота зразка в момент часу t .

Варто також звернути увагу на можливі непорозуміння. В координатах $\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi$ траєкторія деформацій може суттєво відрізнятися від прямої лінії, але довжина дуги цієї траєкторії визначається рівністю:

$$l_1(t) = \int_0^t \sqrt{\dot{\varepsilon}_z^2(\tau) + \dot{\varepsilon}_\varphi^2(\tau)}d\tau , \tag{3.13}$$

яка якісно відрізняється від співвідношення для накопиченої деформації, із урахуванням умови нестискуваності (3.6):

$$\varepsilon_u(t)=\frac{2\sqrt{3}}{3}\int_0^t\sqrt{\dot{\varepsilon}_z^2(\tau)+\dot{\varepsilon}_z\cdot\dot{\varepsilon}_\varphi+\dot{\varepsilon}_r^2(\tau)}d\tau \quad . \qquad (3.14)$$

В просторі головних деформацій довжина кривої, що виходить із початку координат, співпадає із радіус-вектором тільки у випадку, коли траєкторія описується прямою лінією:

$$\begin{cases}\varepsilon_r(\tau)=c_r\cdot\tau,\\ \varepsilon_\varphi(\tau)=c_\varphi\cdot\tau, \quad c_r,c_\varphi,c_z=const \quad (0\le\tau\le t)\\ \varepsilon_z(\tau)=c_z\cdot\tau,\end{cases} \quad . \qquad (3.15)$$

Така ситуація, зокрема, має місце під час штампування обкочуванням (ШО) трубних, циліндричних заготовок за відсутності тертя на торцях. При цьому $c_r=c_\varphi=-c_z/2$. Якщо ж c_r,c_φ,c_z в (3.15) змінюються в процесі деформування, то траєкторія деформацій не співпадатиме із прямою. Саме така ситуація виникає при відбортовці та забортовці в процесі ШО, що ініціюється наявністю тертя на торцях заготовки. В таких випадках цікавим є порівняння результатів обчислень величин $\varepsilon_u(t)$ по (3.1) та $e_u(t)$ по (3.8).

У відповідності до експериментально-аналітичного підходу, в якому залежності між компонентами деформацій представлені співвідношеннями:

$$\begin{cases}\varepsilon_\varphi=m\cdot tg(t)\\ \varepsilon_z=-\dfrac{m}{2}\cdot\left(tg(t)+3\cdot t\right)\end{cases} \quad t\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right], \qquad (3.16)$$

визначаємо довжину траєкторії деформацій та радіус-вектора поточної точки згаданої траєкторії:

$$l_d(x,m)=m\cdot\int_0^x\sqrt{\frac{1}{\cos^4(x)}+\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\cos^2(x)}+3\right)^2+\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\cos^2(x)}-3\right)^2}\,dx, \qquad (3.17)$$

$$R_d(x,m)=m\cdot\sqrt{tg^2(x)+\frac{1}{4}\cdot\left(tg(x)+3x\right)^2+\frac{1}{4}\cdot\left(tg(x)-3x\right)^2}, \qquad (3.18)$$

які після спрощення матимуть вигляд

$$l_d(x,m)=m\cdot\sqrt{3/2}\cdot\int_0^x\sqrt{\cos^{-4}(x)+3}\cdot dx, \qquad (3.19)$$

$$R_d(x,m)=m\cdot\sqrt{3/2}\cdot\sqrt{tg^2(x)+3\cdot x^2}. \qquad (3.20)$$

На рис. 3.91 приведено графік траєкторії деформацій в просторі деформацій та радіус-вектори поточних точок траєкторії.

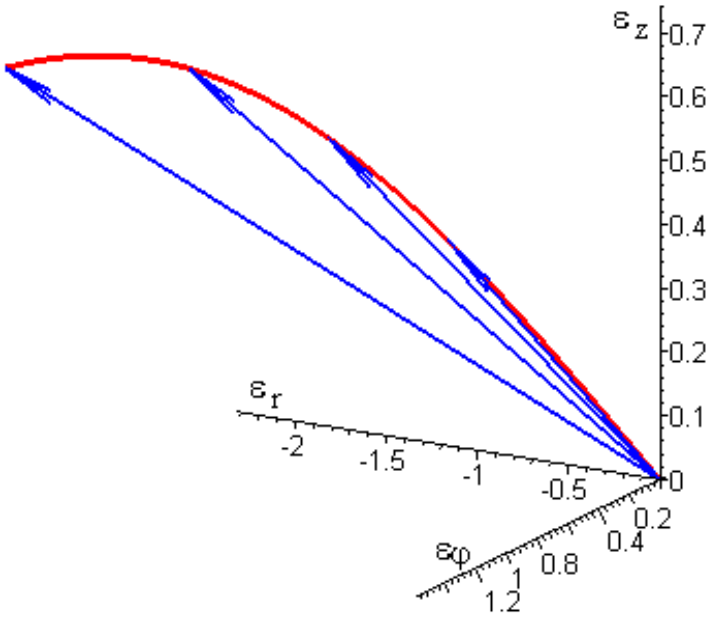


Рисунок 3.93. - Траєкторія деформацій та радіус-вектори поточних точок згаданої траєкторії – розрахунок відповідно до (3.19) та (3.20) при $m = 1$ з врахуванням умови нестискуваності. Радіус-вектори поточних точок траєкторії для значень x = 0,4; 0,6; 0,8; 1.

З врахуванням співвідношень (3.16), вирази для накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій набувають вигляду:

$$\varepsilon_u\left(x,m\right) = m \cdot \int_0^x \sqrt{\cos^{-4} x + 3} \cdot dx \,, \qquad (3.21)$$

$$e_u\left(x,m\right) = m \cdot \sqrt{tg^2\left(x\right) + 3 \cdot x^2} \,. \qquad (3.22)$$

Аналогічно до загального випадку, для бічної поверхні при ШО накопичена деформація (3.21) та інтенсивність логарифмічних деформацій (3.22), з точністю до коефіцієнта, дорівнює довжині траєкторії деформацій $l_d\left(x,m\right)$ (3.19) та радіус-вектора поточної точки згаданої траєкторії $R_d\left(x,m\right)$ (3.20).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beunk, G.Eikel. W.Holtmann. Dutch designs to gut tare nountain. Profitechnical. №5.- 1997.- S.46-48.
2. Burrows, C.R. Fluid power – progress in a key technology./ C.R. Burrows // JSME International Journal, Series B, - 1994.-701.
3. Caputo, D. Electrohydraulic proportional valves increase system efficiency./ D. Caputo // Hydraulics & Pneumatics, - November 1994 -, pp.41-42.
4. Dalayeli, H. Industrial Hydraulic and Hydraulic Systems Design. / H. Dalayeli, A. R. - Madineh, Kanoon Pazhohesh Press, Esfehan, Iran. - 2001
5. Gundebommu, S. L., Victor, M., Olena, R., & Yurii, B. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Paper presented at the Materials Today: Proceedings*, 2020, №38 3337-3344. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.243
6. Hevko R. B., Liubin M. V., Tokarchuk O. A., Lyashuk O. L., Pohrishchuk B. V., Klendii O. M. DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF TRANSPORTING AND MIXING FEED MIXTURES ALONG THE CURVILINEAR PATHS OF TUBULAR CONVEYORS // Inmateh-Agricultural Engineering. – 2018. – V. 55, № 2. – P. 97-104.
7. Hevko R. B., Yazlyuk B. O., Liubin M. V., Tokarchuk O. A., Klendii O. M., Pankiv V. R. FEASIBILITY STUDY OF MIXTURE TRANSPORTATION AND STIRRING PROCESS IN CONTINUOUS-FLOW CONVEYORS // Inmateh-Agricultural Engineering. – 2017. – V. 51, № 1. – P. 49-58.
8. Iskovych-Lototsky R. D., Ivanchuk Y. V., Veselovska N. R., Surtel W., Sundetov S. AUTOMATIC SYSTEM FOR MODELING VIBRO-IMPACT UNLOADING BULK CARGO ON VEHICLES // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018 / Romaniuk R. S., Linczuk M., Book Series: Proceedings of SPIE. – 2018. – V.: 10808, Article Number: 1080860.
9. Iskovych-Lototsky, R., Zelinska, O., Ivanchuk, Y., Veselovska, N. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping

workpieces from powder materials (2017) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (1-85), pp. 9-17.

10. Kaletnik H., Pilvere I., Nikolaenko S., Bulgakov V. INVESTIGATION OF BIOFUEL PRODUCTION POSSIBILITIES FOR STABILISATION OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF UKRAINE // 16th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development / Malinovska L., Osadcuks V., 2017. – P. 1250-1256.
11. Kaletnik, G. Angular oscillation model to predict the performance of a vibratory ball mill for the fine grinding of grain/ Bulgakou V., Pascuzzi S., Ivanovs S., Kaletnik G., Yanovich V.// Biosystems Engineering. – 2018. – V. 171. – P. 155-164.
12. Kaletnik, G., Bulgakov, V., Adamchuk, V., Arak, M., Olt, J. Mathematical model of vibration digging up of root crops from soil (2014) Agronomy Research, 12 (1), pp. 41-58.
13. Kaletnik, G., Tsurkan, O., Rimar, T., Stanislavchuk, O. Determination of the kinetics of the process of pumpkin seeds vibrational convective drying (2020) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, (8), pp. 50-57.
14. Kaletnik, H., Bulgakov, V., Adamchuk, V., Ivanovs, S. Experimental investigation of technical and operational indices of asymmetric swath reaper machine-and-tractor aggregate (2019) Engineering for Rural Development, 18, pp. 256-263.
15. Kaletnik, H., Bulgakov, V., Goncharuk, I., Ivanovs, S., Usenko, M. Results of experimental investigations of a flexible active harrow with loosening teeth (2019) Agronomy Research, 17 (5), pp. 1839-1845.
16. Kaletnik, H., Bulgakov, V., Goncharuk, T., Rucins, A., Dukulis, I., Pascuzzi, S. Research of the movement of agricultural aggregates using the methods of the movement stability theory (2019) Agronomy Research, 17 (5), pp. 1846-1860.
17. Kaletnik, H., Bulgakov, V., Ivanovs, S., Kuvachov, V. Investigation of running depth stability in soil of frontally installed plough of ploughing aggregate assembled according to “push-pull” scheme (2018) Engineering for

Rural Development, 17, pp. 292-300.

