Форма № 24

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний інститут, машинобудівний факультет
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Технологія машинобудування»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

на тему «Вдосконалення технології отримання заготовок з титану для деталей авіаційних двигунів»

Виконав: студент(ка) ІІ курсу, групи М-119м

Спеціальності 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Технології машинобудування»

Прусенко О.О.
(прізвище та ініціали)
Керівник Степанов Д.М.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Логомінов В.О.
(прізвище та ініціали)

2020

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет_Машинобудівний_____
Кафедра __Технологія машинобудування_____
Ступінь вищої освіти _другий (магістерський)_____
Спеціальність _131 «Прикладна механіка»_____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) _«Технології машинобудування»_____
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __С.І. Дядя_____
_____
«_____» _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

_____Прусенка Олександра Олександровича_____
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема проєкту (роботи)_____Вдосконалення технології отримання заготовок з титану для деталей авіаційних двигунів _____
_____
керівник проєкту (роботи)_Степанов Д.М., канд. техн. наук, доцент,_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «_03__»____12____2020___року №368_
2. Строк подання студентом проєкту (роботи)___05.12.2020 р._____
3. Вихідні дані до проєкту (роботи)_Практичне доведення ефективності отримання або обробки заготовок методом ГІП. _____
_____
_____
_____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)_1) Аналіз наукової літератури. 2) Методика виконання досліджень. 3) Розробка техпроцесу двостадійного ізостатичного пресування. 4) Практичне застосування. 5) Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях._____
_____
_____
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
_Презентація – 24 плакати_____
_____
_____
_____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	Степанов Д.М. к.т.н., доцент		
5	Шмирко В.І. к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Гермашев А.І. к.т.н., доцент		
Рецензія	Логомінов В.О. к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «__01__» _____вересня_____2020_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технології ізостатичного	01.09.2020	
	пресування порошкового титану		
2	Методика гарячого ізостатичного пресування	07.09.2020	
	заготовок з попереднім формуванням вихідних		
	заготовок холодним ізостатичним пресуванням		
3	Розробка техпроцесу гарячого ізостатичного	01.10.2020	
	пресування заготовок з попереднім формуванням		
	вихідних заготовок холодним ізостатичним		
	пресуванням		
4	Практичне застосування	19.10.2020	
5	Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	02.11.2020	
6	Оформлення ПЗ та презентації.	16.11.2020	
7	Нормоконтроль і рецензія.	04.12.20	
8	Захист дипломного проєкту.	10.12.20	

Студент(ка) _____ ___Прусенко О.О.___
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ ___Степанов Д.М.____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 103 с., 19 табл., 47 рис., 59 джерел.

ГАРЯЧЕ ІЗОСТАТИЧНЕ ПРЕСУВАННЯ, ПРЕСУВАННЯ, ГІДРОСТАТИЧНЕ ПРЕСУВАННЯ, ПОРОШКОВИЙ ТИТАН, ГУБЧАСТИЙ ТИТАН, ТВЕРДІСТЬ, ЩІЛЬНІСТЬ, ДЕГАЗАЦІЯ, ВІДПАЛ, УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ, ПРЕС-ФОРМА.

Об'єкт дослідження – вироби виготовлені ізостатичним пресуванням.

Мета роботи – полягає у практичному доведенні ефективності отримання або обробки заготовок методом ГІП для деталей авіаційних двигунів, підтвердження покращення властивостей матеріалу після ГІП, зображення доступності та переваг даного методу отримання заготовок та деталей.

Методи дослідження – експериментальний; науково-дослідний; розрахунково-аналітичний; наукове моделювання.

В роботі викладені результати наукових досліджень отримання заготовок методом ГІП та виконано вдосконалення технології холодного і гарячого ізостатичного пресування порошкового титану.

Задачі дослідження:

- дослідити отримання електродних та трубних заготовок з різних вихідних матеріалів двостадійним (холодним та гарячим) ізостатичним пресуванням;

- уточнити конкретні параметри холодного та гарячого пресування і нагріву заготовок в залежності від властивостей вихідної шихти;

- створити технологію виготовлення експериментальної партії заготовок;

- встановити вимоги до вихідної шихти;

- довести ефективність ізостатичного пресування для отримання і обробки заготовок та деталей.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні познаки…….. 8

Вступ……. 10

1 Аналіз технології ізостатичного пресування порошкового титану…. 11

1.1 Використання технології ізостатичного пресування…… 12

1.2 Висновки……. 21

2 Методика гарячого ізостатичного пресування заготовок з попереднім формуванням вихідних заготовок холодним ізостатичним пресуванням…… 22

2.1 Принцип технології ізостатичного пресування……. 22

2.2 Установки для ізостатичного пресування та принцип їх роботи... 22

2.3 Вироби для досліджень ……..…….. 25

2.4 Методика проведення дослідження …… 25

2.5 Висновки……..... 26

3 Розробка техпроцесу гарячого ізостатичного пресування заготовок з попереднім формуванням вихідних заготовок холодним ізостатичним пресуванням…… 27

3.1 План проведення експерименту……... 28

3.2 Проведення експериментальних досліджень……..……... 29

3.2.1 Холодне ізостатичне пресування…….…….. 29

3.2.2 Гаряче ізостатичне пресування…….. 31

3.3 Дослідження властивостей заготовок після ГІП……... 33

3.4 Аналіз отриманих даних та технологічні рекомендації……... 39

3.5 Технологія виготовлення експериментальних партій заготовок… 39

3.5.1 Гідростатичне пресування електродних заготовок……. 40

3.5.2 Гідростатичне пресування трубних заготовок……. 40

3.5.3 Підготовка проміжних електродних заготовок до ГІП……... 41

3.5.4 Підготовка проміжних трубних заготовок до ГІП……... 41

3.5.5 Нагрів заготовки під ГІП……. 42
3.5.6 ГІП заготовок……..……. 43
3.5.7 Охолодження заготовки…….. 43
3.5.8 Виймання заготовки……. 43
3.6 Висновки…….. 44
4 Практичне застосування……. 45
4.1 Порівняння ХІП та ГІП з литтям та куванням……... 45
4.2 ХІП та ГІП з адитивними технологіями……. 49
4.3 Техніко-економічне обґрунтування вибору виду та методу отримання заготовки……. 52
4.4 Аналіз міцності деталі з порошкового титану……... 59
4.5 Застосування ізостатичного пресування…… 71
4.6 Висновки…….. 76
5 Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях……. 77
5.1 Аналіз потенційних небезпек……... 77
5.2 Заходи по забезпеченню безпеки……. 79
5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці…... 81
5.3.1 Вибір системи освітлення та визначення рівня нормованої освітленості……. 82
5.3.2 Вибір джерела світла та типу світильника…… 82
5.3.3 Оцінка коефіцієнта запасу та коефіцієнта нерівномірності освітлення…… 82
5.3.4 Чисельне значення індексу приміщення……... 83
5.3.5 Значення коефіцієнта використання світлового потоку……. 84
5.3.6 Визначення світлового потоку лампи та загальної кількості світильників…… 84
5.3.7 Визначення загальної розрахункової освітленості у приміщенні. 86
5.3.8 Розрахунок загальної потужності освітлюваної установки…… 86
5.3.9 Ескіз розташування світильників на плані приміщення…….. 87

5.4 Заходи з пожежної безпеки……... 89
5.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях…….. 90
5.6 Висновки…….. 95
Висновки……... 96
Перелік джерел посилання……. 97

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АТ	Адитивні технології
ГІП	Гаряче ізостатичне пресування
ГОСТ	Державний стандарт
ДБН	Державні будівельні норми
ДСанПіН	Державні санітарні правила і норми
ДСН	Державні санітарні норми
ДСНС	Державна служба України з надзвичайних ситуацій
ДСП	Державні санітарні правила
ДСТУ	Державний стандарт України
ЗТМК	Запорізький титано-магнієвий комбінат
ЛЛ	Лампа люмінесцентна
ЛХБ	Лампа холодно-білого світла
МВС	Міністерство внутрішніх справ
МОЗ	Міністерство охорони здоров’я
НАПБ	Нормативний акт з пожежної безпеки
НПАОП	Нормативно-правовий акт з охорони праці
ОП	Охорона праці
ПВЛ	Пило-волого захищений світильник
ПК	Персональний комп’ютер
ПТЕК	Порошок титановий електролітичний крупний
ПУЕ	Правила улаштування електроустановок
РЗР	Розряд зорових робіт
СНиП	Будівельні норми і правила
ССБТ	Система стандартов безопасности труда
ТГ-ТВ	Титан губчатий твердий
ТО	Термообробка

УХІП	Установка холодного ізостатичного пресування
ХІП	Холодне ізостатичне пресування

ВСТУП

У дипломній роботі розглянуто метод отримання заготовок з порошків титану ізостатичним пресуванням, який можна впровадити у виробництво деталей для авіаційних двигунів та інших вузлів.

У ході виконання дипломної роботи було розроблено: обладнання, технологічну оснастку і технологію ГІП виробів з порошків титану включаючи низькосортні відсіви ТГ-ТВ.

Роботи в реальному часі направлені на розширення номенклатури виробів, отриманих методом ГІП і розширення сировинної бази вихідних матеріалів, а також збільшення якості готових виробів [1]. Це буде досягнуто за рахунок розробки більш досконалих конструктивних і схемних рішень вузлів і систем раніше створеного обладнання, а також дослідження двостадійної технології ГІП з метою оптимізації технологічних прийомів та їх параметрів і удосконалення використовуваної оснастки. Розробити технологію отримання витрачених електродів для фасонного лиття з сировини, використовуваного на ЗТМК, яка не включає операцію первинного переплаву та механічного різання, яка відповідає вимогам, які поставлені перед титановим литтям. Розробити технологію отримання трубних заготовок з показником ударної в’язкості не менше ніж $250\ кДж/м^2$. Провести розрахунок на економічну ефективність методу та розрахунок на міцність для подальшого порівняння з іншими методами виробництва виробів.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКОВОГО ТИТАНУ

1.1 Використання технології ізостатичного пресування

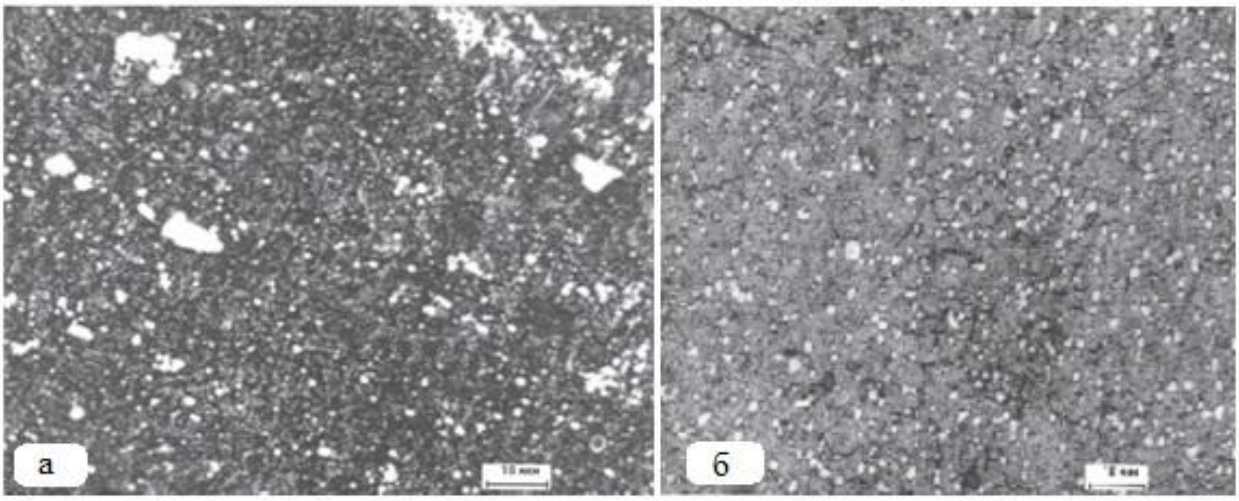
Титан використовують в авіації, космічній техніці, автомобілебудуванні, медичній та інших галузях сучасності. Це визначено унікальними властивостями матеріалу: легкістю, міцністю, зносостійкістю та довговічністю. Титанові сплави та порошки є актуальним матеріалом для багатьох областей застосування і широко використовуються для виготовлення деталей машин [2].

Завдяки глибокому вивченню фізичних процесів, розвитку технологій в XX столітті з’явилась нова технологія обробки матеріалів під тиском. Вона отримала назву ізостатичне пресування і її суть у барометричній обробці предметів, розміщених у стиснутому газі або рідині.

Протягом багатьох років ведуться роботи по зменшенню циклу газостатування за рахунок зменшення часу допоміжних операцій. Один з варіантів «швидкого» ГІП є завантаження в газостат гарячої капсули і подача рідкого азоту в циліндр високого тиску. Цим досягається різкий зріст тиску в циліндрі. Все це дозволило значно знизити вартість ГІП методом газостатування [3].

В 1970-ті роки були розпочаті роботи по металургії гранул з використанням ГІП для виготовлення виробів з жароміцних нікелевих сплавів. Приблизно в цей же час проводилися дослідження з розробки порошкових інструментальних сталей, які завершилися створенням на заводі «Дніпроспецсталь» виробництва порошкових швидкорізальних сталей. Це виробництво базується на шведському обладнанні і технології ГІП [3]. Мікроструктура пресованих виробів з розпорошених металевих порошків відрізняється особливо високою дисперсністю і однорідністю, а пресований матеріал має підвищену міцність і в'язкість. Як приклад на рисунку 1.1 порівнюються мікроструктури стандартної і порошкової швидкорізальної сталі. Металорізальний інструмент з порошкових сталей

перевершує за стійкістю у 1,5-2 рази аналоги зі стандартних сталей того ж хімічного складу.



а – стандартна мікроструктура; б – порошкова мікроструктура

Рисунок 1.1 – Мікроструктура швидкорізальної сталі Р6М5 (світлі виділення – карбідна фаза) [3]

На рисунку 1.2 зображено корпус клапана для морських плавучих платформ (фірма Metso) виготовлений з використанням технології ГІП. Матеріал – порошкова корозійностійка сталь, маса від 250 до 2000 кг [3]. Переваги: підвищена міцність в порівнянні з литтям, простота ультразвукового контролю, відсутність зварювання, невеликий обсяг механічної обробки.

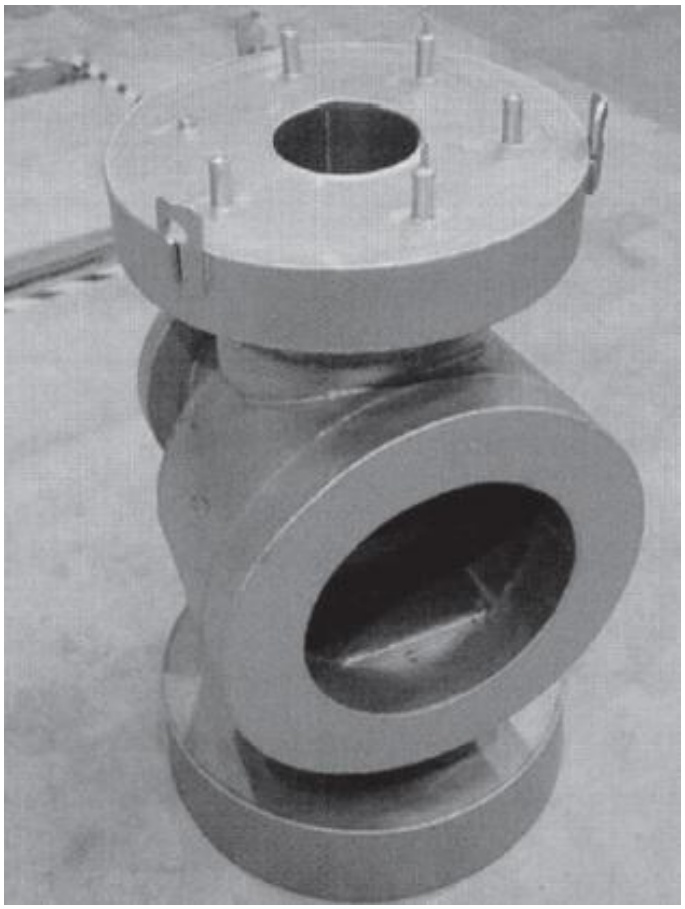


Рисунок 1.2 – Корпус клапана [3]

На рисунку 1.3 зображена сорочка валу для виробництва паперу (фірма Metso) виготовлена з використанням технології ГІП. Матеріал – корозійностійка сталь. Маса – до 50 т (з декількох секцій, діаметр до 1,7 м, довжина – до 11 м (після зварювання секцій)) [3]. Переваги – висока втомна міцність, високий опір корозії, низький рівень залишкових напружень.