18. Kaletnik, H., Bulgakov, V., Nadykto, V., Ivanovs, S. Field experimental investigations of performance-and-technological indicators of operation of swath header asymmetric machine-and-tractor aggregate (2018) Engineering for Rural Development, 17, pp. 227-233.
19. Kromer K.-H., Strätz J. und Tschepe M. Technischer Stand der Zuckerrübenernte – Rodertest Seligenstadt 2000. Landtechnik 56 (2001), H. 2. – S. 78-79.
20. Merkes R. 50 Jahre Prodaktionstechnik im Zuckerrübenbau in Deutchland // Zuckerrübe. – 2001, №4. – S. 214-217.
21. Mikhalevich, V.M., Matvijchuk, V.A., Egorov, V.P., Kornet, I.F. Isothermal blades rolling. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo*. 1994, №3. P. 6–9.
22. Pankiv, V.R., Tokarchuk, O.A. Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor (2017) INMATEH - Agricultural Engineering, 51 (1), pp. 59-68.
23. Turych, V., Veselovska, N., Rutkevych, V., Shargorodskiy, S. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound (2017) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1-90), pp. 60-68.
24. A. Panchenko Operating Conditions' Influence on the Change of Functional Characteristics for Mechatronic Systems/ A Panchenko, A Voloshina, I Milaeva, P Luzan // Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations. Springer. – 2019/ - №7. – p.169-176
25. Багіров Б.М. Гидрофикация сельскохозяйственных машин/ Б.М. Багиров, Э.Б. Искендерзаде// Европейская академия естественных наук. Germany, Hannover – 2017 – 268с.
26. Гунько, І.В. Дослідження якості роботи гідравлічної системи привода доочисників головок цукрового буряку із гідравлічним приводом поперечних коливань рамки робочих органів/ Іванов М.І., Гунько І.В., Шаргородський С.А.// Техніка, енергетика, транспорт АПК. - 2017. - № 4 (99). - С. 98-103.
27. Гунько, І.В. Застосування гідроприводу поперечних коливань

доочисників гичкозбиральної машини. / А.С. Гунько, М.І. Іванов, І.М. Подолянин// Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин – Кировоград, 2011 – вип. 41, ч.1 – С. 217-223.

28. Іскович-Лотоцький Р.Д. Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводуми вібраційних та віброударних технологічних машин: монографія/ Р.Д. Іскович-Лотоцький, Р.Р. Обертюх, М.Р. Архипчук. – Вінниця: Універсум, 2008. – 171 с.
29. Іскович-Лотоцький Р.Д. Приводи автоматизованого устаткування. Навчальний посібник. Ч.ІІІ. / Р.Д. Іскович-Лотоцький, І.В. Севостьянов – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 80 с.
30. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.
31. Матвійчук В. А. Розвиток процесів локального деформування. Монографія / В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич. С. 339-363.Теорія та практика обробки матеріалів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя, вид. АТ «МоторСіч», 2016. – 522 с.
32. Матвійчук В. А., Бубновська І. А. Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «Круг – овал». *Обработка материалов давлением.* 2015. № 1(40). С. 35-39.
33. Матвійчук В.А., Колісник М.А. Розробка технологічного процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2021. № 1(112). С. 38-45.
34. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні

методом штампування обкочування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2018. № 3(102). С. 77-84.

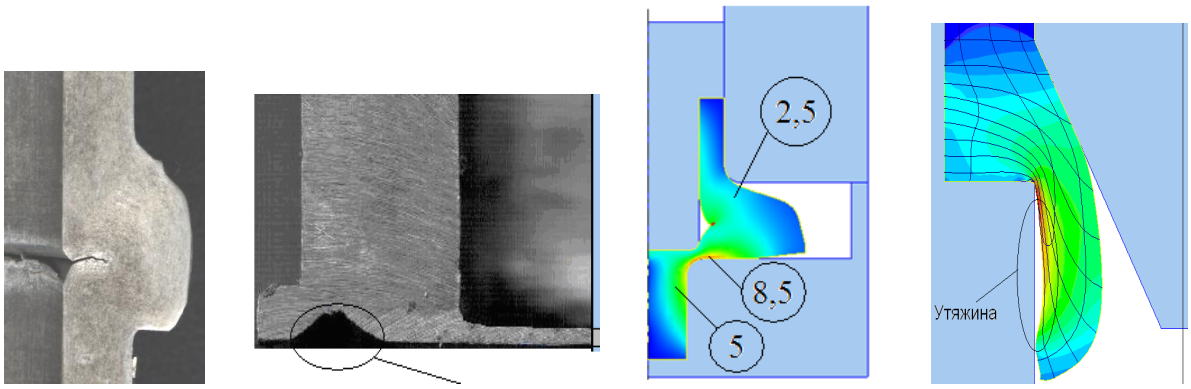
35. Матвійчук В.А., Любін М.В., Колісник М.А. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2018. № 4 (103). С. 56-63.
36. Панченко А.И. Основные направления гидрофикации мобильной техники / А.И. Панченко, А.А. Волошина, Ю.П. Обернихин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь. – 2013. – Вип. 13. – т.6. – с. 3-19.
37. Панченко, А.І. Перспективи гідрофікації мобільної сільськогосподарської техніки./ А.І. Панченко, О.Ю. Золотарьов, А.А. Волошина, Д.С. Тітов // Промислова гідравліка і пневматика. - 2003, - №1. - С.71-74.
38. Промышленная гидравлика. Компоненты и системные решения. //ПАРКЕР Ханнифин Корпорэйшн. – 2020 – 50с.
39. Середа Л.П., Подолянин І.М. Стійкість гідравлічної системи керування положенням ріжучого апарата машини БМ-6АГ //Весник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – Выпуск 42. –2002 - Т.2. – Київ, НТУУ «КПИ». – С. 6972.
40. Струтинський В. Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах: монографія/ В. Б. Струтинський, В. М. Дрозденко. – Київ: Основа-Принт, 2010. – 440 с.
41. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 616 с.
42. Струтинський В. Б. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: монографія / В. Б. Струтинський, О. В. Колот. – Краматорськ: ЗАТ «Тираж-51», 2005. – 530 с
43. Шаргородський, С.А. Дослідження стійкості роботи гідравлічної системи приводу доочисників голівок цукрового буряка із гідравлічним приводом поперечних коливань рамки робочих органів / М.І. Іванов, А.С. Гунько, С.А. Шаргородський// Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – м.Черкаси, 17-20 квітня 2012р. – С. 125 – 126.

44.Шаргородський, С.А. Моделювання роботи механізму приводу рамки гичкозрізальної машини. / А.С. Гунько, М.І. Іванов, С.А. Шаргородський // Збірник наукових праць ВНАУ – Вінниця, 2012 – вип. 10, т. 2(59) – С. 54-58.

ДОДАТКИ

Додаток А. Холодне об'ємне штампування

Установчі фізичні та комп'ютерні експерименти дозволяють виявити характер відхилень форми деталей, отриманих різними способами видавлювання.



а б в г

Рис. Д1. Дефекти форми типу утягнень у деталей, які отримані за різними технологічними схемами

Прогнозування утворення дефектів у вигляді утягнень при радіальному і прямому видавлюванні за допомогою МСЕ-моделей (див. рис. Д2 і рис. Д3) дозволяють встановити область раціональних параметрів деталей.