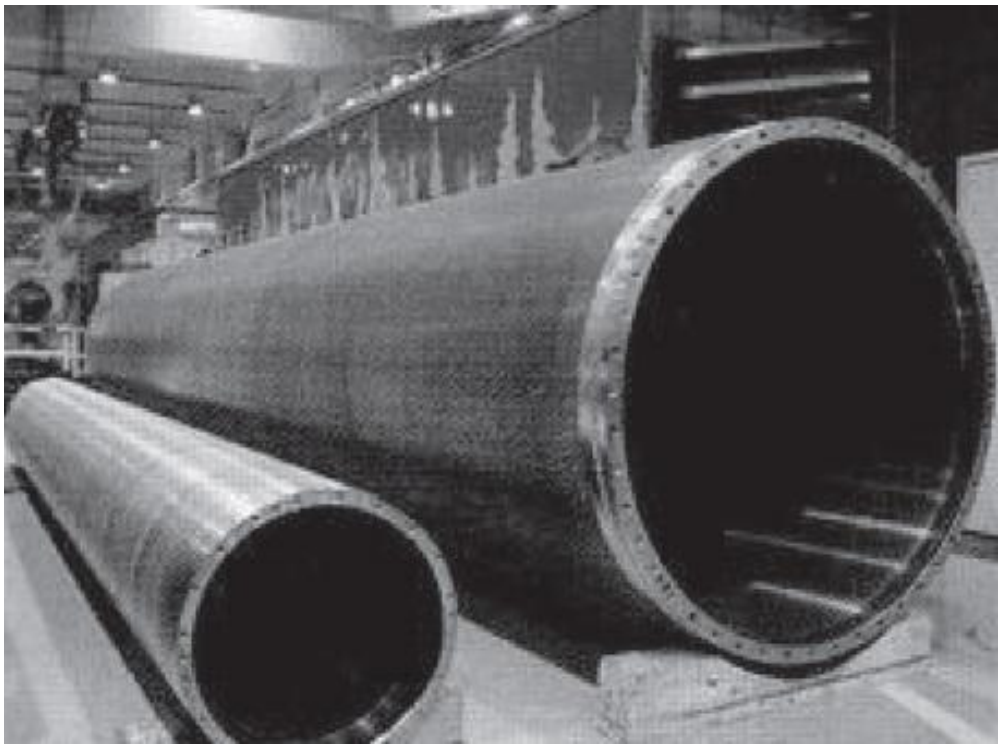


Рисунок 1.3 – Сорочка валу для виробництва паперу [3]

Ізостатичне пресування, в основі якого лежить закон Паскаля, дозволяє помістити матеріал у робочу середу, на яку діє тиск. Матеріал піддається стисненню, створюється пресовка, яка має форму аналогічну з заготовкою, але менших розмірів. Ця технологія дозволяє отримати матеріали з гомогенною мілкозернистою структурою, без сегрегацій, з високими характеристиками міцності. ГІП дозволяє значно підвищити, у порівнянні з іншими способами отримання заготовок, коефіцієнт використання матеріалу [4].

Останнім часом у багатьох галузях промисловості спостерігається зростаючий попит на складнолеговані титанові сплави, які володіють унікальним комплексом фізико-механічних властивостей.

Економічно вигідно виробляти такі сплави і вироби з них методом високотемпературного синтезу з гетерогенних порошкових сумішей. Однак після синтезу сплави і вироби мають залишкову пористість, яка суттєво погіршує їх пластичність. Найефективнішим способом усунення пористості без зміни структури є обробка сплавів і виробів за допомогою ГІП [5].

Для покращення характеристик пористих імплантів шляхом формування анізотропної порової структури з підвищеною пористістю і розмірами пор для забезпечення зростання кісткової тканини з поверхнею пор на значній глибині, можна використовувати метод пресування імпланту з губчастого порошку титану в закритій матриці зі сталевим пуансоном з еластичним облицюванням з поліуретану. Імпланти отримані таким методом мають пористість яка забезпечує краще зростання кісткової тканини з імплантом [6].

Доведено, що застосування губчастих порошків титану для отримання з них пористих імплантатів дозволяє забезпечити за рахунок особливостей мікро і наноструктури пір підвищену гемо та біосумісність виробів. Морфологію поверхні порошку вивчали за допомогою простого скануючого електронного мікроскопа з високою роздільною здатністю «Mira» з мікрорентгеноспектральним аналізатором «INCA Energy 350». Підтверджено, що така структура пір імплантатів сприяє приростанню кісткової тканини до зовнішньої і внутрішньої поверхні порового простору. Товщина оксидної плівки на поверхні губчастих частинок порошку титану марки ТПП досягає 80 – 100 нм, що підвищує гемо і біосумісність виробів з таких порошків [6].

Використання бюгельного протеза з базисом, виготовленим із сплаву титану є альтернативою лікування пацієнтів при частковій адентії з обтяженим алерго анамнезом. Це дозволяє відновити жувальні функції і усунути токсиконепереносимість. Застосування сплавів титану в ортопедичній стоматології вельми перспективно, в тому числі і у пацієнтів з обтяженим алергологічним анамнезом [7].

До клініки звернулася пацієнтка зі скаргами на печіння і сухість в ротовій порожнині, металевий присмак, порушення смаку, висипання навколо рота. З анамнезу було виявлено, що до цього хвору двічі протезували бюгельними протезами з золотого сплаву, якими вона користувалася протягом 4 років. Ці протези її повністю задовольняли, алергічних реакцій і печіння не було. Чотири роки тому було проведено протезування за допомогою бюгельного протеза на нижню щелепу з кобальт-хромового славу. При вивченні алергологічного

анамнезу було встановлено, що у пацієнтки є алергія на ряд лікарських речовин. В результаті були виявлені корозійні зміни базису протеза, виготовленого з кобальт-хромового сплаву. Сукупність даних, отриманих під час обстеження пацієнтки, дозволила констатувати наявність токсико алергічного стоматиту.

Пацієнтці були виготовлені нові протези з титанового сплаву, після попереднього проведення компресним скаріфікаціонних проб з титановим алергеном, на які було отримано негативний результат. Під час повторних контрольних оглядів через 3, 5, 10, 30 днів після протезування ніяких неприємних відчуттів в порожнині рота пацієнтка не відзначала, патологічні зміни слизової оболонки порожнини рота були відсутні [7].

Зміна матеріалу основи для феморального компонента (заміна сплаву CoCr28Mo6 на Ti-Al-V) не погіршує міцності властивостей як самого компонента, так і ендопротеза (рисунок 1.4) в цілому. Оскільки, сплав Ti-Al-V володіє кращими характеристиками біосумісності з організмом людини, ніж сплав CoCr28Mo6, вказана зміна вважається виправданою [8].

Рисунок 1.4 – Протез колінного суглобу [8]

Використання титанових протезів для стапедопластики - відносно новий метод (1993 р.), що показав чудові результати в Німеччині та інших країнах Європи. Титан об'єднує властивості гарної біосумісності і оссеоінтеграції; за рахунок делікатної форми протезів відзначені хороші механічні властивості для передачі звуку, відсутня ймовірність некрозу довгою ніжки ковадла за рахунок вигину петлі протеза [9].

Переваги титану – його доступність, різні форми і розміри, а також легка маса, а істотним недоліком є велика частота екструзії. Осікулярні протези з титану дають можливість не тільки зменшити пороги повітрепроводних звуків і кістково повітряного інтервалу, але і поліпшити сприйняття кістковопроводних звуків. За даними випробувань, найкращими виявилися осікулярні протези з титану [10].

Переваги гідридного підходу, а саме, досягнення високої щільності, причому практично незалежно від тиску пресування, були використані для виготовлення експериментальних деталей складної форми. З огляду на значний потенціал використання титану в автомобілебудуванні, були виготовлені деталі автомобільного призначення. Слід зауважити, що дана технологія може широко використовуватися і в авіаційній промисловості для виготовлення деталей, що не піддаються критичним навантаженням, а також в інших галузях промисловості [11].

Одним з найбільш активно розвинутих напрямків виготовлення виробів з титанових сплавів є адитивні технології. Вони об'єднують в собі не тільки переваги порошкової металургії, такі як високий (понад 0,9) коефіцієнт використання матеріалу, а й переваги ливарного виробництва, такі як отримання деталей складної форми і різної конфігурації з щільною литою структурою. Основною перевагою виробів, отриманих за адитивною технологією, є істотне (до 30%) зниження маси деталі [12].

Авіаційно-космічна промисловість є одним з найбільш великих споживачів титану і ця тенденція тільки посилюється. Світове застосування титану в авіаційно-космічної промисловості в 2006 році не перевищувало 40% в 2013 році

склало 46%. При цьому в конструкціях авіакосмічної та ракетної техніки до 70% деталей має перетин до 30 мм і до 25% деталей перетин до 50 мм. Найбільш перспективними технологіями переробки титанової сировини є порошкові технології. Це пояснюється скороченням необхідних операцій і застосуванням високопродуктивного обладнання; при пресуванні в необхідні форми деталі виготовляються швидше, з меншими обробкою і відходами, отримання матеріалів з унікальними характеристиками. Актуальність робіт в даному напрямку зумовлена національними та світовими стратегіями і тенденціями розвитку авіаційної, космічної та інших галузей активно споживаючих продукцію з титану і його сплавів [13].

Показана принципова можливість отримання якісних зварних з'єднань при виготовленні зі спечених титанових сплавів довгомірних заготовок і виробів складної конфігурації. Рівень механічних властивостей зварного з'єднання спечених титанових сплавів близький з основним металом [14].

Високолеговані титанові сплави псевдо бета класу мають найбільші значення питомої міцності серед титанових сплавів і значний потенціал для оптимізації комплексу механічних властивостей термообробкою. Міцність цих сплавів може досягати значень 1600 МПа, що робить їх надзвичайно привабливими для використання в якості конструкційних матеріалів. Найбільш поширені сплави даного класу Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr та Ti-10V-2Fe-3Al широко застосовуються в сучасному літакобудуванні. У той же час, сфера використання сплавів титану псевдо бета класу, як і більшості матеріалів на основі титану, істотно обмежена їх відносно високою вартістю. Тому значний інтерес представляє одержання титанових сплавів і виробів з них за допомогою економічно-ефективних технологій, наприклад методами порошкової металургії [15].

Титан і різні його сплави, в тому числі з порошків, широко використовуються в якості матеріалів спеціального призначення. Технічно чистий титан задовольняє нормам, що встановлені для хімічних і механічних властивостей матеріалів біомедичного призначення. Він володіє більш високою

міцністю, нижчою жорсткістю, має кращу корозійну стійкість в біологічному середовищі в порівнянні з нержавіючої сталлю і сплавами на основі хрому та кобальту [16].

Титан достатньо інертний, тому не взаємодіє з живими тканинами та не окислюється в організмі, але інколи йому не вистачає міцності [17]. В середньому титанові протези міняють кожні 10 років через зношування, тому вчені виявили, що високо температурний сплав з трьох частин титану та однієї частини золота один з найбільш твердих сплавів. Він може використовуватись для протезів (рисунок 1.5). Максимальної твердості можна досягнути, якщо обробити такий матеріал ізостатичним пресуванням. Це дозволить значно підвищити строк служби протеза.

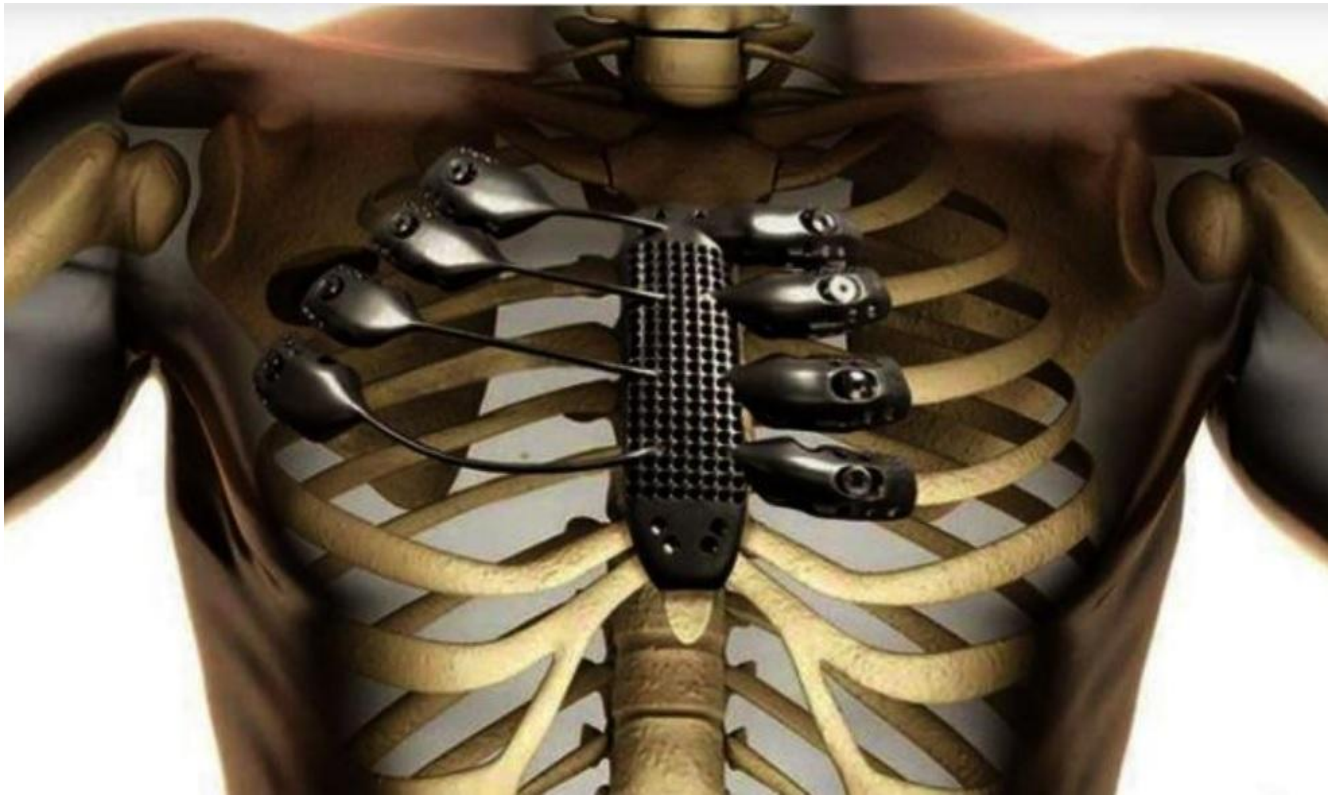
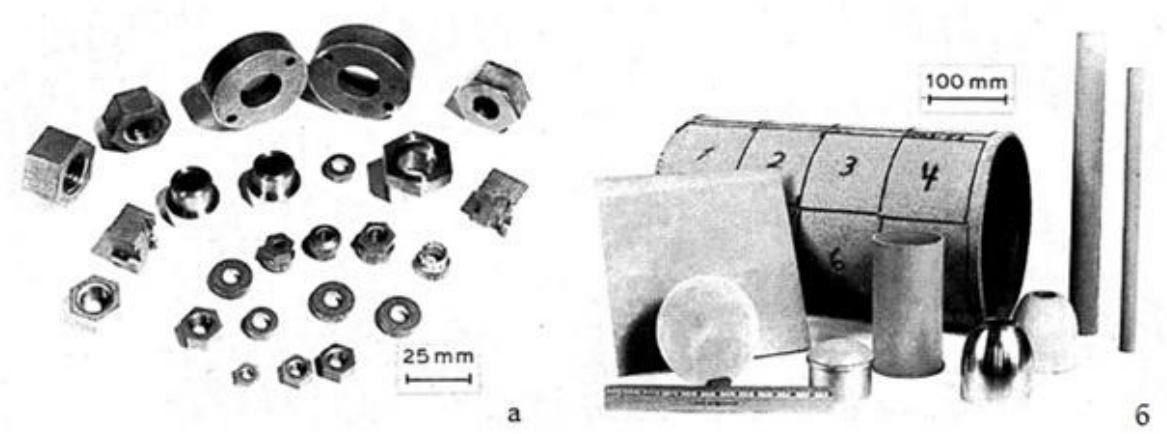


Рисунок 1.5 – Приклад протезу зі сплаву титану та золота [17]

Асортимент комерційно чистих титанових деталей отриманих ізостатичним пресуванням для корозійностійких застосувань показаний на рисунку 1.6а [18].

Титанові фільтри низької щільності (20-80%) для електрохімічних та інших корозійностійких застосувань показані на рисунку 1.6б [18].



а – асортимент комерційно чистих титанових деталей для хімічної промисловості;
б – асортимент пористих титанових фільтрів для електрохімічних процесів

Рисунок 1.6 – Приклади деталей для корозійностійких застосувань [18]

Універсальним способом підвищення якості лопаток ГТД з захисними покриттями є ГІП [19]. Установки газостатичної обробки матеріалів показані на рисунку 1.7.

Рисунок 1.7 – Установки газостатичної обробки матеріалів [19]

Спираючись на приведені приклади скажемо, що технології ХІП та ГІП є актуальними і перспективними методами отримання заготовок, деталей різних форм та призначення, а порошковий титан у свою чергу матеріал з високим потенціалом.

1.2 Висновки

У 1 розділі доведено актуальність методу ізостатичного пресування для отримання або обробки виробів не тільки для авіації, а і для інших галузей. Цим, показано потенціал та гнучкість технології. Отже отримання або обробка заготовок для авіаційних двигунів з титанових порошків ізостатичним пресуванням є доволі перспективним методом.

2 МЕТОДИКА ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВОК З ПОПЕРЕДНІМ ФОРМУВАННЯМ ВИХІДНИХ ЗАГОТОВОК ХОЛОДНИМ ІЗОСТАТИЧНИМ ПРЕСУВАННЯМ

2.1 Принцип технології ізостатичного пресування

Ізостатичне пресування – це технологія обробки порошків під тиском у еластичній оболонці (прес-формі) в умовах всебічного стиснення.

Холодне ізостатичне пресування – це технологія обробки порошків під тиском для отримання проміжної заготовки для гарячого ізостатичного пресування.

У зв`язку з малою насипною щільністю порошкового, а особливо губчастого титану, яка не перевищує 30 – 40% від щільності компактного матеріалу операція попереднього ізостатичного пресування є необхідною. В процесі попереднього пресування крім щільності вихідної заготовки зростає її теплопровідність і електропровідність, що має велике значення в процесі нагріву під ГІП.

Гаряче ізостатичне пресування – це технологія обробки попередньо нагрітого порошку під тиском у еластичній оболонці (прес-формі) в умовах всебічного стиснення. Прес-форма нагрівається з розміщеним у ній матеріалом. Отримані вироби можуть бути як простої так і складної форми з мінімальними допусками.

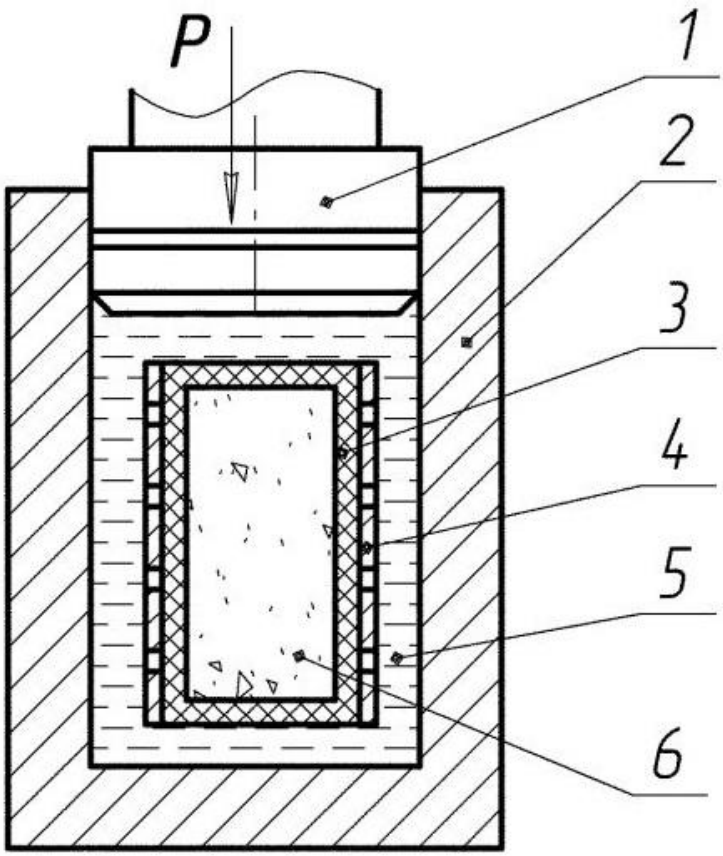
2.2 Установки для ізостатичного пресування та принцип їх роботи

Експериментальна частина виконувалась на установках для холодного та гарячого ізостатичного пресування.

Пресування відбувалось у прес-формі яка заповнювалась у декілька етапів. В гумову оболонку діаметром 430 і висотою 1800 мм, розміщену в перфорованій склопластиковій обоймі засипався шар піску товщиною 30…50 мм і встановлювалась технологічна обичайка діаметром 320 і висотою 2000 мм.

Простір між гумовою оболонкою і обичайкою заповнювався піском, а внутрішня порожнина обичайки шихтою заданого складу (рисунок 2.1). Пісок виступає у ролі проміжної середи яка передає тиск на заготовку. Детально така технологія по А.С. 1092006 [20] описана в технологічному звіті [21].

Установка для холодного ізостатичного пресування (УХІП) за принципом роботи схожа на гідравлічний прес. Тиск пресування передається від штоку. Прес-форма знаходиться у контейнері, який заповнений робочою рідиною (емульсією на водній основі), яка передає тиск на прес-форму.

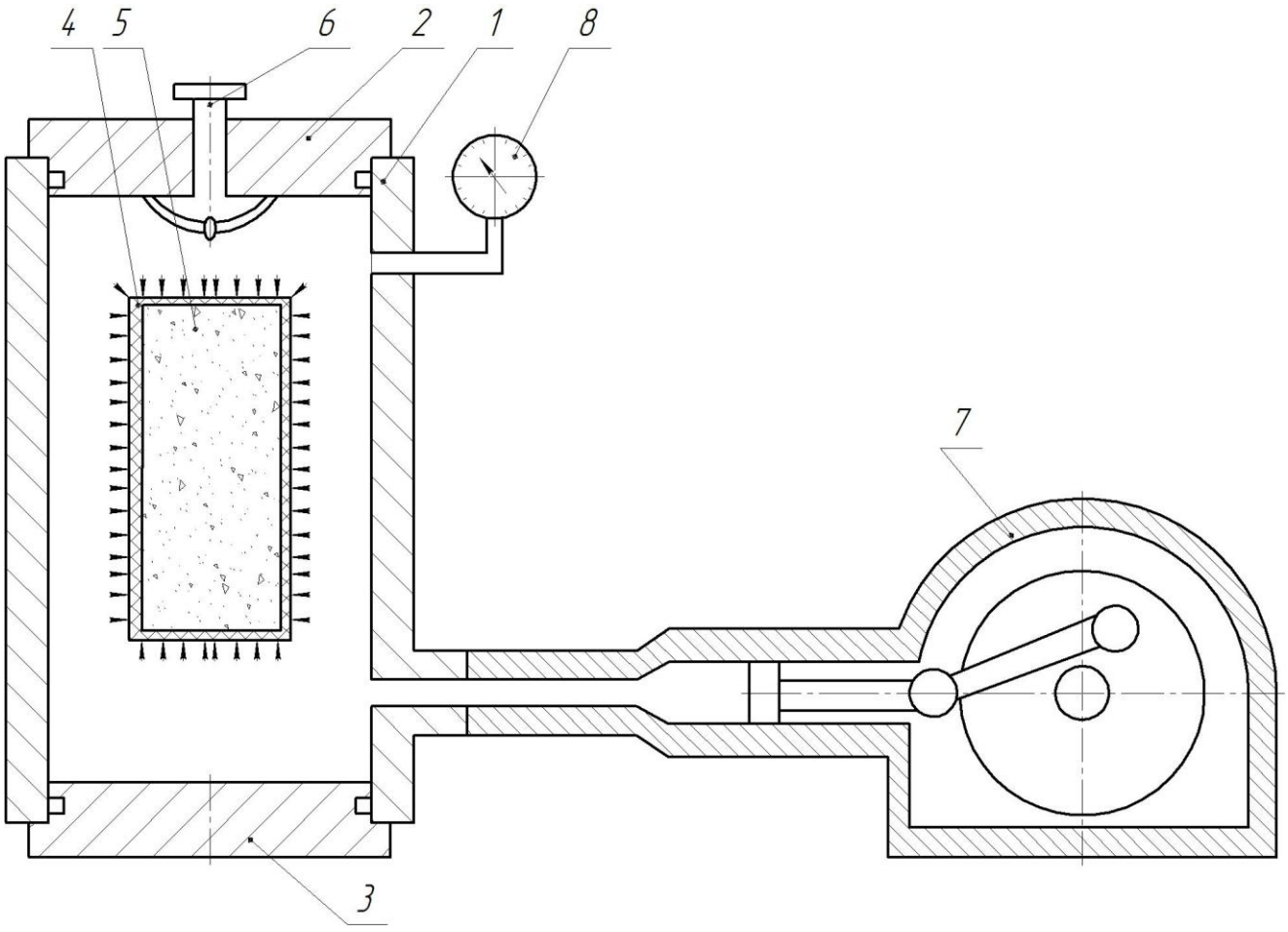


1 – шток; 2 – контейнер; 3 – гумова оболонка; 4 – перфорована склопластикова обойма; 5 – робоча рідина; 6 – шихта; Р – тиск пресування

Рисунок 2.1 – Схема установки холодного ізостатичного пресування [22]

Для гарячого ізостатичного пресування використовувались прес-форми з стаканоподібною пробкою, зовнішньою перфоруючою обоймою і запірним пристроєм, які описані в звіті (рисунок 2.2) [23].

Камера високого тиску щільно герметизована. Тиск пресування створюється та регулюється компресором високого тиску. Підготовка вихідних заготовок до пресування і нагрів здійснювали по раніше розробленій методиці [21,23].



1 – циліндричний корпус робочої камери; 2 – верхня кришка; 3 – нижня кришка; 4 – прес-форма; 5 – заготовка; 6 – вентиль для спуску тиску; 7 – компресор високого тиску; 8 – манометр

Рисунок 2.2 – Схема установки гарячого ізостатичного пресування

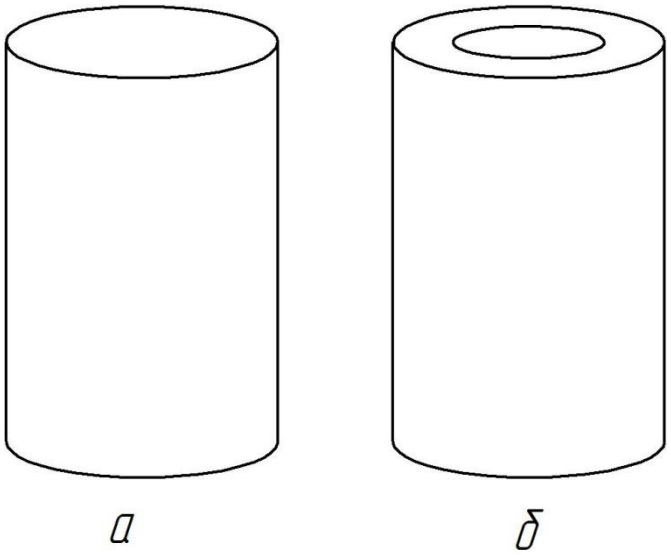
2.3 Вироби для досліджень

Для досліджень були відібрані наступні види виробів та вихідної шихти:

а) Заготовки, кратні двом витраченим електродам для фасонного титанового лиття з ТГ-ТВ розміром фракцій до 70 мм (рисунок 2.3а);

б) Заготовки електродів, які використовуються для фасонного титанового лиття з ТГ-ТВ розміром фракцій до 12 мм (рисунок 2.3а);

в) Трубні заготовки з зовнішнім діаметром 200 мм, внутрішнім – 100 мм і висотою кратною 200 мм з титанового порошку ПТЕК-1 (рисунок 2.3б).



а – електродна; б – трубна

Рисунок 2.3 – Ескізи заготовок

2.4 Методика проведення дослідження

Задача дослідження – отримати електродні та трубні заготовки з різних матеріалів двостадійним ізостатичним пресуванням з уточненням конкретних параметрів технології. Переконатись у тому, що отримані зразки задовольняють встановленим вимогам.

Необхідно:

- виготовити дві партії електродних проміжних заготовок з різної шихти методом ХІП;

- виготовити партію проміжних трубних заготовок методом ХІП;

- виготовити партію електродних заготовок методом ГІП;

- виготовити партію трубних заготовок методом ГІП;

- провести структурні дослідження заготовок;

- виміряти щільність, твердість та ударну в’язкість заготовок.

2.5 Висновки

1. Показано принцип отримання виробів ізостатичним пресуванням.

2. Описано обладнання для експериментів.

3. Розроблено методику дослідження.

3 РОЗРОБКА ТЕХПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВОК З ПОПЕРЕДНІМ ФОРМУВАННЯМ ВИХІДНИХ ЗАГОТОВОК ХОЛОДНИМ ІЗОСТАТИЧНИМ ПРЕСУВАННЯМ

3.1 План проведення експерименту

Холодним ізостатичним пресуванням було виготовлено дві партії заготовок під електроди, які витрачаються за різними методиками.

Заготовки першої партії на стадії холодного пресування мали такі співвідношення фракцій вихідної шихти (таблиця 3.1) і тиск пресування (таблиця 3.2).

Таблиця 3.1 – Фракційний склад заготовок першої партії

Марка матеріалу	Фракція, мм	Відсотковий вміст в заготовках, %				
		21	22	23	24	25
ТГ-110	-70,0+12,0	15	40	-	-	30
ТГ-ТВ	-50,0+25,0	40	10	57	70	50
ТГ-ТВ	-12,0+25,0	-	25	22	15	10
ТГ-ТВ	-5,0	45	25	21	15	10

Таблиця 3.2 – Тиск пресування заготовок першої партії

№ заготовки	21	22	23	24	25
Тиск пресування, МПа	122	128	80	125	120

Гідростатичне пресування трубних заготовок здійснювалось по раніше розробленій технології без технологічного центрального стержня [21]. В якості шихти використовувався порошок ПТЕК-1.

Друга партія заготовок під використовувані електроди виготовлялась за результатами випробувань першої. У таблиці 3.3 представлений склад шихти використаної для пресування електродних заготовок другої партії.

Таблиця 3.3 – Характеристика матеріалу заготовок другої партії

№ заготовки		26	27	33	34	36
Основна Фракція шихти	Величина, мм	-2,0	-5,0+2,0	-2,0	-2,0	-2,0
	Твердість, НВ	207	257	-	-	207
Поверхневий шар	Величина, мм	-	-2,0+1,0	-	-	-
	Твердість, НВ	-	157	-	-	-

Всі заготовки пресувались тиском 120 МПа.

Для гарячого ізостатичного пресування нагрів проводився при неперервному вакуумуванні порожнини оболонки. Режими нагріву представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Режими нагріву електродних заготовок під ГІП

№ заготовки	21	22	23	24	25	26	27	33	34	35	36
Час нагріву до 500℃, год	2,0	2,3	2,0	1,6	2,0	2,0	2,75	1,75	2,25	3,0	2,75
Час нагріву від 500℃ до температури пресування, год	1,25	1,5	0,8	1,6	1,0	1,75	1,25	1,5	1,5	1,0	1,7
Максимальна температура нагріву, ℃	780	840	825	840	800	760	750	880	940	980	930

Температура і тиск ГІП заготовок представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Термомеханічні режими ГІП електродів

№ заготовки	21	22	23	24	25	26	27	33	34	35	36
Тиск, МПа	100	110	110	110	106	124	125	122	123	115	122
Температура при макс. тиску, ℃	735	780	775	745	780	750	750	780	860	870	850

3.2 Проведення експериментальних досліджень

3.2.1 Холодне ізостатичне пресування

Раніше було досліджено холодне пресування порошку ПТЕК-1 і відсівів ТГ-ТВ фракцій -3,0 +1,0 мм та -1,0 мм [21]. В реальній роботі досліджувалось гідростатичне пресування титанової губки крупних фракцій -70,0 +12,0; -50,0 +25,0 мм; дрібних фракцій -12,0 +2,0; -2,0 +1,0 мм та їх сумішей в різних співвідношеннях. Важливо було перевірити принципіальну можливість пресування такої шихти, оскільки її крупність на 1 – 2 порядки перевищує максимальні розміри частин порошків, які зазвичай використовуються в порошковій металургії.

Було встановлено, що при використанні шихти з розміром частинок до 3 мм відбувалось забруднення поверхневого шару пресовки піском в момент видалення технологічної обичайки. Оскільки в даному випадку використовувалась ще більша шихта, поверхня розділу між пресованим матеріалом і піском додатково захищалась стаканом з щільного паперу. Стакан попередньо надягався на технологічну обичайку і залишався після її видалення.

Заготовки з дуже великої шихти за точністю не поступаються пресовкам отриманим з відсівів ТГ-ТВ фракцій -3,0 мм при будь якому з приведених в таблиці 3.1 складі. Однак поверхня заготовок після гідростатичного пресування мала багато виступів і впадин висотою та глибиною до 20 мм та навіть більше. Особливо нерівна поверхня була в заготовок під номером 21 і 25.

Прямого зв`язку між якістю поверхні і кількістю великих фракцій не знайшлось. Так в заготовці №21 з вмістом великих фракцій 55% була отримана найрівніша поверхня, а в заготовках №23 та 24 з вмістом великих фракцій 57% та 70% відповідно, чистота поверхні мала проміжне значення.

Таким чином можна зробити висновок, що рівномірність усадки при гідростатичному пресуванні губчастого титану залежить не стільки від фракційного складу шихти, а скільки від рівномірності розподілення фракцій по об`єму, яка в даному випадку була довільною. Крім цього значний вплив має

різниця по щільності окремих великих шматків губчастого титану. Середні величини усадок при гідростатичному пресуванні були близькі до раніше визначених для відсівів ТГ-ТВ фракції -3,0 [21].

Після пресування трубних заготовок, проміжна сипуча середа, яка спресувалась у внутрішній порожнині повністю видалилась і вся поверхня покривалась обмазкою склоемалі з температурою початку інтенсивного окислення титану.