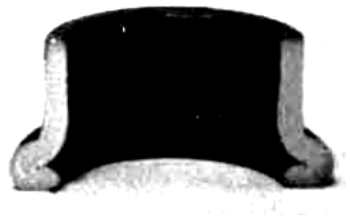
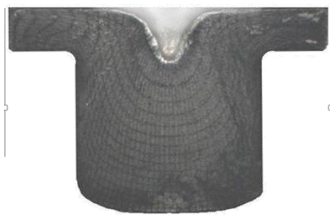
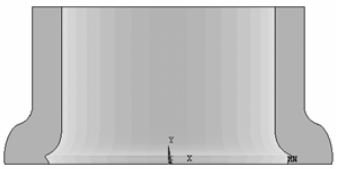
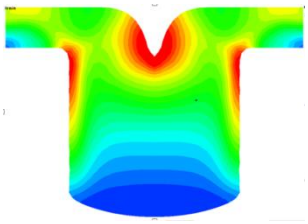
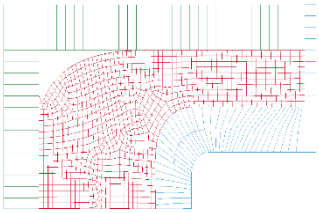
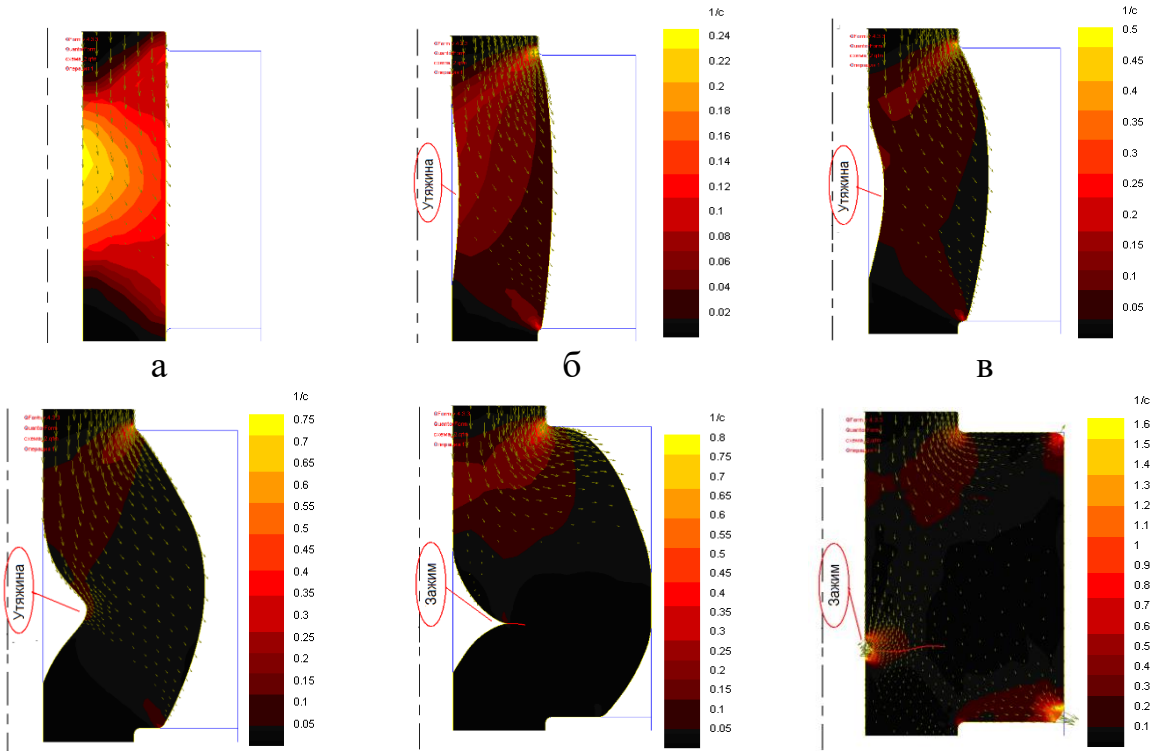
1	2	3
		
		

Рис. Д2. Зіставлення результатів експериментальних і комп’ютерних досліджень прогнозування дефектів типу утягнень



а б в

г д е

Рис. Д3. Послідовність утворення дефектів типу утягнень і складок в процесі радіального видавлювання фланця на порожнистій заготовці

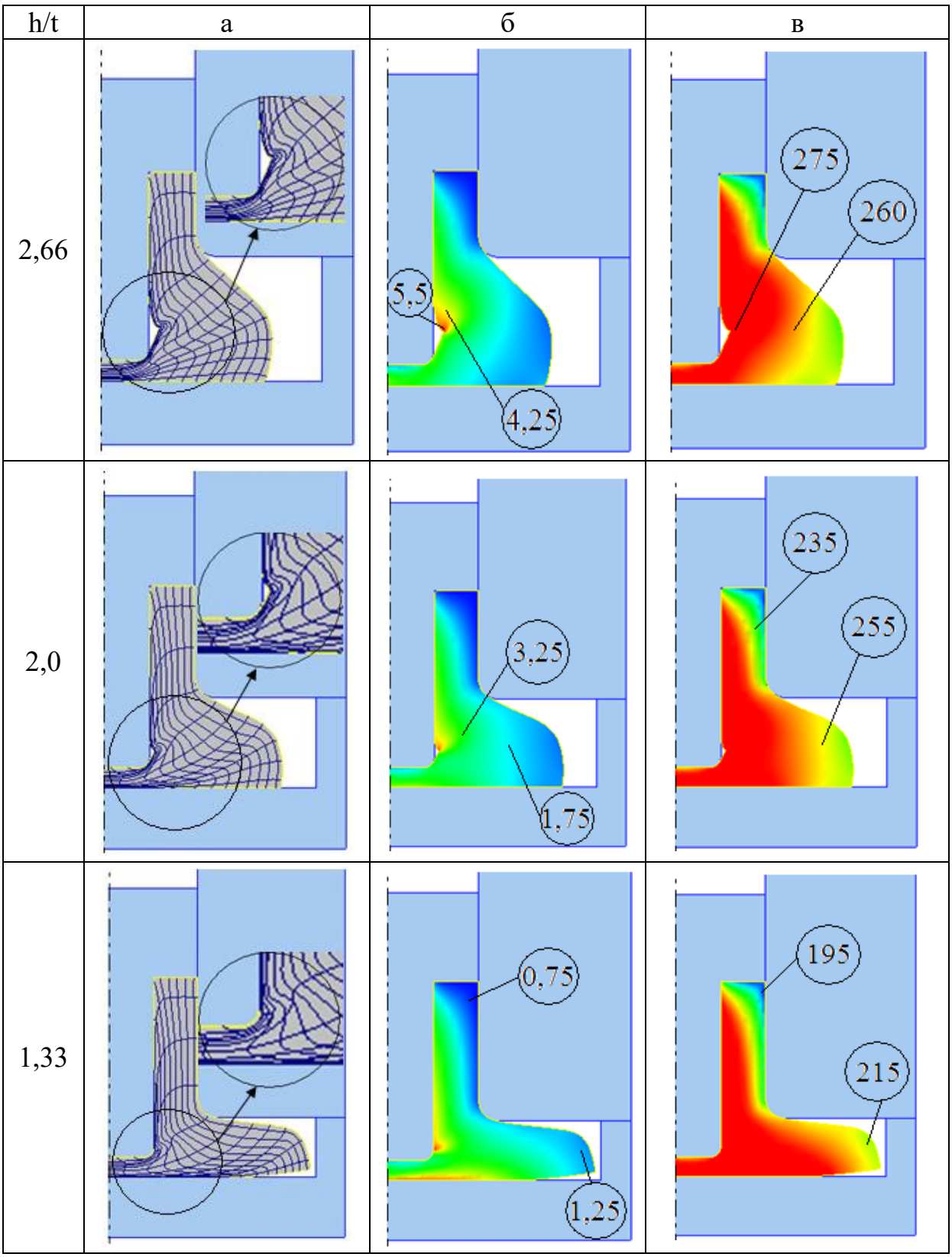


Рис. Д4. Деформування ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій (б) і інтенсивності напружень у МПа (в) при комбінованому видавлюванні

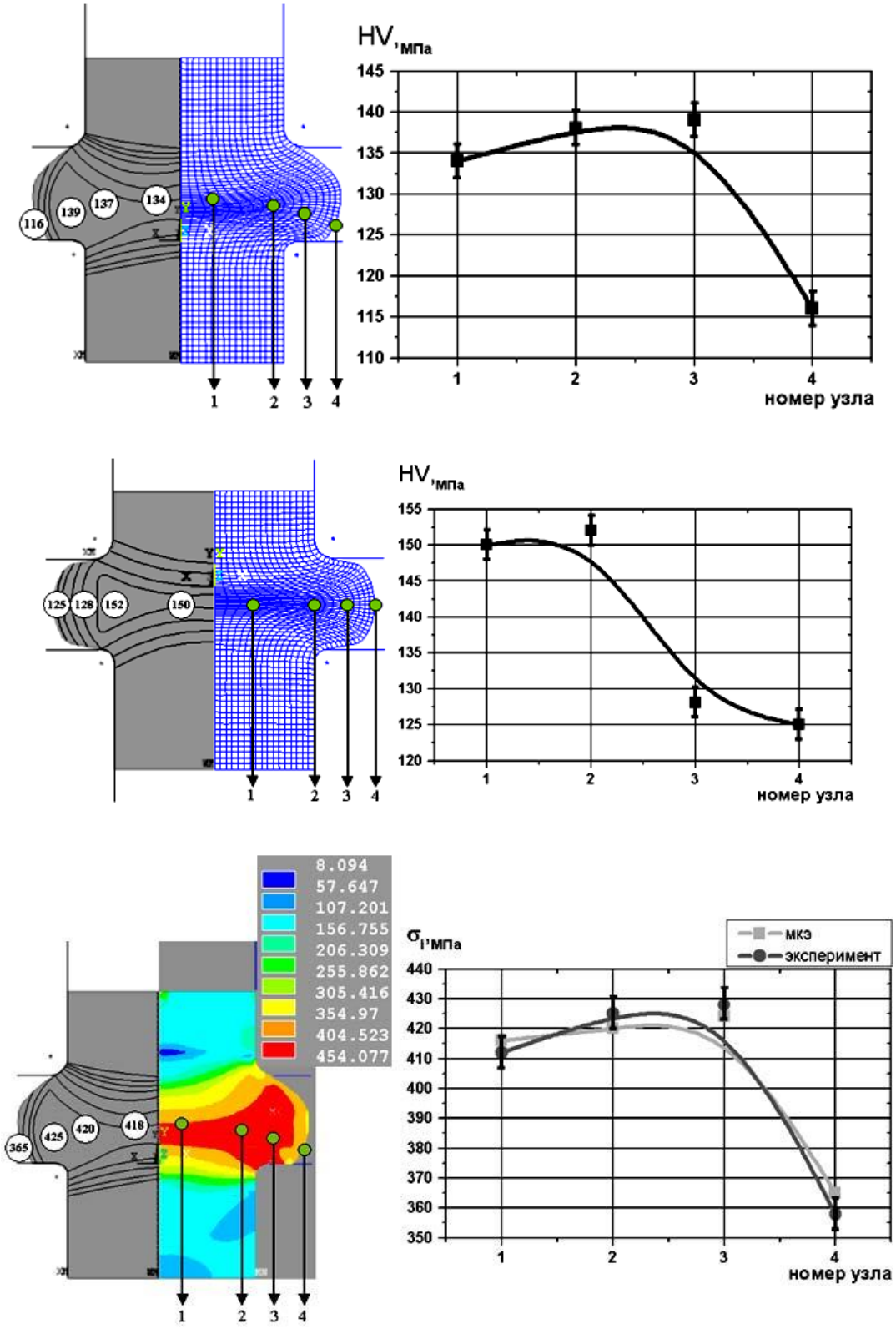


Рис. Д5. Аналіз напружено-деформованого стану при радіальному видавлюванні методами вимірювання твердості і МСЕ (аркуш 1)

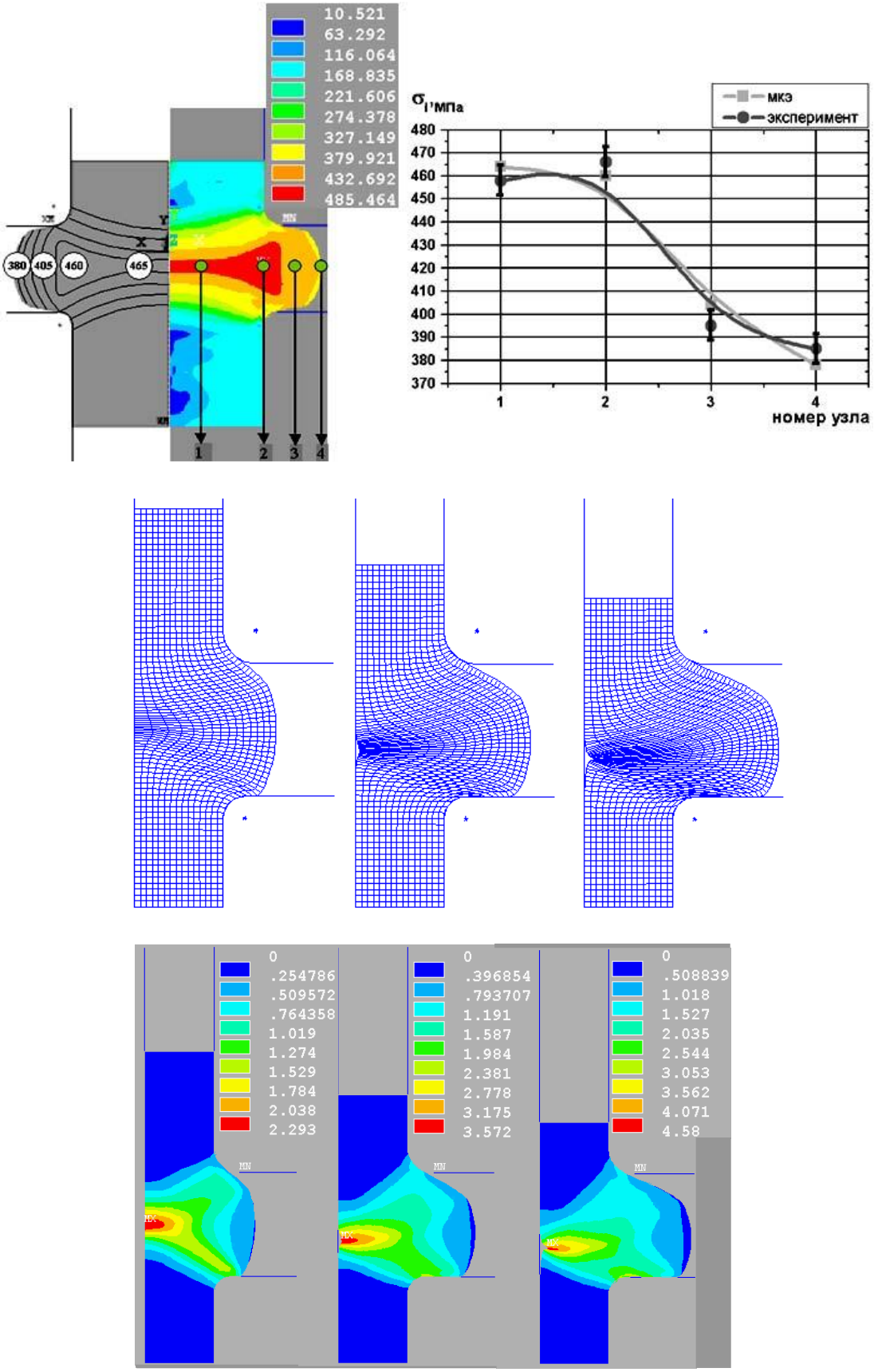
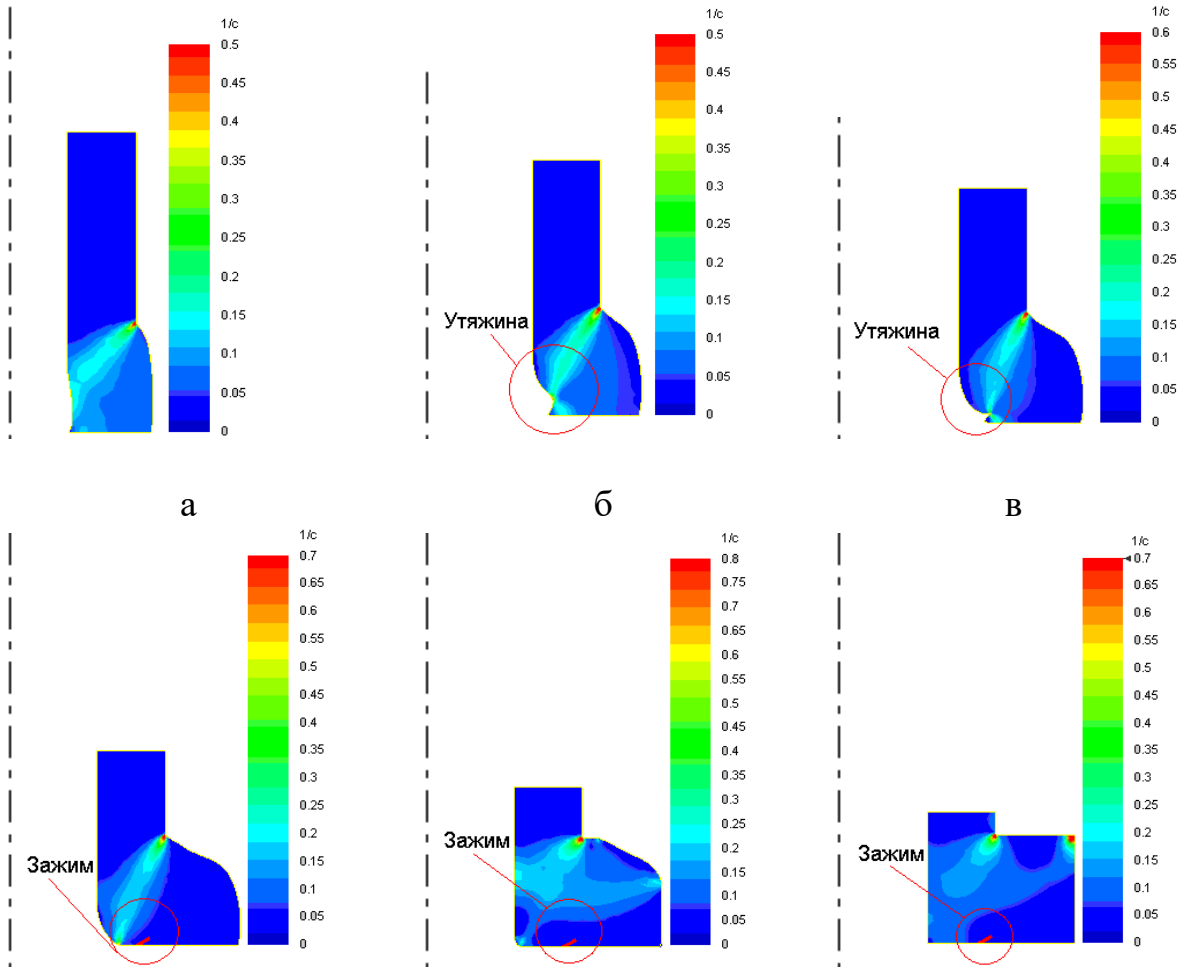


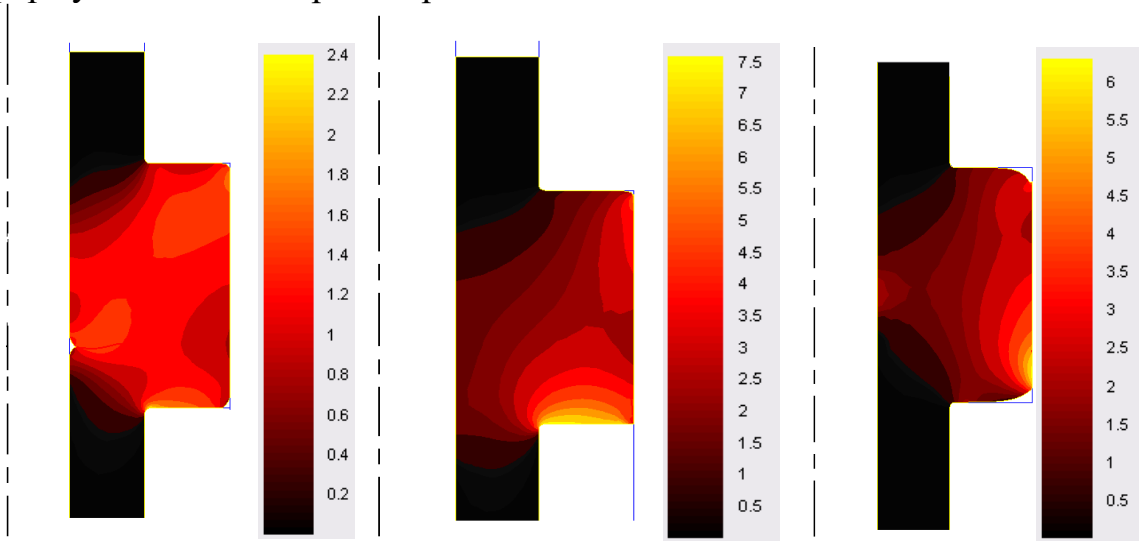
Рис. Д5. Аналіз напружено-деформованого стану при радіальному видавлюванні методами вимірювання твердості і МСЕ (аркуш 2)