Для виготовлення другої партії електродних заготовок було враховано, що в багаточислених заглибленнях на поверхні заготовок після ХІП залишалась велика кількість піску, який не вдавалось видалити галтовкою і дробоструменевою обробкою. Тому технологія гідростатичного пресування була відкоректована таким чином, щоб повністю виключити забруднені поверхні шарів заготовки піском на стадії холодного пресування, коли вона має пористість перевищуючу 50%.

Для холодного пресування була використана прес-форма, описана у звіті [20]. Однак у якості бар’єрного шару між оболонкою і пресованою проміжною заготовкою використовувалась допоміжна проміжна оболонка з поліетиленової плівки товщиною 0,1 мм у 2 – 6 шарів. Сумарна товщина поліетиленового прошарку для різних заготовок і її кількість в відсотках від ваги титану представлена в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Товщина захисного поліетиленового чохла і його вага в відсотках від заготовки

№ заготовки	26	27	33	34	36
Товщина поліетилену, мм	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Кількість поліетилену, % від ваги заготовки	0,35	0,22	0,19	0,21	0,08

Крім того за допомогою технологічної обичайки забезпечувалось формування поверхневого шару заготовок з шихти розміром не більше 2 мм.

Всі заготовки після пресування мали рівну поверхню. У деяких спостерігалось незначне викривлення повздовжньої осі. Поліетиленова плівка (усі шари) міцно схоплювалась з поверхнею пресовки і відділити її в подальшому було неможливо. Крім поліетилена в якості розділового шару були перевірені поліхлорвініл і поліуретан, які підкладались під поліетиленову плівку у вигляді пластинок площею $0{,}01\ м^2$. Ці матеріали легко відділялись від пресовки, при чому поверхня пресовки в цьому місці отримувалась більш гладкою.

3.2.2 Гаряче ізостатичне пресування

Після обробки заготовок ГІП, виміряли відносну щільність представлену в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Відносна щільність ГІП електродів

№ заготовки	21	22	23	24	25	26	27	33	34	35	36
Відносна щільність, %	92,3	98,2	97,0	97,8	100	100	100	100	100	100	100

Встановлено, що в інтервалі температур 300 – 500℃ слід сповільнювати швидкість нагріву, так як при цих температурах йде інтенсивне виділення газів, зокрема водяного пару, який надалі конденсується у картері вакуумного насосу. У випадку швидкого досягнення температури 500℃ і подальшого нагріву стається поглинання газу та вологи титаном та таким чином його забруднення. Момент початку і закінчення газовиділення визначали за мановакуометром при періодичному відключенні вакуумного насосу від площини оболонки тривалістю до 1 хвилини. У таблиці 3.8 представлений процес газовиділення і дегазації при нагріві заготовки №36 де: τ – час від початку нагріву, хв.; T_0, T_1, T_2 – відповідно температури центру, верхнього та нижнього торців заготовки, ℃; P – показання мановакуометра, МПа; N – потужність нагріву, кВт.

Найбільш помітний ефект дегазації був у електродів, отриманих на першій стадії з використанням поліетиленової плівки, яка до 300℃ перешкоджає видаленню газів з порожнин заготовки. Після 500℃ гази починають швидко поглинатись титаном. Більш швидкій дегазації перешкоджає проміжна сипуча середа (особливо якщо використовується пісок подрібнений двох чи більш кратному пресуванню) і малий переріз вакуумного шлангу при його довжині близько 2 м. У зв`язку з цим, маємо інтерес випробування ефективності додаткової операції вакуумної дегазації заготовок після холодного пресування при температурі 900 – 950℃, яка крім видалення вологи може також додатково знизити утримання в електроді хлоридів, що позитивно позначається в процесі плавки.

Таблиця 3.8 – Дегазація заготовки №36 при нагріві під ГІП

τ	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
T_0	230	300	300	340	375	405	420	460	470	495	510	530	560
T_1	160	240	235	265	300	325	350	380	380	400	415	440	485
T_2	220	290	285	320	350	370	400	440	460	485	505	530	560
N	58	27	33,3	33,3	33,3	29,8	29,8	28,4	28,4	26,6	25,9	25,9	63,3
P	1,0	0,75	0,8	0,8	0,75	0,75	0,75	0,75	0,8	0,8	0,85	0,9	1,0

В таблиці 3.9 приведені дані за сумарними осьовими ΔН та радіальними ΔД усадками в процесі холодного і гарячого ізостатичного пресування електродних заготовок.

Таблиця 3.9 – Сумарні усадки електродних заготовок %

№ заготовки	21	22	23	24	25	26	27	33	34	35	36
ΔН	1,60	1,56	1,60	1,60	1,64	1,54	1,60	1,48	1,37	1,60	1,48
ΔД	1,36	1,54	1,40	1,36	1,40	1,66	1,79	1,58	1,66	1,72	1,50

З таблиці видно, що сумарні усадки при отриманні електродних заготовок з дрібних фракцій губки трохи більші, ніж з великих. Значення усадок істотно коливаються, що пов`язано з великою неоднорідністю вихідної шихти як по

гранулометричному складі, так і по формі частин, а також по їх щільності і твердості.

Слід зазначити, що поверхня заготовок, отриманих з великих фракцій титанової губки, після ГІП отримувала ще більшу нерівність, порівняно з вихідними заготовками після попереднього холодного формування. На окремих ділянках перепади радіуса досягають 30 мм. Ці заглиблення заповнені проміжною сипучою середою (піском) яка важко видаляється після ГІП, що призводить до негативних наслідків, про які буде сказано в підрозділі 3.3.

При пресуванні трубних заготовок з порошку ПТЕК-1 величини усадок не відрізнялись від раніше нами встановлених значень і складали за висотою і внутрішньому діаметру після холодного пресування близько 30%, а за зовнішнім близько 20%. Після ГІП з центральним стержнем вони складали від 20 до 30% по зовнішньому діаметру і від 10 до 15% по висоті [21]. Таким чином сумарні усадки складали за діаметром 44 – 56%, а за висотою 43 – 50%. Після ГІП без центрального стержня відповідно за зовнішнім і внутрішнім діаметрами близько 30% і 30 – 35% за висотою. Тиск ГІП для усіх заготовок був 112 МПа, а температура знаходилась в межах від 750 до 850℃.

3.3 Дослідження властивостей заготовок після ГІП

Щільності електродних заготовок в залежності від термомеханічних параметрів ГІП приведені у таблиці 3.7. Заготовки були розрізані на мірні електроди і очищені від піску галтовкою або дробоструменевою обробкою на ЗТМК за прийнятою на підприємстві технологією. Очистку поверхні заготовок № 26, 27, 33, 34 і 36 можливо визнати задовільною для бокової поверхні, хоча в окремих дрібних заглибленнях залишалась невелика кількість піску, насиченого загалом хлоридом магнію. Поверхня торців була очищена трохи гірше. У заготовок № 21, 22, 23, 24, 25 і 35 якість очистки поверхні слідує визнати незадовільною. Як раніше відмічалось, ці заготовки мали дуже нерівну поверхню з великою кількістю місцевих заглиблень заповнених піском, насиченим

домішками – загалом хлоридами магнію. Значна частина піску залишалась не видаленою. В таблиці 3.10 приведені значення твердості для темплетів, вирізаних із заготовок безпосередньо після ГІП і твердість отриманих з них відливок, а також вміст домішок у відливках. Дані таблиці показують, що твердість відливок перевищує її середні значення визначені по 40 замірах для електродів №21 на 169, №23 на 125 і №25 на 169 одиниць НВ. Вона значно перевищує навіть максимальне значення твердості. За даними ЗТМК підвищення твердості при фасонному литті, як правило не перевищує 50 од. НВ. Таке значне розходження фактичних значень твердості проти очікуваних можна пояснити тільки сильним забрудненням металу в процесі переплавки погано очищеним поверхневим шаром електродів. На це ж вказує і підвищений вміст кремнію у відливках (особливо з електроду №25), а також підвищення твердості в прямій залежності від його вмісту. Аналогічний результат був отриманий на відливках з електроду №35 за тою самою причиною. Вплив забрудненої поверхні електродів опинився значно більшим, ніж склад вихідної шихти (див. таблицю 3.1). Наприклад електроди №21 і 25 містили 15 і 30% губки ТГ-110, однак відливки з них мали твердість 294 і 334 НВ, відповідно, а електрод №23 отриманий повністю з ТГ-ТВ при переплавці забезпечив твердість відливка 286 НВ.

Таблиця 3.10 – Твердість титану після ГІП і після переплаву НВ і вміст домішок у литому титані %

№ заготовки		21	22	23	24	25
Твердість після ГІП	середня	125	154	161	174	166
	максимальна	179	214	229	238	238
	мінімальна	80	110	118	144	100
Твердість відливок		294	-	286	-	334
Вміст домішок після переплаву	Si	0,08	-	0,04	-	0,12
	Fe	0,19	-	0,2	-	0,16
	O	0,2	-	0,2	-	0,2
	N	0,063	-	0,044	-	0,053
	C	0,037	-	0,037	-	0,034

Відливки з електродів №26 і 27, мали гладку поверхню. Однак у заготовку на стадії холодного гідростатичного пресування потрапила деяка кількість вологи, а нагрів під ГІП йшов неперервно без уповільнення швидкості до 500°С для дегазації. У результаті отримані відливки мали твердість вище 300 НВ, пов'язану з високим вмістом кисню і азоту (0,67 і 0,15% відповідно).

У відливок, отриманих з електродних заготовок №33, 34, 36 (усього 5 плавок) твердість і хімічний склад знаходяться у допустимих межах. В процесі плавки цих електродів не було інтенсивного газовиділення, і при плавленні – нормальна текучість металу. У якості зауваження можна відмітити підвищені іонізацію і кипіння ванни у порівнянні з електродами, отриманими переплавом. Це пояснюється неповним видаленням хлоридів у процесі нагріву під ГІП. Уповільнення швидкості нагріву заготовок під ГІП в інтервалі 300 – 500°С з метою їх дегазації (заготовки №33, 34, 36) забезпечує допустимий рівень як технологічних властивостей електродів, так і задовільну якість відливок.

З трубних заготовок були вирізані темплети у вигляді дисків зовнішнім діаметром 210, внутрішнім 95 і товщиною 15 мм. На темплетах визначались щільність і твердість НВ (по 40 замірам). Потім з темплетів були вирізані ударні зразки (осі зразків направлені по радіусу заготовки або з відхиленням від нього до 30°). Зразки випробовувались безпосередньо після ГІП, а також після додаткового відпалу при температурі 850°С протягом 3 годин у вакуумі 0,05 Па.

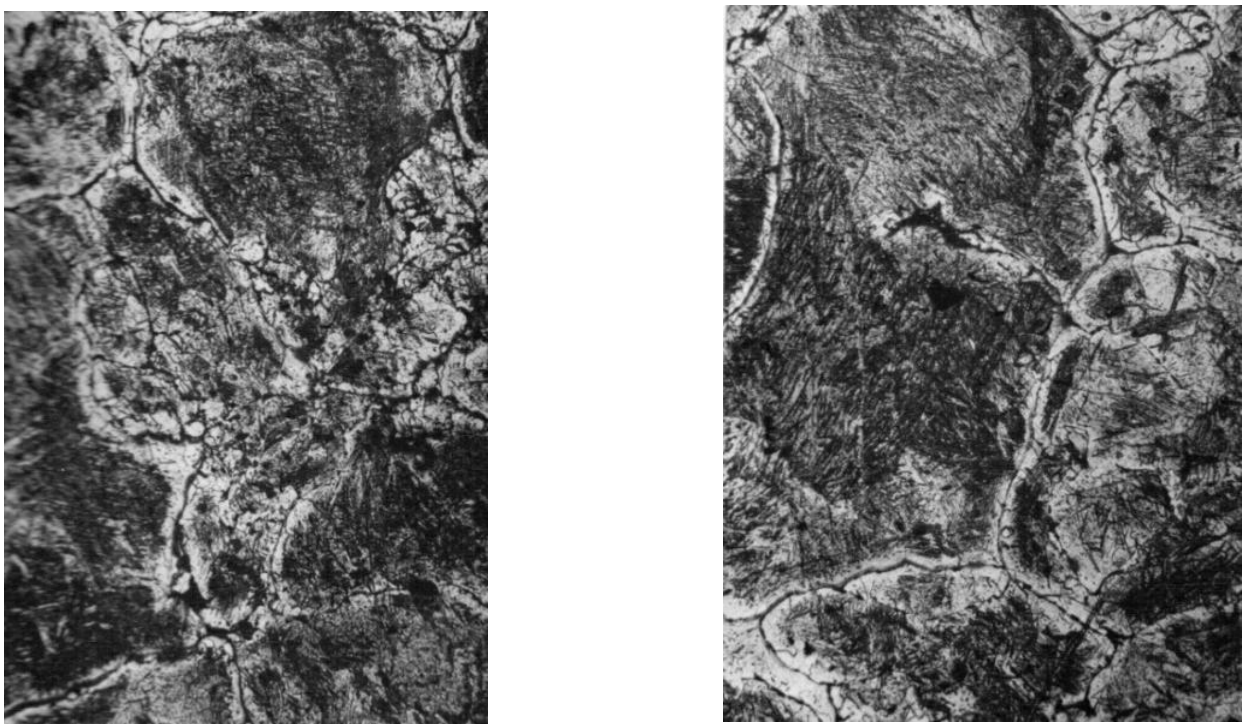
У таблиці 3.11 представлені температури ГІП трубних заготовок і отримані при цьому значення щільності, твердості і ударної в'язкості безпосередньо після ГІП і після додаткового відпалу.

З таблиці видно, що зі збільшенням температури ГІП підвищується щільність і твердість.

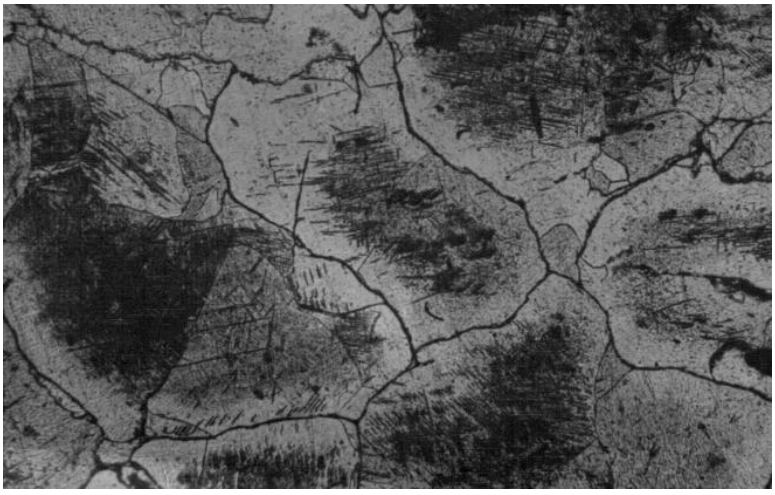
Таблиця 3.11 – Властивості титану в залежності від температури ГІП

Темплет	Температура, °С	Твердість, НВ		у, $г/см^3$	Ударна в’язкість, $кДж/м^2$ ($кгс·м/см^2$)	
		ГІП	ГІП + відпал		ГІП	ГІП + відпал
A	750	108	108	4,498	51(0,51)	150(1,5)
B	780	129	134	4,515	91(0,91)	420(4,2)
C	800	169	169	4,517	не визн.	280(2,8)
D	850	154	160	4,518	65(0,65)	640(6,4)

Той факт, що з ростом твердості ударна в’язкість зростає, а не зменшується пояснюється тим, що в даному випадку вона залежить головним чином не від властивостей всього об’єму металу, а від стану границь вихідних частин порошкової шихти [24]. Представлена на рисунку 3.1 структура зразків в зоні зламу після ГІП, а на рисунку 3.2 після ГІП і відпалу показує, що стан границь вихідних частин безпосередньо після ГІП помітно відрізняється. Для зразків з меншою ударною в’язкістю ці границі, являються місцем концентрації домішок, виражені яскравіше. У процесі додаткового відпалу домішки дифундуються в метал. При цьому відбувається збільшення ділянки металевого контакту границь вихідних частин, вони як би розмиваються, стають менш чіткими. Більш чіткий стан границь видно не на шліфах, а на зламі зразків під інструментальним мікроскопом зі збільшенням х20. Міняючи глибину фокусування, чітко проглядається стан контакту між вихідними частинками. Дуже добре видно серпоподібні міжчастинні проміжки, заповнені неметалевими домішками.



а) б)

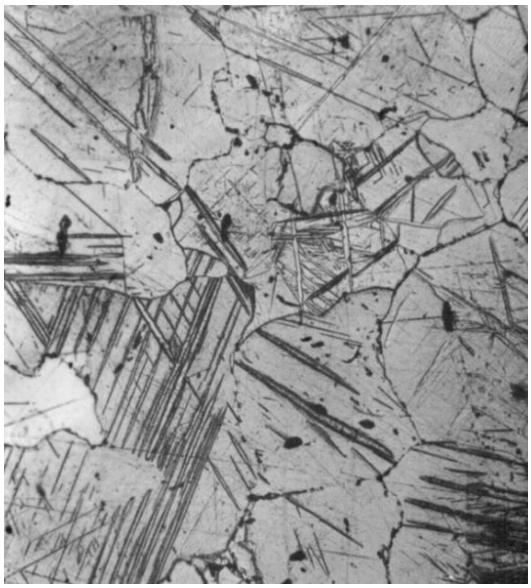


в)

а – 750°С; б – 780°С; в – 850°С

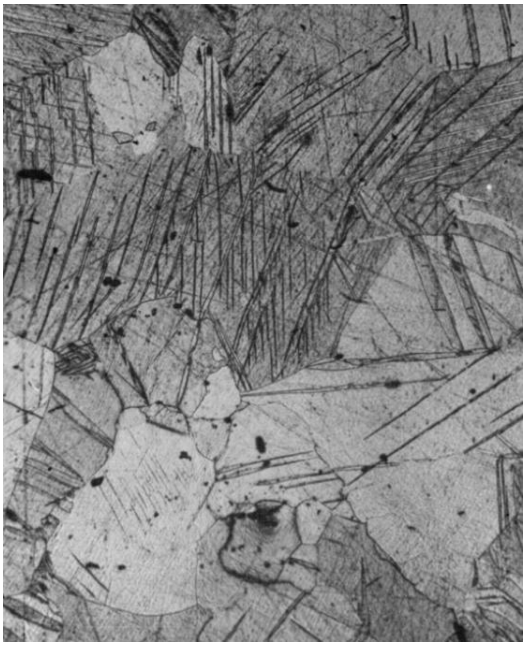
Рисунок 3.1 – Структура матеріалу трубних заготовок після ГІП при різних температурах (х100)

а)



б)

в)



г)

а – 750°С; б – 780°С; в – 800°С; г – 850°С

Рисунок 3.2 – Структура матеріалу трубних заготовок після ГІП при різних умовах температури і відпалу 850°С, 3 години (х100)

3.4 Аналіз отриманих даних та технологічні рекомендації

Після ГІП подальше підвищення якості електродів, а як наслідок і відливок, можна отримати за рахунок покращення дегазації у процесі нагріву чи введення проміжної операції вакуумної дегазації після холодного пресування, а також за рахунок підвищення якості очистки поверхні готових електродів перед плавкою.

Представляє інтерес випробування введення в порошкову шихту шматкових відходів з плавленого металу на стадії засипання прес-форми під холодне гідростатичне пресування. Для забезпечення якості поверхні витрачених електродів необхідно формувати їх зовнішній шар з губчастого титану величиною не більше 2,0 мм. Центральна частина електродів може формуватися з шихти величиною до 12 мм. Допустима твердість вихідної шихти без її додаткового рафінування до 210 НВ. Додаткове рафінування можливо підвищить цю межу, що необхідно додатково перевірити.

Слід продовжити дослідження по компактуванню порошкових матеріалів підвищеної частоти методом ГІП, а також ГІП і додаткової пластичної деформації. З підвищенням температури ГІП зростає як ударна в’язкість так і зростає твердість, тому необхідно уточнити її оптимальне значення. Деталі, які будуть експлуатуватись після виготовлення ГІП чи ГІП і термообробки, температуру нагріву слід збільшити. Для виробів, що підлягають наступній гарячій пластичній деформації, слід зменшити температуру нагріву, для зниження твердості. Крім того слід продовжити пошук методів обмеження зросту твердості з підвищенням температури ГІП (покращення дегазації при нагріві до 500℃, оптимізація захисних обмазок при нагріві вище 500℃, попереднє спікання у вакуумі заготовок під ГІП).

3.5 Технологія виготовлення експериментальних партій заготовок

Як результат проведених експериментів було вдосконалено технологію двостадійного ізостатичного пресування, яка включає наступні операції:

а) Підготовка вихідних матеріалів;

б) Гідростатичне пресування (ХІП);

в) Підготовка проміжної заготовки;

г) Нагрів проміжної заготовки;

д) ГІП;

е) Охолодження заготовки, розвантаження її із прес-форми і контроль.

Параметри цих операцій змінюються в залежності від форми і розмірів отримуваного виробу, а також від складу вихідної шихти.

3.5.1 Гідростатичне пресування електродних заготовок

Зібрати прес-форму для холодного гідростатичного пресування. У випадку використання гумової оболонки встановити в неї захисний стакан (поліетилен, папір, ПХВ, і т.д.).

Встановити в оболонку технологічну обичайку. Заповнити простір між обичайкою шихтою величиною не більше 2 мм. Внутрішню порожнину обичайки заповнити основною шихтою.

Заповнення прес-форми вести безперервним струменем при працюючому вібраторі. Видалити технологічну обичайку. Загерметизувати прес-форму і створити в її порожнині вакуум.

Завантажити прес-форму у камеру УХІП. Спресувати вихідну заготовку тиском 100 – 130 МПа у відповідності з інструкцією по експлуатації установки. Видалити прес-форму, розгерметизувати і видалити з неї заготовку.

3.5.2 Гідростатичне пресування трубних заготовок

Зібрати прес-форму для холодного гідростатичного пресування. Встановити прес-форму на вібратор.

Встановити в оболонку технологічну обичайку чи центральний стрижень для оформлення внутрішньої порожнини, забезпечуючи їх взаємну

концентричність, заповнити простір між оболонкою і обичайкою чи центральним стрижнем порошковою шихтою заданого складу, що неперервно подається з бункеру при ввімкненому вібраторі. Заповнити внутрішню порожнину технологічної обичайки піском і видалити її. Загерметизувати прес-форму і створити в її порожнині вакуум.

Виконується як і для електродних заготовок.

3.5.3 Підготовка проміжних електродних заготовок до ГІП

Зібрати прес-форму для ГІП і встановити її у завантажувальний пристрій.

Виконати обміри заготовки і занести їх дані в журнал. Закріпити на заготовці термопари (на половині висоти і на відстані 100 мм від верхнього і нижнього торців).

Зафіксувати заготовку в прес-форму на висоті 100 мм від дна оболонки і концентрично останній заповнити простір між заготовкою і оболонкою прокаленим кварцовим піском, який подається з бункеру. Встановити контрольну термопару на внутрішній поверхні оболонки.

Вивести з прес-форми виводи термопар, виключаючи їх електричний контакт між собою. Загерметизувати прес-форму і створити в ній вакуум. Підключити виводи термопар до 20 полюсного роз'єму в наступному порядку: T_0 – центр, T_1 – верх, T_2 – низ, T_3 – контрольна термопара.

3.5.4 Підготовка проміжних трубних заготовок до ГІП

Видалити з внутрішньої порожнини проміжної заготовки сипучу середу чи випресувати центральний стрижень. Провести обміри заготовки і занести їх дані в журнал. Покрити всі поверхні заготовки водною суспензією склоемалі заданого складу, розведеної до сметаноподібного стану. Товщина шару покриття 1 – 3 мм. Просушити покриття при кімнатній температурі чи в сушильній камері при температурі не більше 300℃ до повного висихання.

Зібрати прес-форму для ГІП і встановити її в завантажувальний пристрій.

Закріпити на заготовці термопари в тому ж порядку, як для електродної заготовки.

Зафіксувати заготовку в прес-формі і заповнити простір між заготовкою і оболонкою прокаленим піском у тому ж порядку як для електродної заготовки. Ввести у внутрішню порожнину заготовки центральний стрижень з зазором 5 мм на сторону і заповнити зазор сипучою середою.

Загерметизувати прес-форму, створити в ній вакуум і підключити виводи термопар до роз'єму у тому ж порядку, як для електродної заготовки.

3.5.5 Нагрів заготовки під ГІП

Перевірити прес-форму на відсутність натікання повітря в її порожнину і встановити до неї пристрій для нагріву, заповнений водою. Вода повинна покривати прес-форму повністю, а подачу води здійснювати в зону запірного пристрою. Підключити термопари до електронного потенціометра на пульті управління, а індуктор до генератора і конденсаторної батареї згідно заданої схеми нагріву.

Запустити генератор і вести нагрів відповідно з інструкцією по експлуатації при неперервному вакуумуванні порожнини прес-форми.

Збільшення температури до 300℃ вести з максимальною швидкістю. В інтервалі 300 – 500℃ при необхідності зменшити швидкість нагріву для дегазації заготовки. Тривалість дегазації визначати за показниками мановакуометра при відключенні вакуумного насосу тривалістю до 1 хвилини. До встановлення вихідного вакууму підйом температури вище 500℃ не допускається. Після закінчення дегазації збільшити потужність нагріву до максимальної і підняти температуру заготовки до величини на 50℃ більше ніж задана температура ГІП (800 – 1000℃). Режим нагріву заноситься в журнал.

3.5.6 ГІП заготовок

Вимкнути нагрів, перенести прес-форму з нагрітою заготовкою в камеру високого тиску, відключивши її від вакуумного насосу. Підключити термопари до потенціометра через проміжний термопарний вхід в верхній пробці заготовки.

Загерметизувати камеру високого тиску, замкнути її силовою рамою і створити в установці заданий тиск (100 – 130 МПа) у відповідності з інструкцією по експлуатації. Витримати заданий час заготовку під тиском, скинути тиск і вивантажити прес-форму з установки у відповідності з інструкцією по експлуатації.

Термомеханічний режим ГІП заноситься в журнал.

3.5.7 Охолодження заготовки

Перенести прес-форму з заготовкою в ємність, заповнену водою, підключити термопари до електронного потенціометра і охолоджувати до максимальної температури заготовки не більше 300℃, а внутрішні поверхні оболонки не більше 80℃. При необхідності охолоджуючу воду неперервно чи періодично заміняти, не допускаючи підвищення її температури вище 40℃.

3.5.8 Виймання заготовки

Витягти прес-форму з ємності з водою, швидко перенести в розвантажуючий пристрій і вивантажити заготовку разом з сипучою середою в бункер. Після охолодження заготовки до температури менше 100℃ видалити її з бункеру, видалити з її поверхні проміжну сипучу середу (у трубних заготовок видалити також центральний стрижень) і зробити обміри і зважити заготовки з занесенням результатів у журнал.

3.6 Висновки

1. Розроблено план проведення експерименту.
2. Проведено експериментальні дослідження.
3. Проаналізовано отримані дані та наведено технологічні рекомендації.
4. Вдосконалено технологію двостадійного ізостатичного пресування.

4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

4.1 Порівняння ХІП та ГІП з литтям та куванням

Найбільш привабливим аспектом технології ГІП є її відносно не висока вартість. Приблизні дані про вартість наведені в таблиці 4.1, яка заснована на опитуванні декількох виробників компонентів з титанового порошку.

Таблиця 4.1 – Вартість за 1кг элементних порошків Ті і технологій [18]

Виріб	Діапазон витрат, US$ $кг^{-1}$
Титанова губка (0,15% Cl)	10 – 20
Чистий титановый порошок (0,001% Cl)	45 – 50
Механічне пресування (без ГІП)	30 – 90
ХІП	60 – 100
ХІП + ГІП	70 – 120
100% щільний порошок (ХІП + ГІП)	120 – 160

Оскільки вартість виготовлення титанових компонентів полягає, головним чином, в пресуванні і механічній обробці, а вартість матеріалів також враховується, вибір відповідних деталей може бути зроблений тільки після оцінки цих факторів для конкретної деталі. Як правило, метод порошкової металургії найбільш привабливий для великих деталей складної форми з високим співвідношенням «купити / полетіти», коли вони виготовляються традиційними способами. В даний час найбільший доступний автоклав (діаметр 1700 мм, висота 2400 мм) обмежує розмір, якщо не використовуються такі підходи, як подальше зварювання.

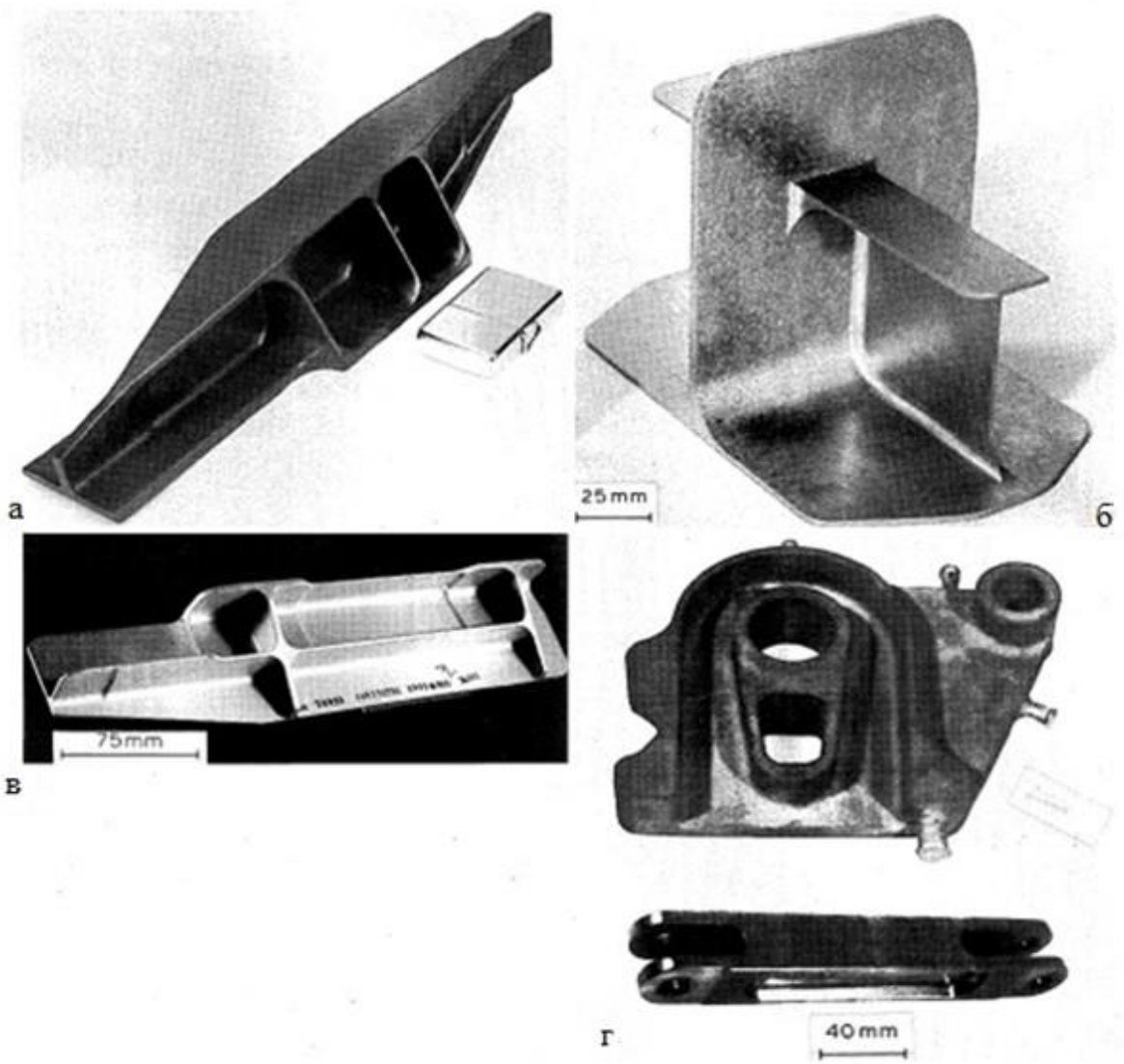
У таблиці 4.2 перераховані поточна вага виробу, маса виробу, кінцева вага деталі і очікувана потенційна економія витрат на різні деталі. Ці оцінки показують, що економія витрат на виготовлення може варіюватися від 20 до 50% залежно від розміру і складності деталі та кількості вироблених деталей, збільшення обсягу роботи призводить до більш високої економії.

Таблиця 4.2 – Економія ваги і вартості деталей для сплаву Ti-6Al-4V [18]

Метод пресування	Система	Деталь	Поточна вага, кг			Потенційна економія, %
			Кована заготовка	Порошкова металургія	Деталь	
Керамічна форма	F-14	Скоба фюзеляжу	2,8	1,1	0,8	50
Керамічна форма	F-18	Опора двигуна	7,7	2,5	0,5	20
Керамічна форма	F-18	Кріплення крюка	80,0	25,0	13,0	25
Керамічна форма	F-107	Відцентрове колесо	15,0	2,8	1,7	40
Рідинна середа	AH64	Відцентрове колесо	10,0	2,3	1,1	35

Більш докладні дослідження економічної ефективності процесу, проведені Уолтоном Моллом, Віттом Феррері і їх колегами показали, що при правильному виборі деталі підхід з використанням порошкової металургії може бути значно дешевше, ніж метод лиття. Ці дослідження показали, що ця перевага обумовлена поліпшеним використанням матеріалу в порівнянні з альтернативними процесами, такими як кування і лиття, а також результатом є значно зменшений об’єм необхідної обробки.

Молл та Феррері використовували керамічну прес-форму для виробництва складних деталей, таких як відцентрові колеса. Використовуючи цей метод, можна заощадити до 40% (рисунок 4.2) для деталей, подібних до тих, які показані на рисунку 4.1. Традиційний підхід у куванні призводить до витрат, наведених у таблиці 4.3.