а б в

г д е

Рис. Д6. Поля розподілу швидкості деформації по меридіональному перерізу заготовки в процесі радіального видавлювання



а б в

Рис. Д7. Розподіл логарифмічної деформації по перерізу заготовки на останній стадії радіального видавлювання

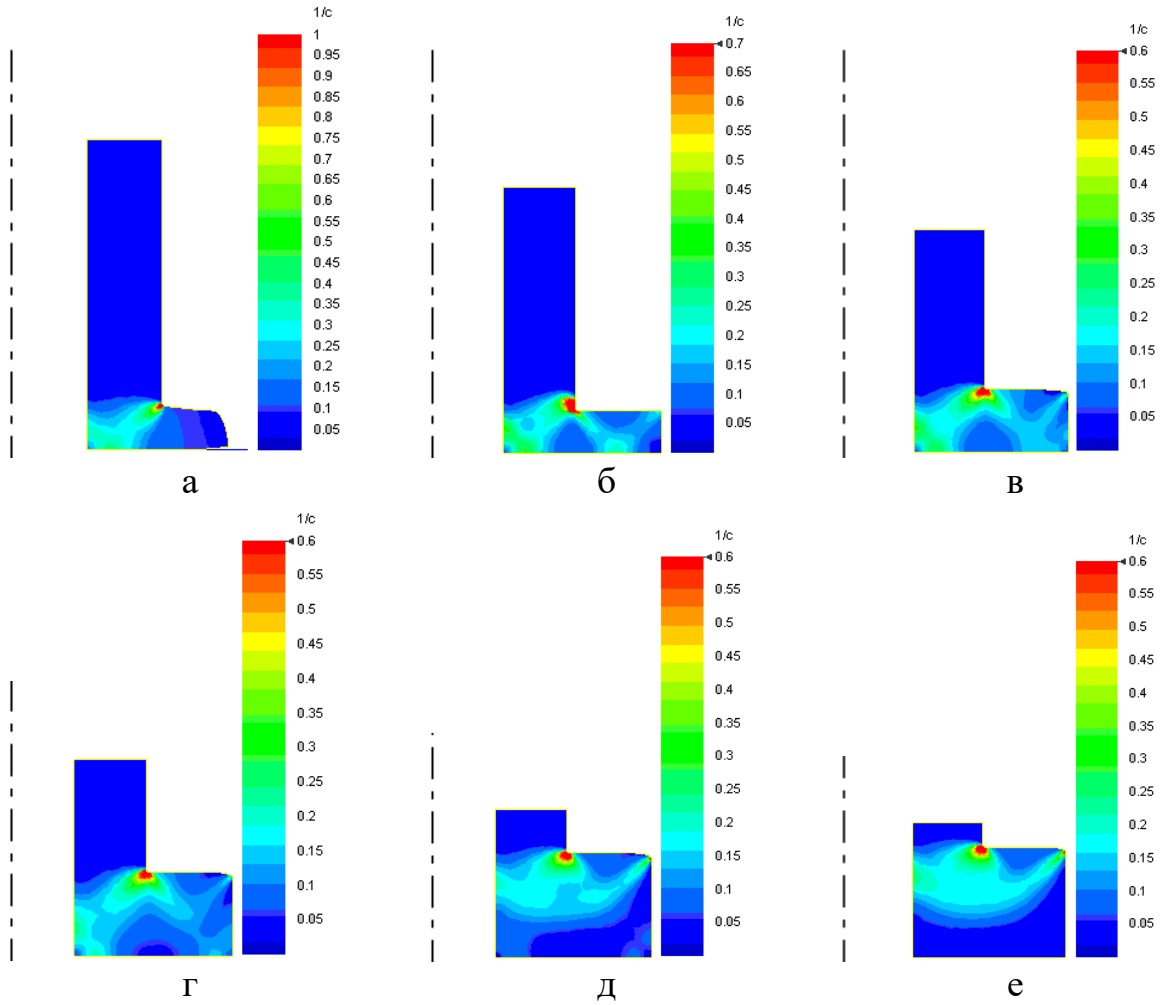


Рис. Д8. Поля розподілу швидкостей деформації по перерізу заготовки в процесі радіального видавлювання з підйомною напівматрицею

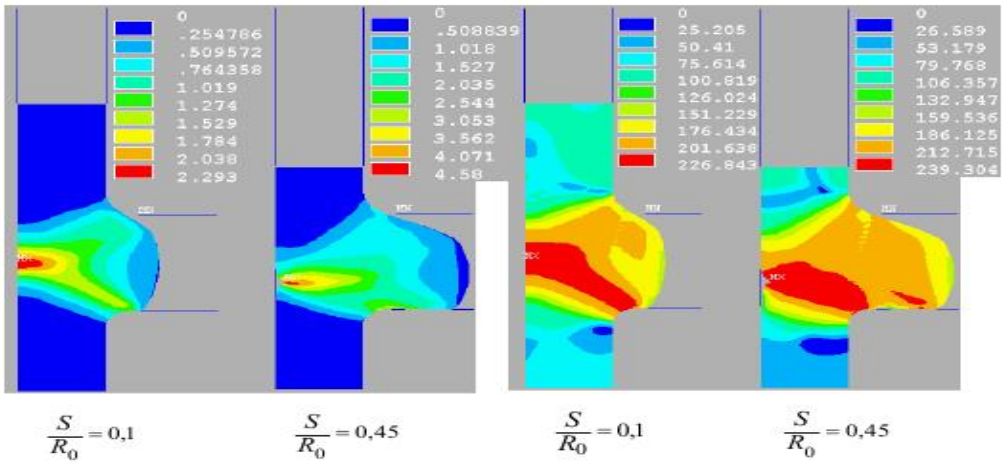


Рис. Д9. Розподілення інтенсивності деформацій (а) та інтенсивності напружень (б) на послідовних стадіях радіального видавлювання під час відносного ходу

Додаток Б. Холодне штампування обкочуванням

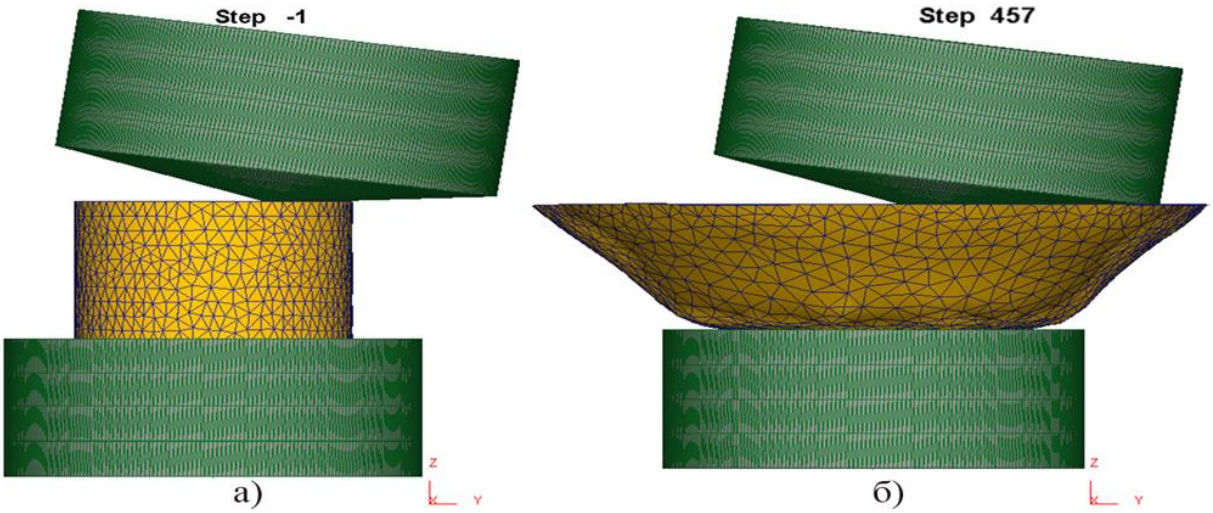


Рис. Д10. Розрахункова схема процесу ШО: а - вихідне положення; б - в момент установленої стадії