а – фюзеляжна розпірка; б – кильове з'єднання; в – опора для кріплення двигуна; г – з'єднувальний кронштейн

Рисунок 4.1 – Деталі виготовлені методами порошкової металургії [18]

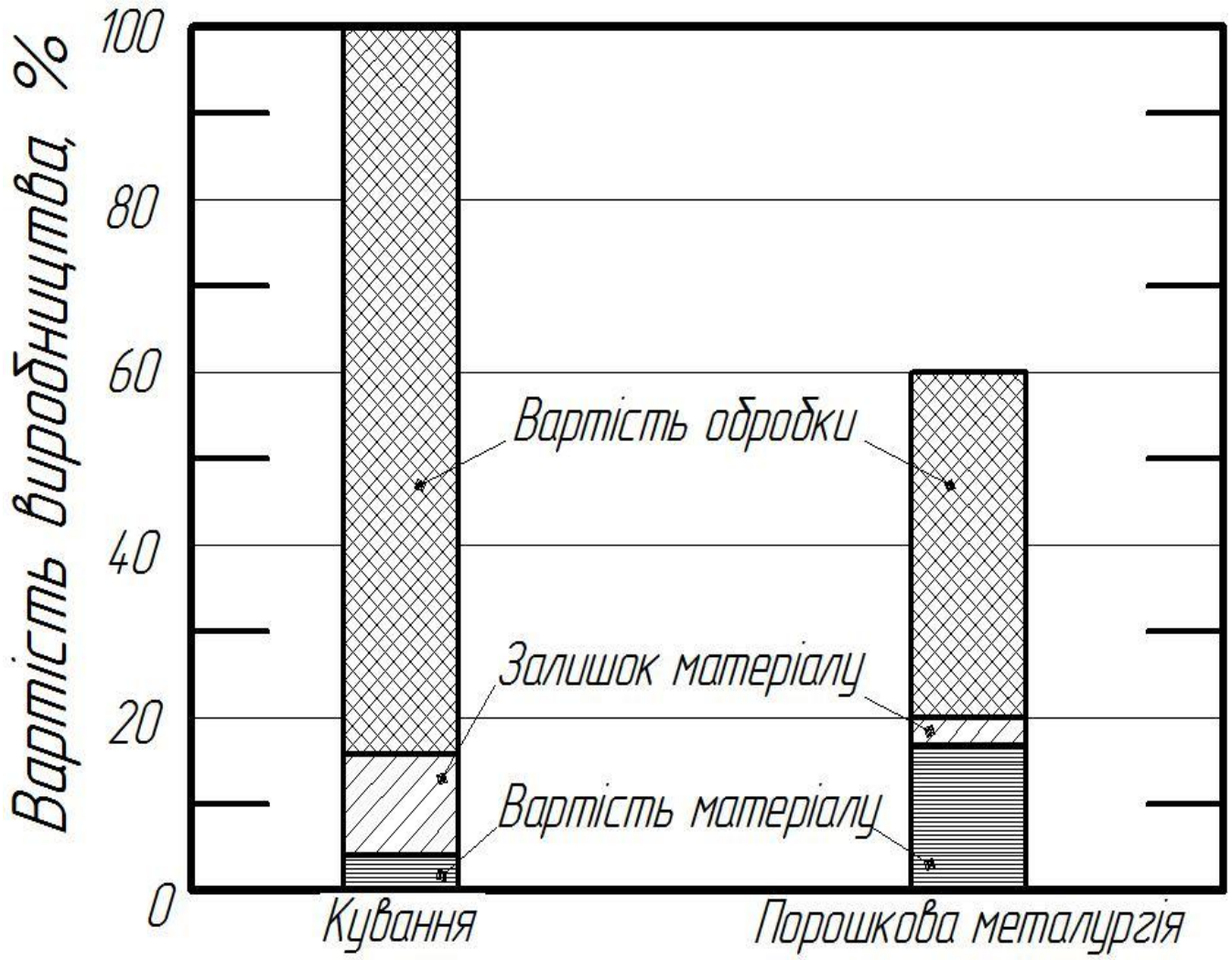


Рисунок 4.2 - Економія витрат, отримана з використанням методів порошкової металургії, в порівнянні зі звичайним куванням для складних деталей

Таблиця 4.3 – Порівняння вартості кування та порошкової металургії для відцентрового колеса [18]

Крок обробки	Кування		Порошкова металургія	
	US$	%	US$	%
Кований стрижень	460	12	…	…
Основа	…	…	~100	~2,5
Порошкове виготовлення	…	…	400	11
Створення прес-форми	…	…	100	2,5
Обробка та перевірка	3330	88	1670	44
Всього	3790	100	2270	60

Порівняння, розглянуте вище, показує, що для складних деталей, які використовують прес-форми, підхід порошкової металургії може бути досить конкурентоспроможним порівняно зі звичайною обробкою шляхом кування і механічної обробки. Основними факторами при визначенні вартості деталей порошкової металургії є витрати на порошок та прес-форму (знижена вартість обробки). Фактично, справжня чиста форма може бути значно дешевша, ніж деталь, яка потребує навіть мінімальної обробки через високу вартість процедур налаштування обробки.

4.2 ХІП та ГІП з адитивними технологіями

Адитивні технології (АТ) – це способи виробництва деталей складної форми, які полягають в послідовному з'єднанні окремих шарів матеріалу (зазвичай застосовуються порошки металів або сплавів, при плавленні яких формуються шари створюваного об'єкта) і формуванні готового виробу за комп'ютерною 3D-моделлю для застосування в різних галузях промисловості.

Зараз інтерес представляють порошки металевих і інтерметалідних сплавів, в тому числі жароміцних на основі Ni і Ti. Для формування об'єктів з даних порошків використовуються два основні варіанти АТ: технологія прямого

лазерного осадження матеріалу (Direct Deposition, DD) (рисунок 4.3) і технологія плавлення порошку на підкладці (Bed Deposition, BD) (рисунок 4.4). При виготовленні виробів даними технологіями можна отримати деталі з криволінійними отворами та пустотами які неможливо отримати типовими методами [19].

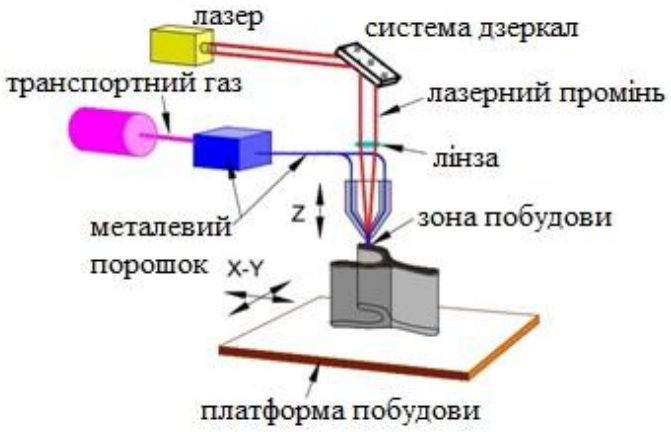


Рисунок 4.3 – Технологія Direct Deposition [25]

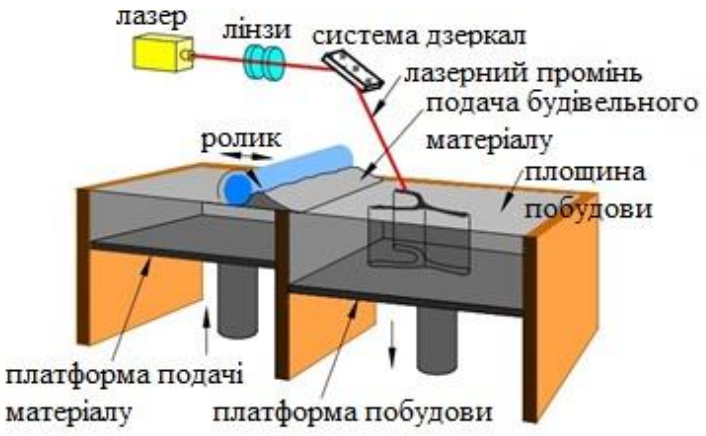


Рисунок 4.4 – Технологія Bed Deposition [25]

Формування композиційного шаруватого об'єкта методами АТ включає процеси послідовного розплавлення шарів матеріалу. При з'єднанні шарів між ними виникає межа розділу, яка є структурним дефектом адитивного об'єкта. Дефектами є також неповне розплавлення частинок порошку. Крім цього, при

затвердінні шару розплаву може виникати мікропористість. Структурні дефекти чинять істотний вплив на механічні властивості і експлуатаційні характеристики деталей.

Для ущільнення структури за рахунок мінімізації пористості в ливарних сплавах на основі нікелю, титану і алюмінію після АТ використовують технологію ГІП [19].

Вплив ГІП на механічні властивості адитивних матеріалів на прикладі зразків титанового сплаву Ti-6Al-4V наведено на рисунку 4.5. Отримані результати показують, що найбільш істотний вплив ГІП дає на характеристики втоми зразків. Також при дослідженні характеристик до і після ГІП встановлено, що в шарі покриття у вихідному стані спостерігаються пори розміром до 8 мкм. Застосування ГІП зменшує максимальний розмір пори до ~1,5 мкм, при цьому повністю прибирається дрібна пористість розміром <0,5 мкм.

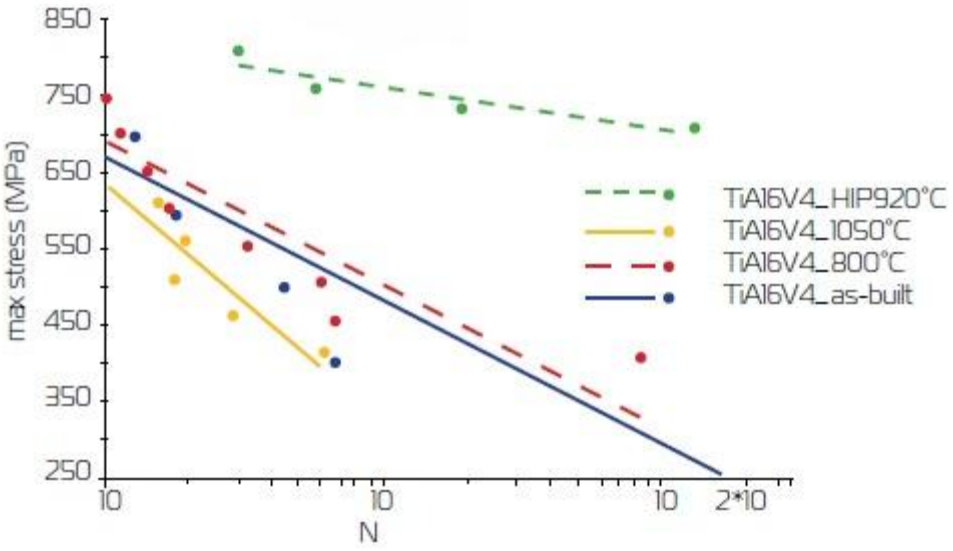


Рисунок 4.5 – Вплив ГІП на втомну міцність адитивних зразків титанового сплаву Ti-6Al-4V [26]

Розглянемо ХІП, ГІП і АТ при отриманні деталей та заготовок для чистого титану (Ti) окремо (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Порівняння технологій ізостатичного пресування та адитивних технологій

Параметр	ХІП та ГІП	АТ
Вартість порошку	<100$	250$
Складність виробів	Без складних отворів	Будь-які
Розміри виробів	Великі	Невеликі
Коефіцієнт використання матеріалу	Високий	Високий
Якість поверхні	Висока	Середня
Властивості матеріалу	Щільна структура	Наявність численних дефектів
Розміри обладнання	Великі	Середні

Висока вартість порошку для адитивних технологій обумовлена тим, що для деяких марок 3D принтерів порошок постачає виробник принтера і ця марка порошку може бути не сумісна з іншим обладнанням. Технології ХІП та ГІП не дозволяють отримати вироби дуже складної форми з отворами складної конфігурації та внутрішніми пустотами. Розміри виробів для обох технологій (ХІП і ГІП та АТ) обмежені об’ємом робочого простору обладнання. Коефіцієнт використання матеріалу великий в обох технологіях (~0,9). Якість поверхні деталі яка отримана на 3D принтері має нерівності та численні дефекти в структурі через особливості технології (пошарове нанесення матеріалу).

4.3 Техніко-економічне обґрунтування вибору виду та методу отримання заготовки

Порівняємо 3 методи отримання заготовки для деталі «Деталь з’єднувального кронштейну»: ГІП, лиття за витоплюваними моделями та штампування (КГШП). Матеріал сплав ВТ6 (для лиття ВТ6Л). Маса деталі q = 0,87 кг (рисунок 4.6), річну програму випуску приймаємо N = 500 шт. Клас точності – 2, ступінь складності – 2, група сталі М1 [27].

Призначимо припуски на механічну обробку:

- ГІП: Z = 0,3 мм на сторону [18];

- лиття за витоплюваними моделями: Z = 0,75 мм на сторону [27, табл. 1.2, с. 11];

- штампування (КГШП): Z = 2,3 мм на сторону [27, табл. 1.3, с. 12].

Використовуючи програму Siemens NX 12 розраховуємо масу і об'єм заготовки для ГІП (рисунок 4.7), лиття за витоплюваними моделями (рисунок 4.8) та штампування (КГШП) (рисунок 4.9).