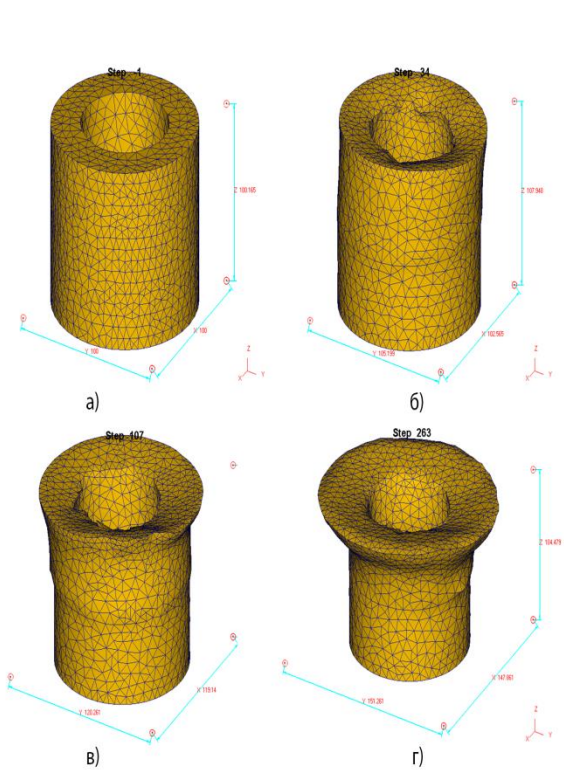


Рис. Д11. Формозміна трубної заготов при роздаванні методом ШО: а) початковий етап; б) на 34 кроці ШО; н на 107 кроці ШО; г) кінцевий крок деформування

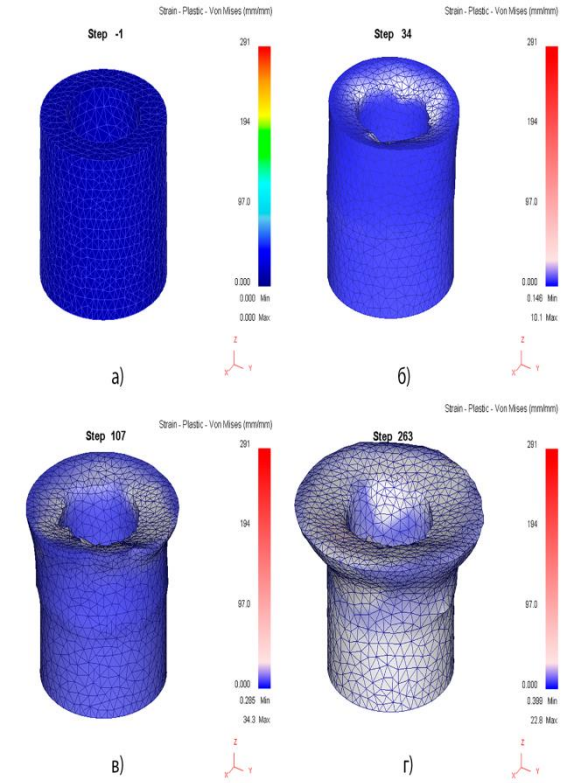


Рис. Д12. Розподілення накопиченої деформації в об'ємі трубної заготовки при ШО: а) початковий етап; б) на 34 кроці ШО; в) на 107 кроці ШО; г) кінцевий крок деформування

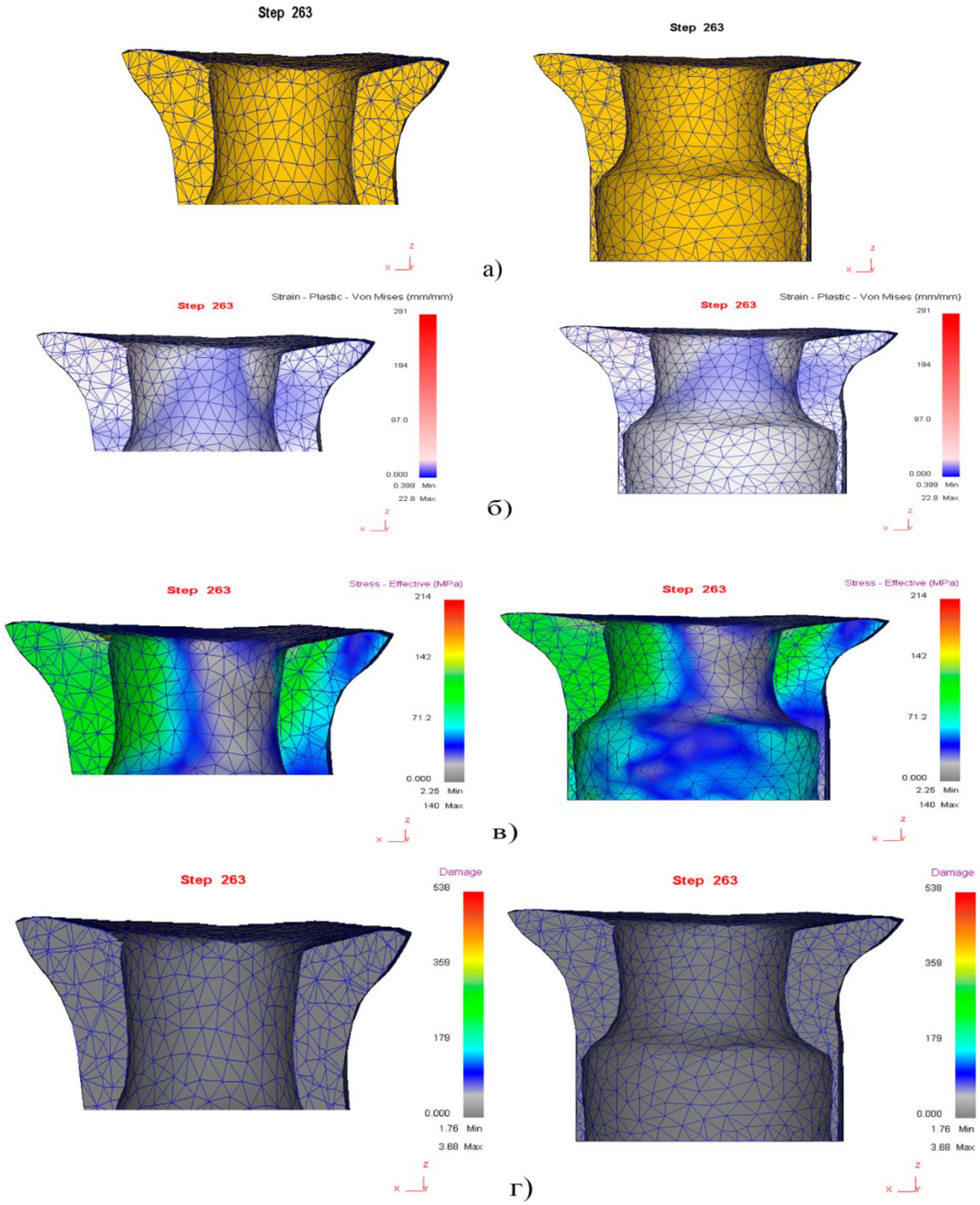
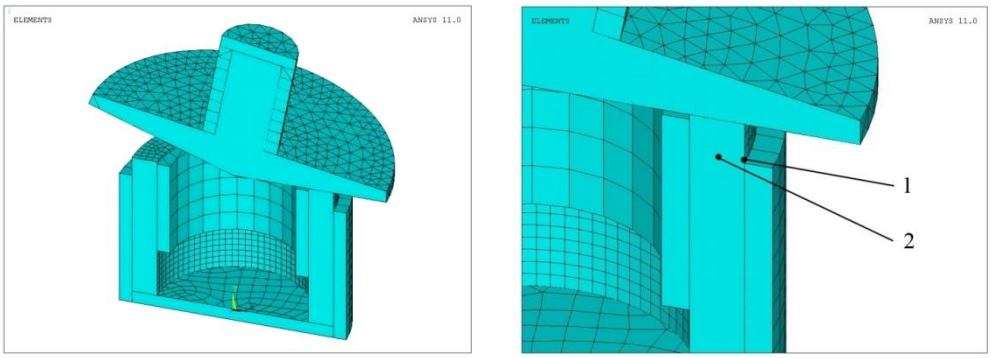
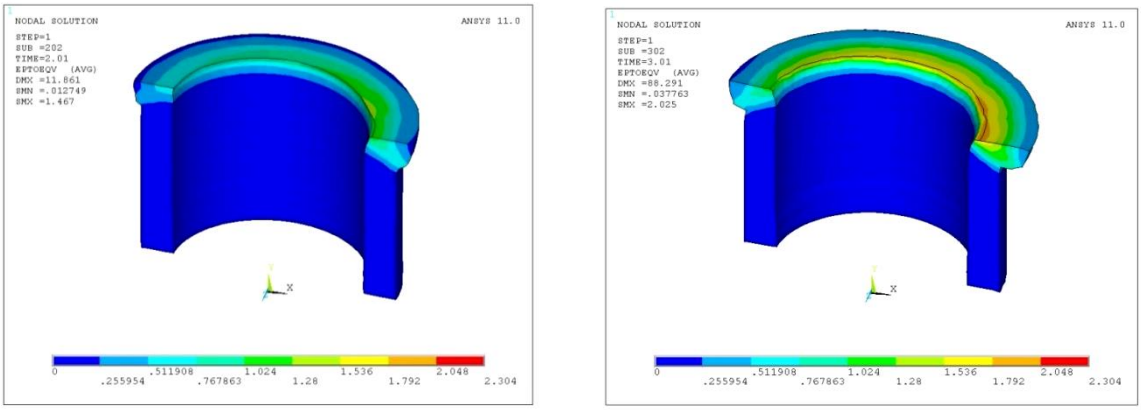


Рис. Д13. Формозміна а) та розподілення в меридіональному перерізі трубної заготовки на кінцевому етапі ШО накопиченої деформації б); інтенсивності напружень в); накопичених пошкоджень г)

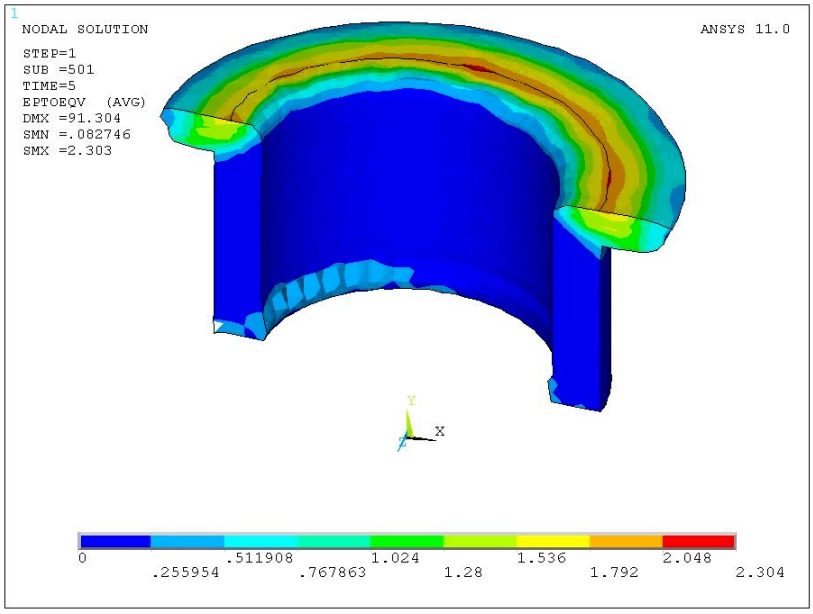


а) б)

Рис. Д14. Скінчено-елементна модель висаджування зовнішніх буртів штампуванням обкочуванням на трубній заготовці



а) б)



в)

Рис. Д15. Розподіл інтенсивності деформацій в перерізі зовнішнього бурта на різних стадіях висаджування методом штампування обкочуванням

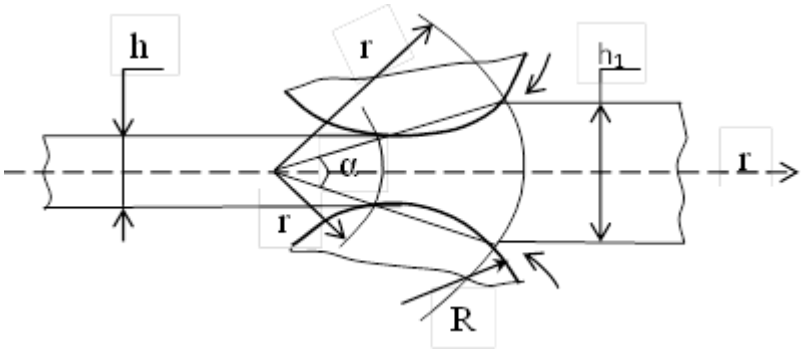


Рис. Д16. Схема зони деформації при вальцюванні

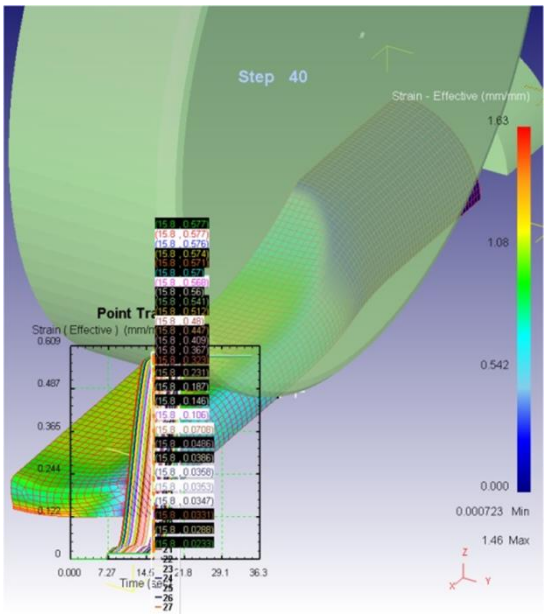
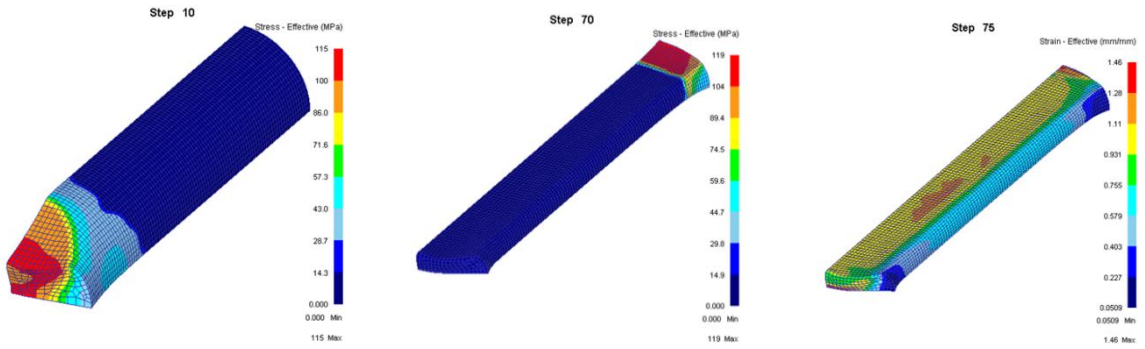


Рис. Д17. Моделювання формозмінення заготовки під час вальцювання



а) б) в)

Рис. Д18. Розподілення напружень в об’ємі циліндричного зразка на початковій а) і кінцевій б) та деформацій на кінцевій стадіях вальцювання

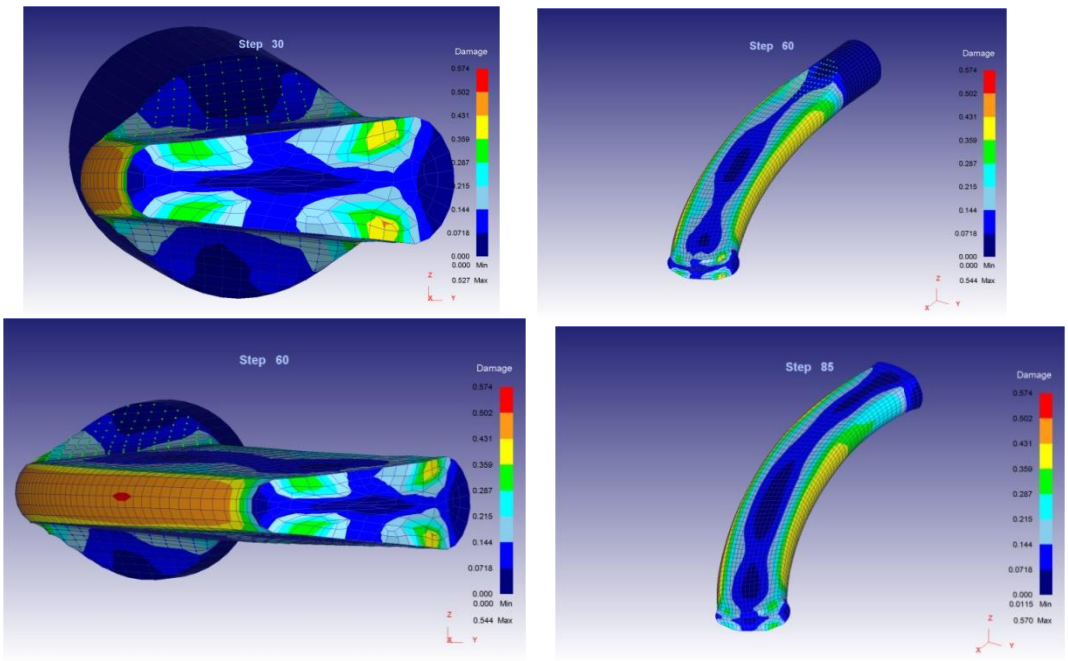


Рис. Д19. Переміщення часток матеріалу криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

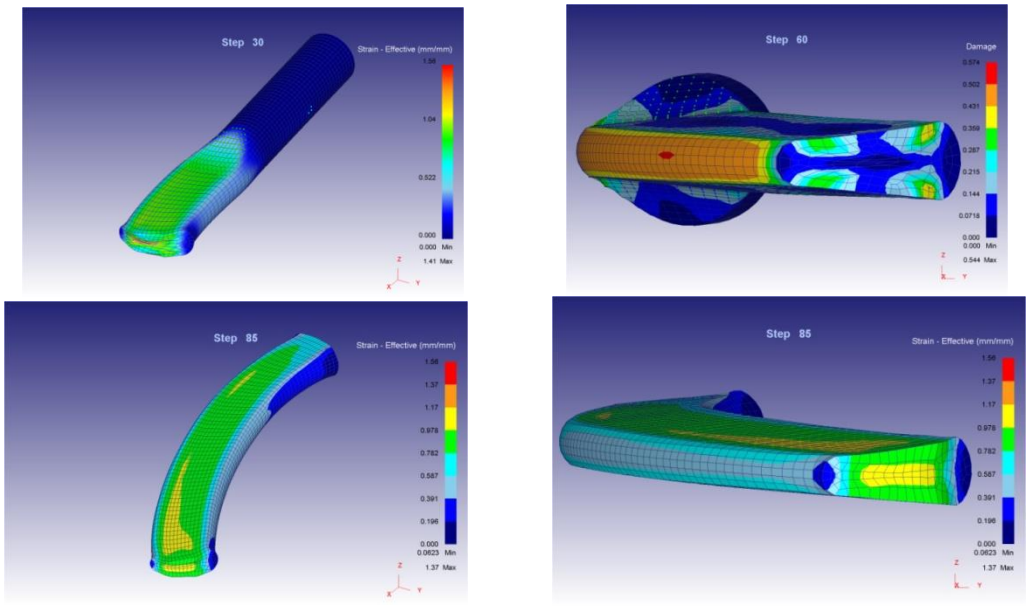


Рис. Д20. Інтенсивність деформацій матеріалу криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