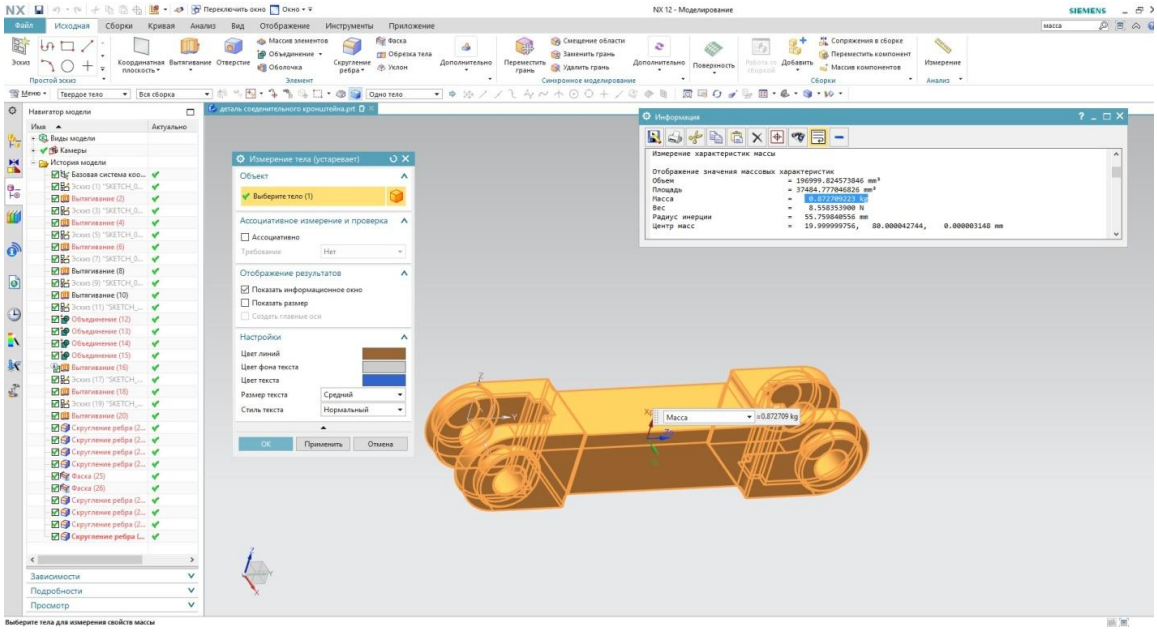


Рисунок 4.6 – Модель деталі та її маса

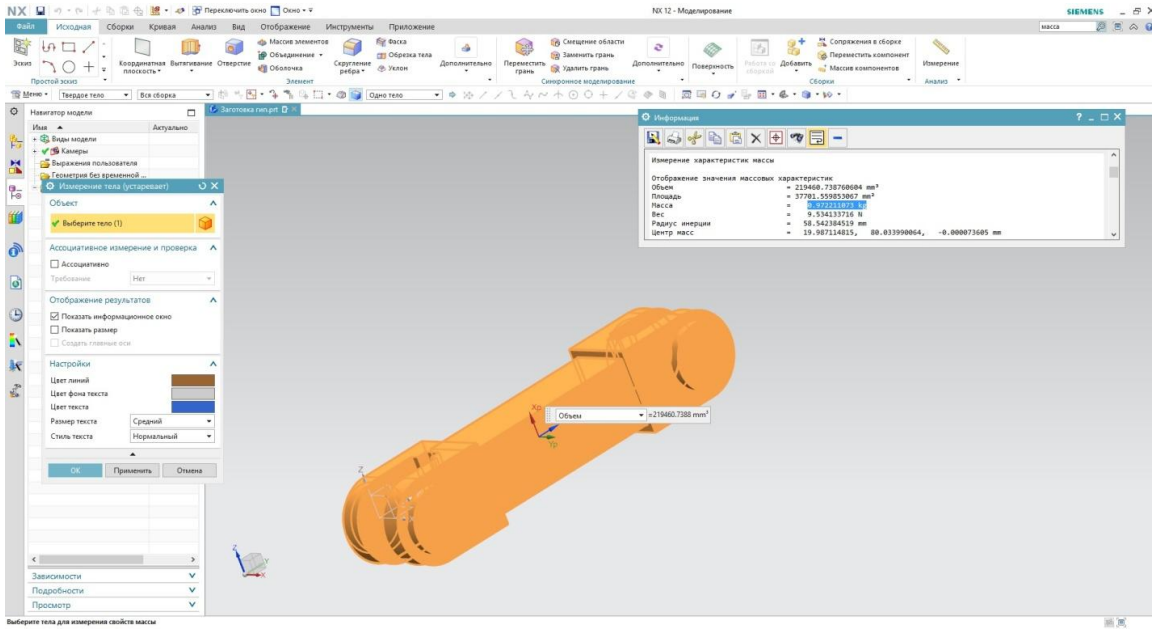


Рисунок 4.7 – Модель та маса заготовки отриманою методом ГІП

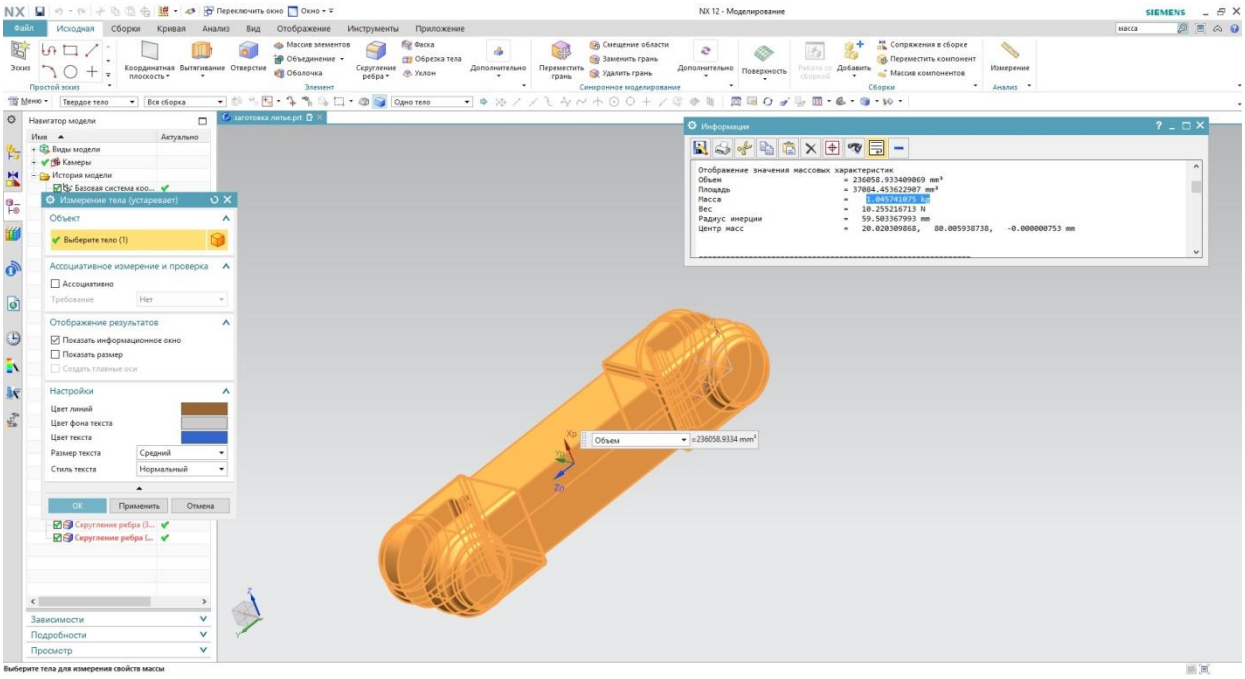


Рисунок 4.8 – Модель та маса відлитої за витоплюваними моделями заготовки

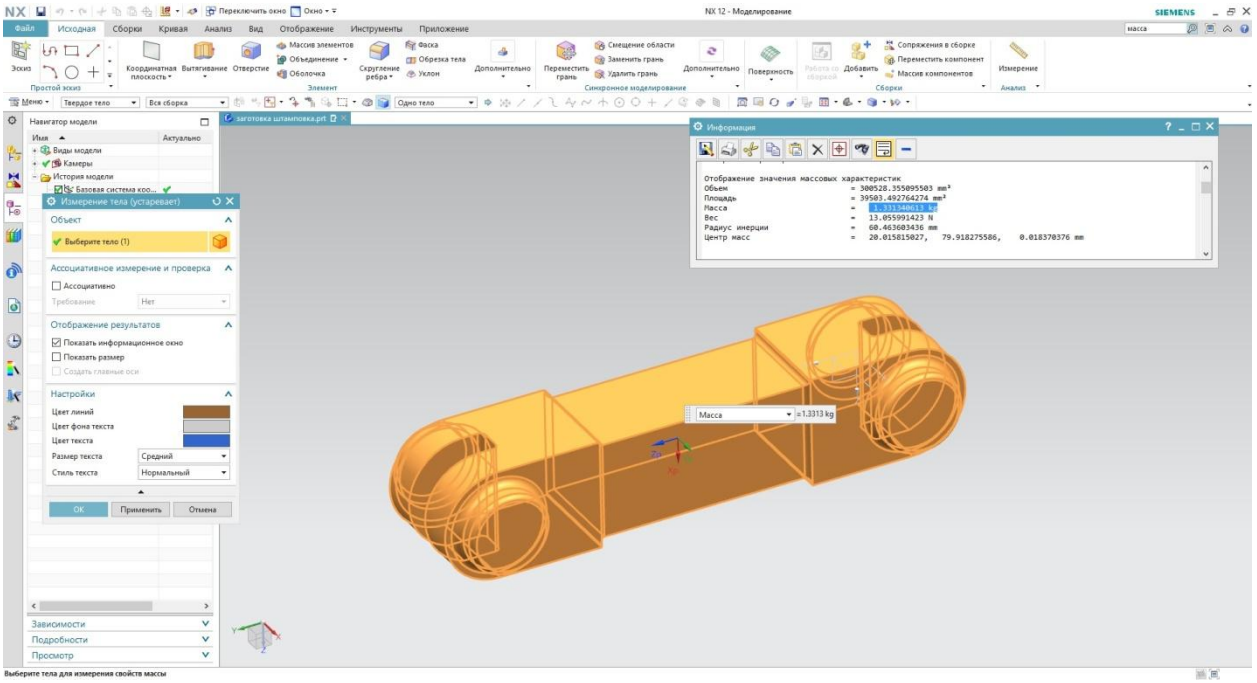


Рисунок 4.9 – Модель та маса заготовки отриманої на КГШП

Для ГІП: Q = 0,97 кг.

Для КГШП: Q = 1,33 кг.

Для лиття за витоплюваними моделями: Q = 1,045 кг.

Розрахуємо коефіцієнт використання матеріалу заготовки [27, с.6]:

$$\eta = \frac{q}{Q}; \quad (4.1)$$

де q – маса деталі, кг;

Q – маса заготовки, кг;

$$\eta_1 = \frac{0{,}87}{0{,}97} = 0{,}89;$$

$$\eta_2 = \frac{0{,}87}{1{,}33} = 0{,}65;$$

$$\eta_3 = \frac{0{,}87}{1{,}045} = 0{,}83.$$

Розраховуємо собівартість 1 заготовки [27,с.5].

Для ГІП:

$$\text{В} = \frac{\text{В}_\text{б}}{1000} \cdot Q \cdot \text{К}_\text{Т} \cdot \text{К}_\text{М} \cdot \text{К}_\text{В} \cdot \text{К}_\text{З} \cdot \text{К}_\text{П} - (Q - q) \cdot \frac{\text{В}_\text{відх}}{1000}; \quad (4.2)$$

де $\text{В}_\text{б}$ – базова вартість однієї тони заготовок, грн. [18];

Q – маса заготовки, кг;

$\text{К}_\text{Т}, \text{К}_\text{М}, \text{К}_\text{В}, \text{К}_\text{С}, \text{К}_\text{П}$ – коефіцієнти, що враховують клас точності, матеріал, групу складності, масу заготовки і програму випуску відповідно [27, с.18, т.1.24 – 1.28];

q – маса деталі, кг;

$\text{В}_\text{відх}$ – вартість 1 тони стружки, грн. [27, с.13, т.1.5];

$$\text{В}_1 = \frac{1050000}{1000} \cdot 0{,}97 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}29 \cdot 0{,}87 \cdot 1 - (0{,}97 - 0{,}87) \cdot \frac{51000}{1000} = 1138 \text{ грн.}$$

Для КГШП розраховуємо за формулою (4.2):

$$\text{В}_2 = \frac{530000}{1000} \cdot 1{,}33 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}29 \cdot 0{,}87 \cdot 1 - (1{,}33 - 0{,}87) \cdot \frac{51000}{1000} = 767 \text{ грн.}$$

Для лиття за витоплюваними моделями розраховуємо за формулою (4.2):

$$В_З = \frac{1000000}{1000} \cdot 1{,}045 \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}23 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}93 \cdot 1{,}23 - (1{,}045 - 0{,}87) \times$$

$$\times \frac{51000}{1000} = 1071 \text{ грн.}$$

Отримані данні заносимо в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Порівняльні показники за варіантами [27, с.10, т.1.1]

Показники	Позначення	Вимір	ГІП	КГШП	Лиття за витоплюваними моделями
Припуск	Z	мм	0,3	2,3	0,5
Вага заготовки	Q	кг	0,97	1,33	1,045
Базова вартість 1 т. заготовок	$В_б$	грн	1050000	530000	1000000
Коефіцієнти	$К_Т$	-	1		1,05
	$К_М$	-	1		1,23
	$К_С$	-	1,29		0,7
	$К_В$	-	0,87		0,93
	$К_П$	-	1		1,23
Вартість 1 т. стружки	$В_{Стр}$	грн	51000	51000	51000
Вартість однієї заготовки	В	грн	1138	767	1071
Коефіцієнт використання матеріалу	η	-	0,89	0,65	0,83

В результаті зроблених розрахунків отримуємо:

$$В_2 < В_З < В_1$$

$$\eta_2 < \eta_З < \eta_1$$

Порівняємо заготовку отриманою ГІП з литою заготовкою.

Розрахуємо додаткові витрати [27].

1) За собівартістю [27, с.6]:

$$З_{D_1} = (В_1 - В_З) \cdot N; \quad (4.3)$$

де $В_1, В_З$ – вартість однієї заготовки, грн;

N – річна програма, шт;

$$З_{D_1} = (1138 - 1071) \cdot 500 = 33500 \text{ грн};$$

2) За матеріалом [27, с.6]:

$$М_З = \frac{q \cdot (\eta_1 - \eta_З)}{\eta_1 \cdot \eta_З} \cdot N; \quad (4.4)$$

де q – маса деталі;

$\eta_1, \eta_З$ – коефіцієнти використання матеріалу;

N – річна програма, шт;

$$М_З = \frac{0{,}87 \cdot (0{,}89 - 0{,}83)}{0{,}89 \cdot 0{,}83} \cdot 500 = 36 \text{ кг};$$

В гривнах [27, с.7]:

$$З_{D_{мз}} = \frac{В_{бз}}{1000} \cdot M \cdot К_Т \cdot К_М \cdot К_В \cdot К_З \cdot К_П; \quad (4.5)$$

де $В_З$ – базова вартість однієї тони заготовок [18];

М – додаткові витрати за матеріалом, кг;

$К_Т, К_М, К_В, К_З, К_П$ – коефіцієнти, що враховують клас точності, матеріал, групу складності, масу заготовки і програму випуску відповідно [27, с.18, т.1.24 – 1.28];

$$З_{D_{мз}} = \frac{1000000}{1000} \cdot 36 \cdot 1{,}05 \cdot 1{,}23 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}93 \cdot 1{,}23 = 37229 \text{ грн};$$

3) Річна економія [27, с.7]:

$$\text{Е}_\text{р} = З_{D_{\text{мз}}} - З_{D_1}; \quad (4.6)$$

де $З_{D_1}$ – додаткові витрати за вартістю, грн;

$З_{D_{\text{мз}}}$ – додаткові витрати за матеріалом, грн;

$$\text{Е}_\text{р} = 37229 - 33500 = 3729 \text{ грн.}$$

Порівняємо заготовку отриманою ГІП з заготовкою на КГШП.

Розрахуємо додаткові витрати [27].

1) За собівартістю розрахуємо за формулою (4.3):

$$З_{D_1} = (1138 - 767) \cdot 500 = 185500 \text{ грн;}$$

2) За матеріалом розрахуємо за формулою (4.4):

$$\text{М}_2 = \frac{0{,}87 \cdot (0{,}89 - 0{,}65)}{0{,}89 \cdot 0{,}65} \cdot 500 = 180 \text{ кг;}$$

В гривнах розрахуємо за формулою (4.5):

$$З_{D_{\text{м2}}} = \frac{530000}{1000} \cdot 180 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}29 \cdot 0{,}87 \cdot 1 = 107000 \text{ грн;}$$

3) Річна економія [27, с.7]:

$$\text{Е}_\text{р} = З_{D_1} - З_{D_{\text{м2}}}; \quad (4.7)$$

де $З_{D_1}$ – додаткові витрати за вартістю, грн.;

$З_{D_{\text{м2}}}$ – додаткові витрати за матеріалом, грн;

$$\text{Е}_\text{р} = 185500 - 107000 = 78500 \text{ грн.}$$

В результаті отриманих даних можна сказати, що заготовка виготовлена за технологією ГІП має високу собівартість ($\text{В}_1 = 1138$ грн), але має і високий

коефіцієнт використання матеріалу ($\eta_1 = 0{,}89$). Порівнюючи даний метод з литтям за витоплюваними моделями, заготовка якого також має досить високу собівартість ($B_3 = 1071$ грн), доцільно за рахунок кращого коефіцієнту використання матеріалу обрати заготовку після ГІП, яка дає річну економію $E_p = 3729$ грн, але заготовка виготовлена на КГШП демонструє досить високу економію у порівнянні з заготовкою після ГІП ($E_p = 78500$ грн).

Виходячи з результату розрахунку, рисунку 4.2 та даних таблиці 4.3, можна сказати, що виготовляти заготовки методом ГІП з економічної точки зору доцільно для деталей більш складної конфігурації. Отримані деталі мають переваги про які буде сказано у підрозділі 4.4.

4.4 Аналіз міцності деталі з порошкового титану

Проведемо дослід. Побудовану в системі Siemens NX 12 модель деталі з’єднувального кронштейну з титанового сплаву ВТ6 (зарубіжний аналог Ti-6AI-4V) завантажимо у програму Ansys (рисунок 4.10). Мета досліду – показати переваги методу ГІП у порівнянні з литтям, штампуванням та АТ на прикладі титанового сплаву ВТ6 (ВТ6Л для лиття).