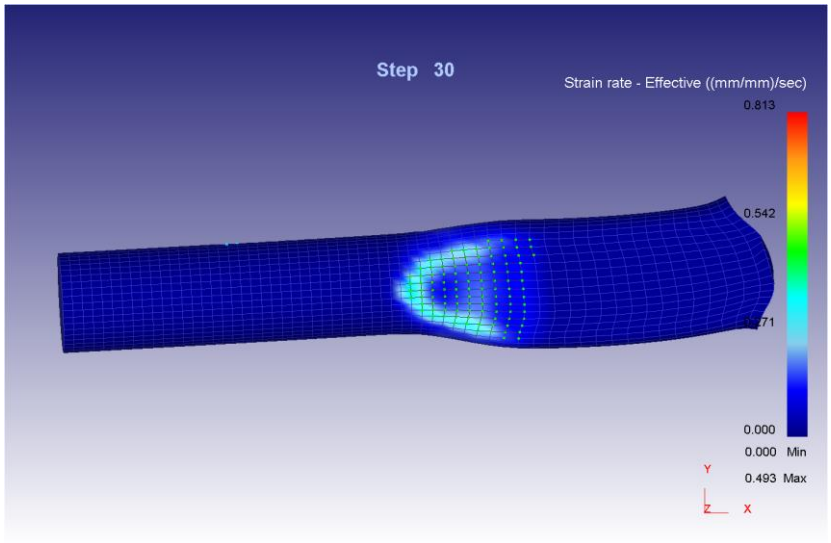


Рис. Д21. Інтенсивність швидкостей деформацій в пластичній зоні вальцьованої заготовки

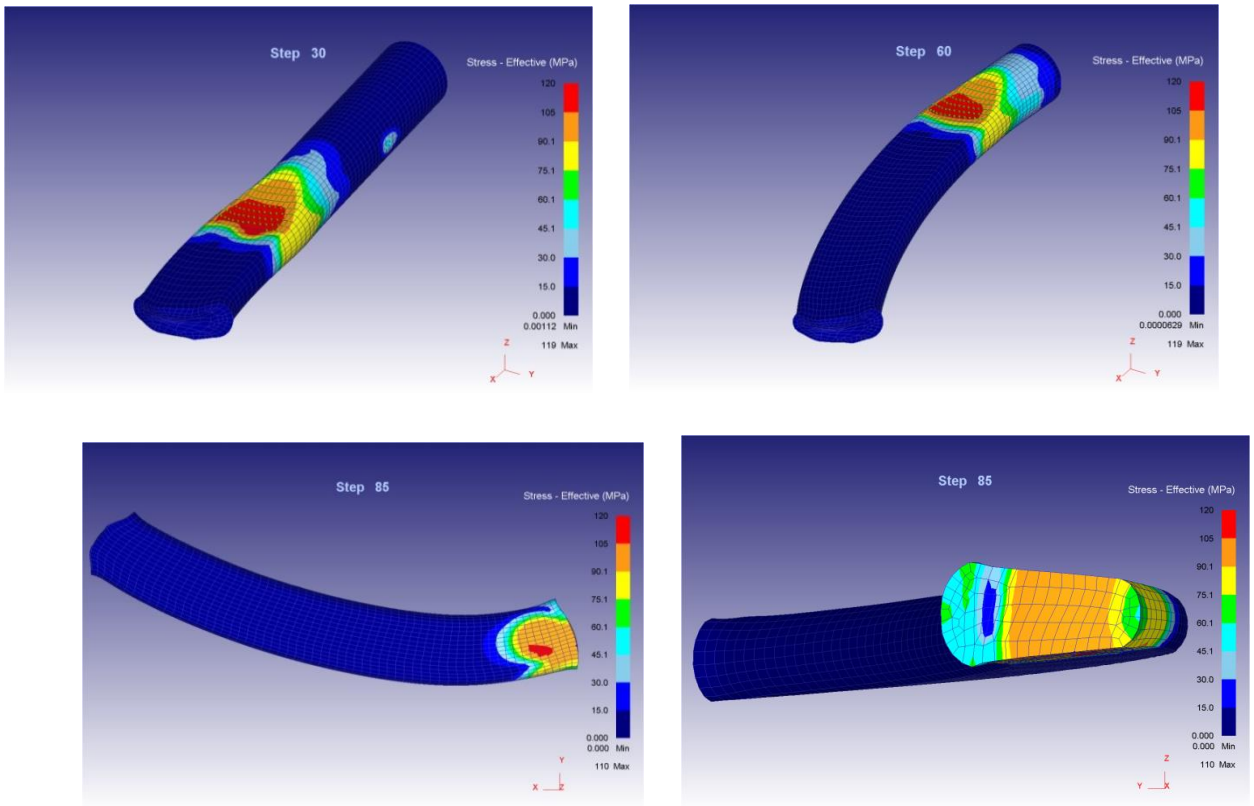


Рис. Д22. Інтенсивність напружень зон криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

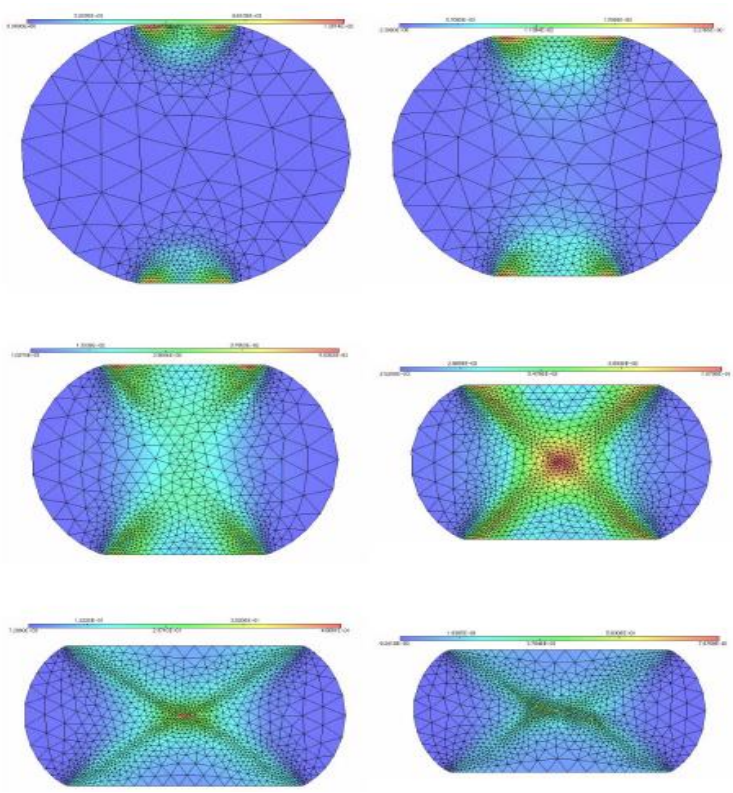
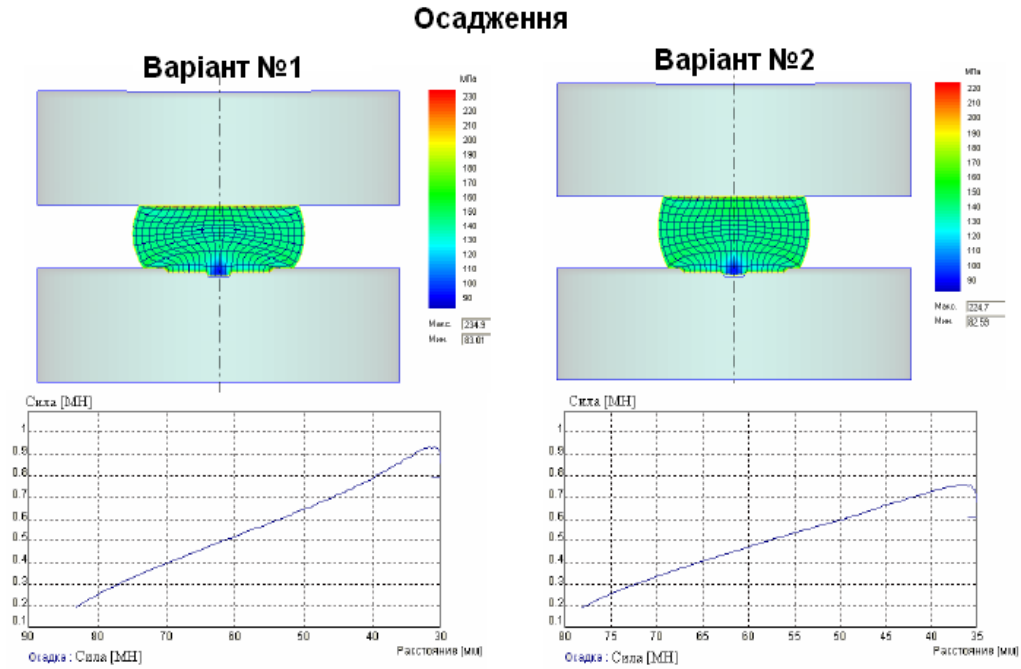


Рис. Д23. Адаптація перебудови сітки в об’ємі заготовки під час моделювання пресування диска



$P_д = 0{,}93$МН $A_д = 29$кДж $P_д = 0{,}76$МН $A_д = 21$кДж

Рис. Д24. Порівняння енергосилових параметрів процесів торцевого стиснення циліндричних зразків