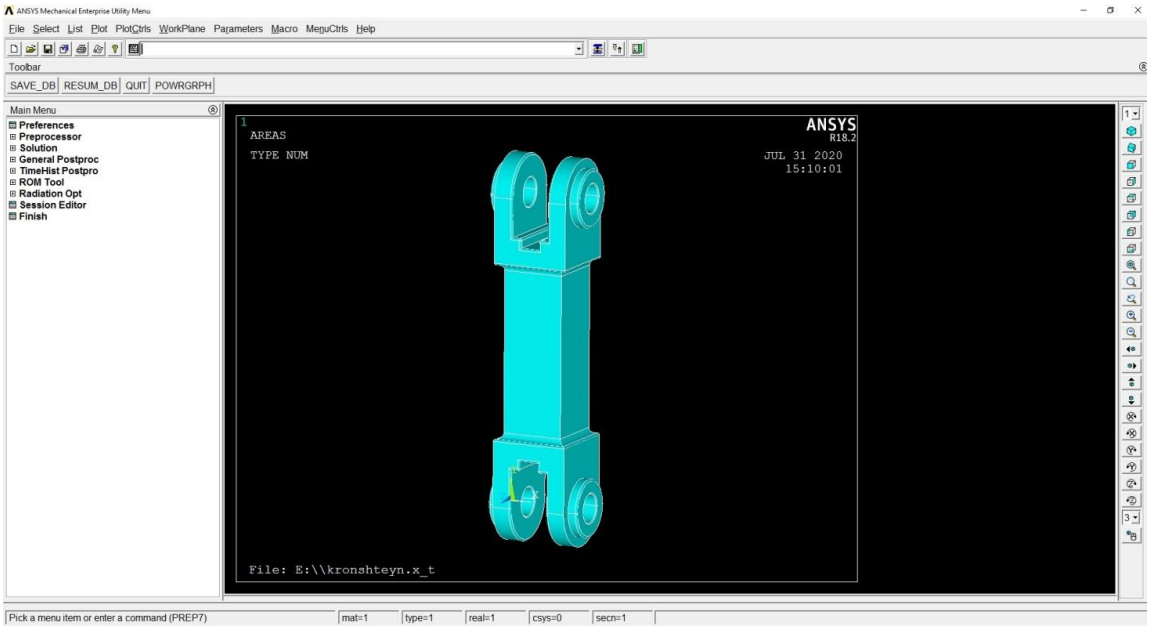


Рисунок 4.10 – Модель деталі з’єднувального кронштейну

Перевіримо деталь на розрив. Вихідні дані для розрахунку (властивості матеріалу після різних методів обробки) наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для розрахунку

Метод отримання	Властивість		
	Щільність ρ, г/см^3	Модуль пружності E, МПа	Коефіцієнт Пуассона
Лиття	4,43	$1{,}15 \cdot 10^{-5}$	0,32
Штампування	4,45		
Адитивні технології	4,5		
Гаряче ізостатичне пресування	4,6		

Розіб’ємо деталь на сітку кінцевих елементів (рівень SmartSize – 6, тип кінцевого елемента «20node186») (рисунок 4.11):

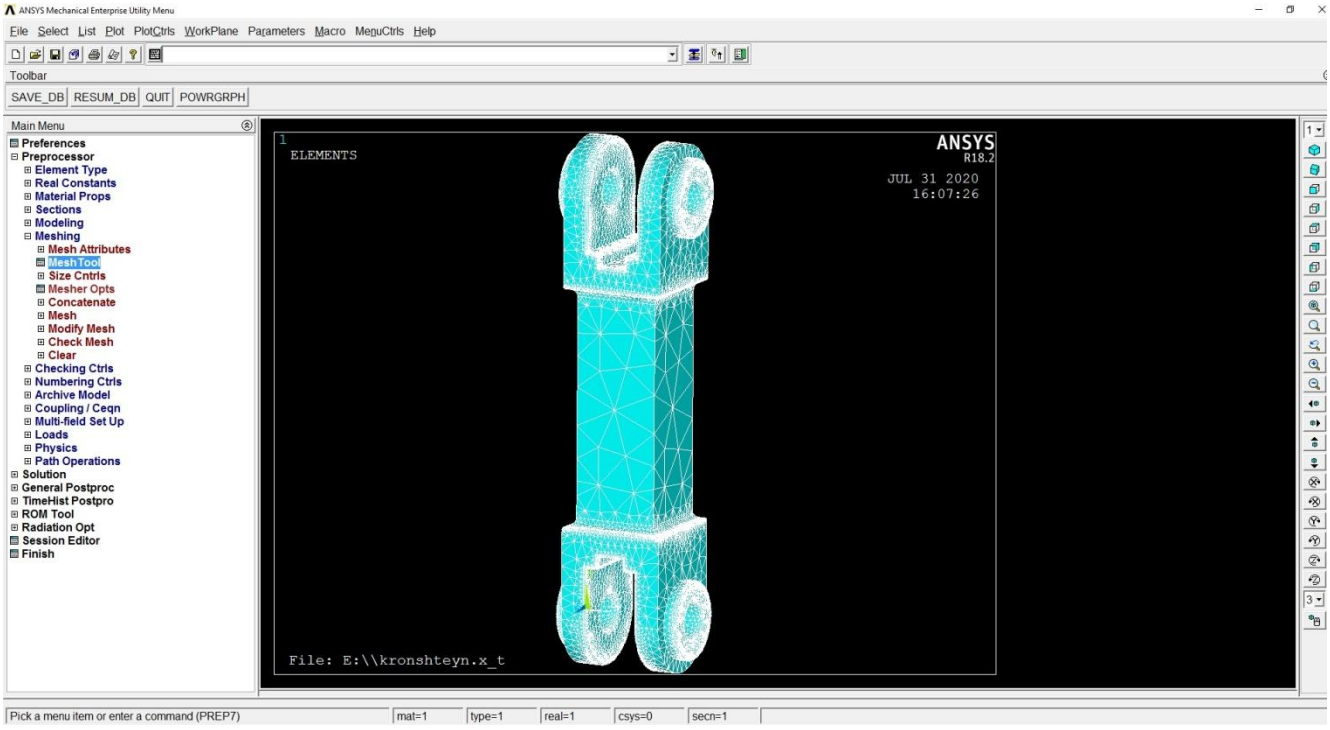


Рисунок 4.11 – Модель деталі розбита на сітку кінцевих елементів

Вкажемо властивості матеріалу (на прикладі матеріалу після ГІП): щільність – 4.6E3 (4,6 г/см^3), модуль пружності – 1.15E10 ($1{,}15 \cdot 10^{-5}$МПа), коефіцієнт Пуассона – 0.32.

Закріпимо деталь за два отвори (рисунок 4.12), а на протилежні отвори прикладемо тиск (рисунок 4.13) імітуючи реальне навантаження при роботі на кронштейн.

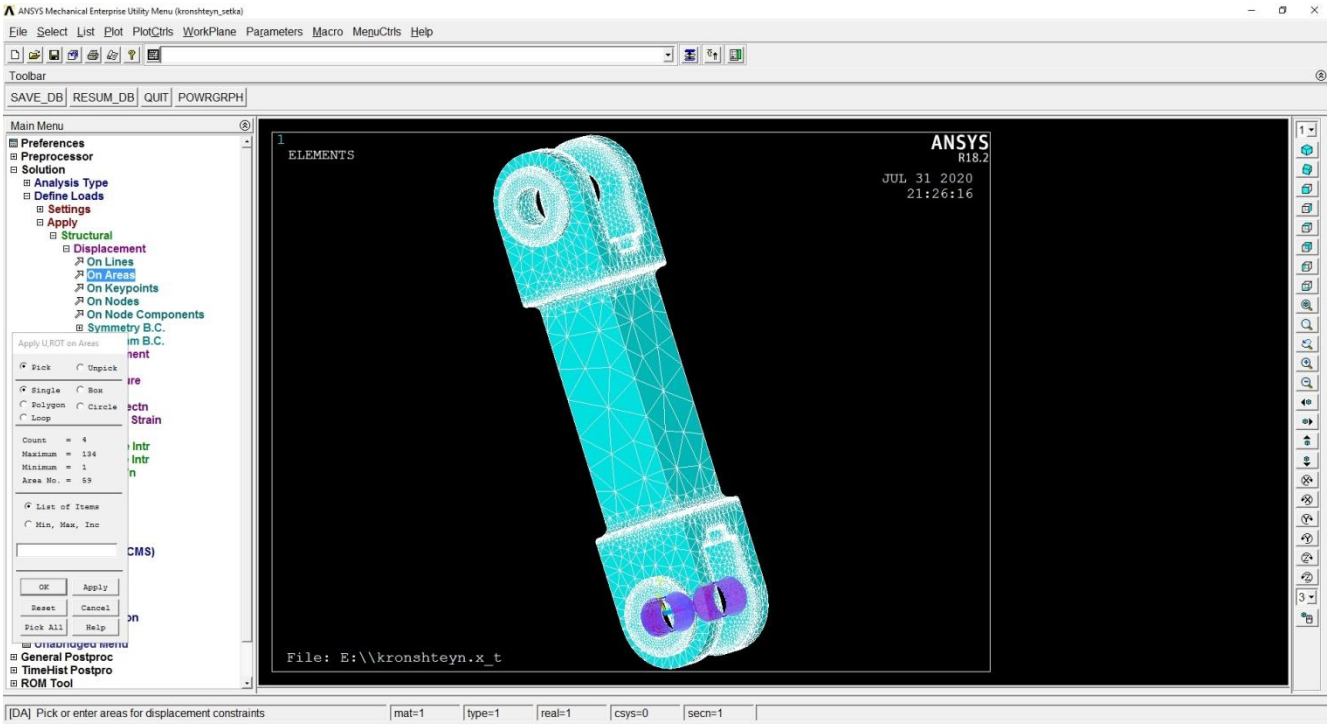


Рисунок 4.12 – Закріплення деталі

Для кожного методу отримання деталі проведемо 3 виміри, прикладаючи тиск 100, 200 та 400 МПа, і беручи до уваги, що границя міцності для сплаву ВТ6 – $\sigma_{\text{В}} = 950$ МПа.

Рисунок 4.13 – Приклад прикладення тиску на деталь

Вмикаємо розрахунок і отримуємо результати. Виконуємо розрахунки за даним алгоритмом для всіх методів і отримані результати (рисунки 4.14 – 4.25) заносимо у таблицю 4.7.

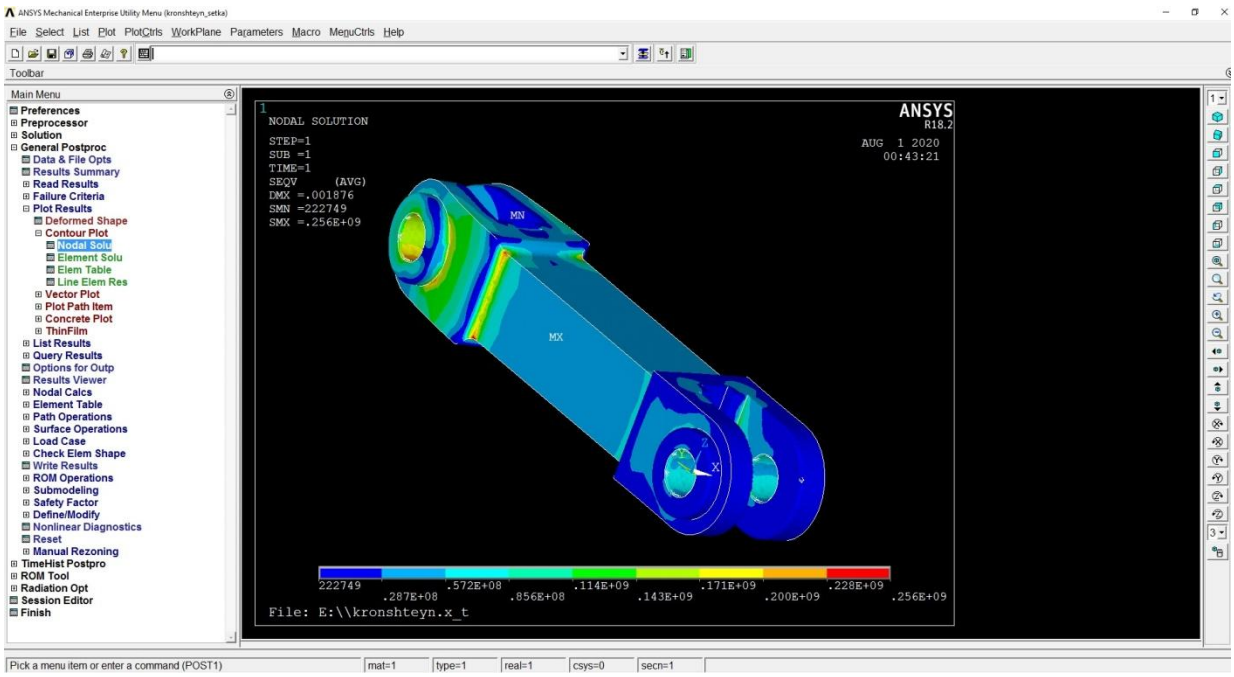


Рисунок 4.14 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 100$ МПа для литої деталі ($\sigma_{max} = 256$ МПа)

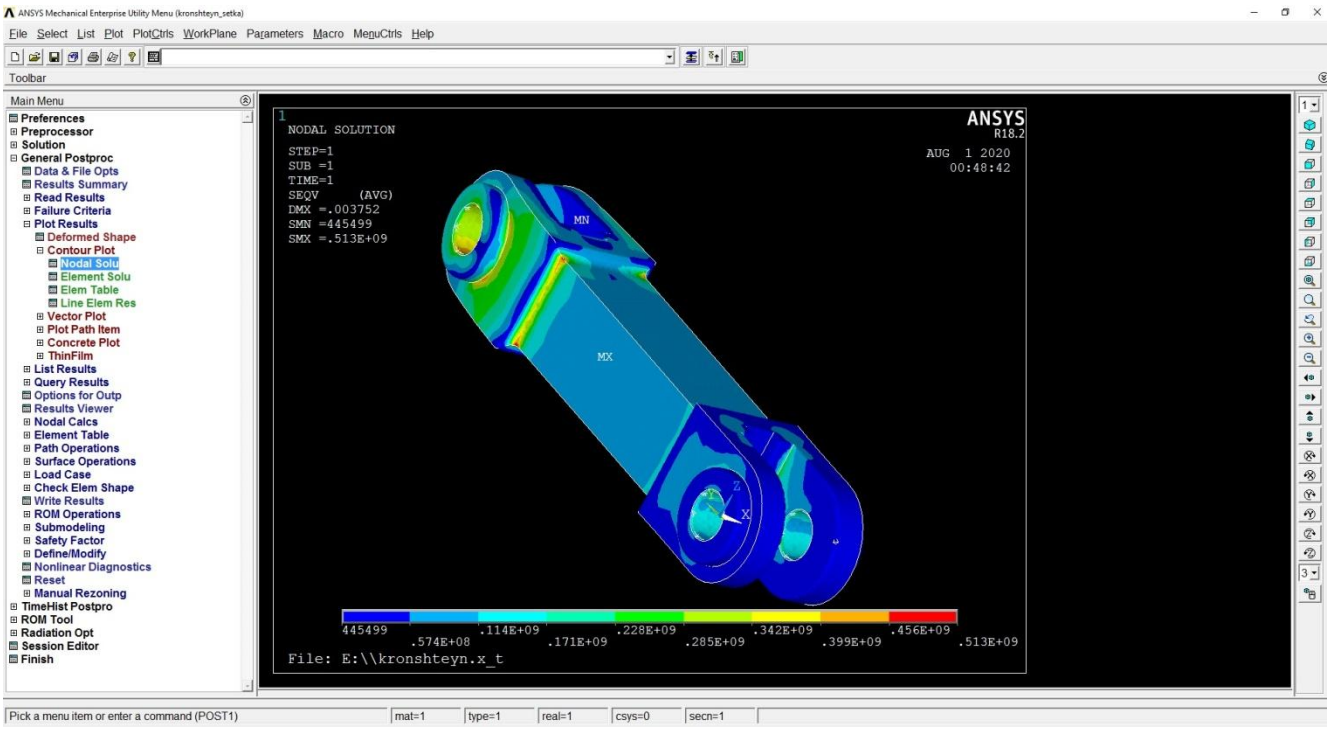


Рисунок 4.15 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 200$ МПа для литої деталі ($\sigma_{max} = 513$ МПа)

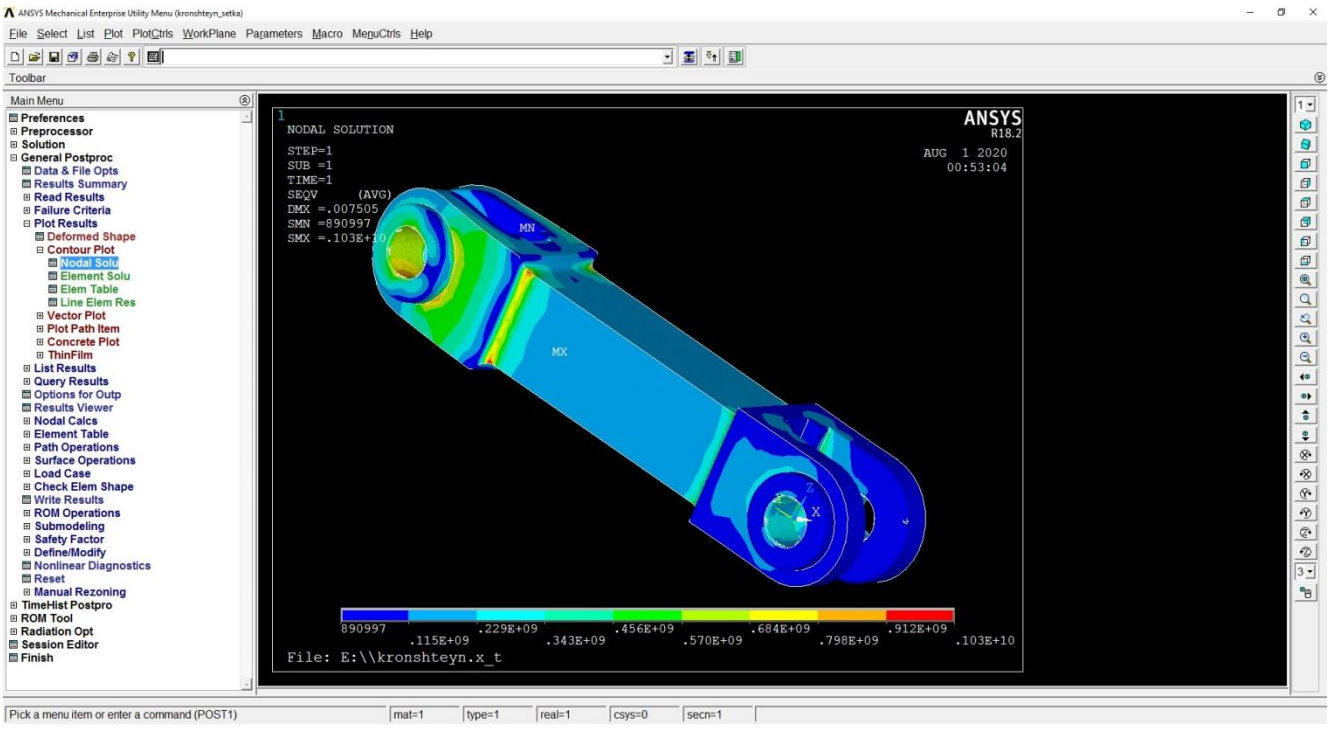


Рисунок 4.16 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 400$ МПа для литої деталі ($\sigma_{max} = 1030$ МПа)

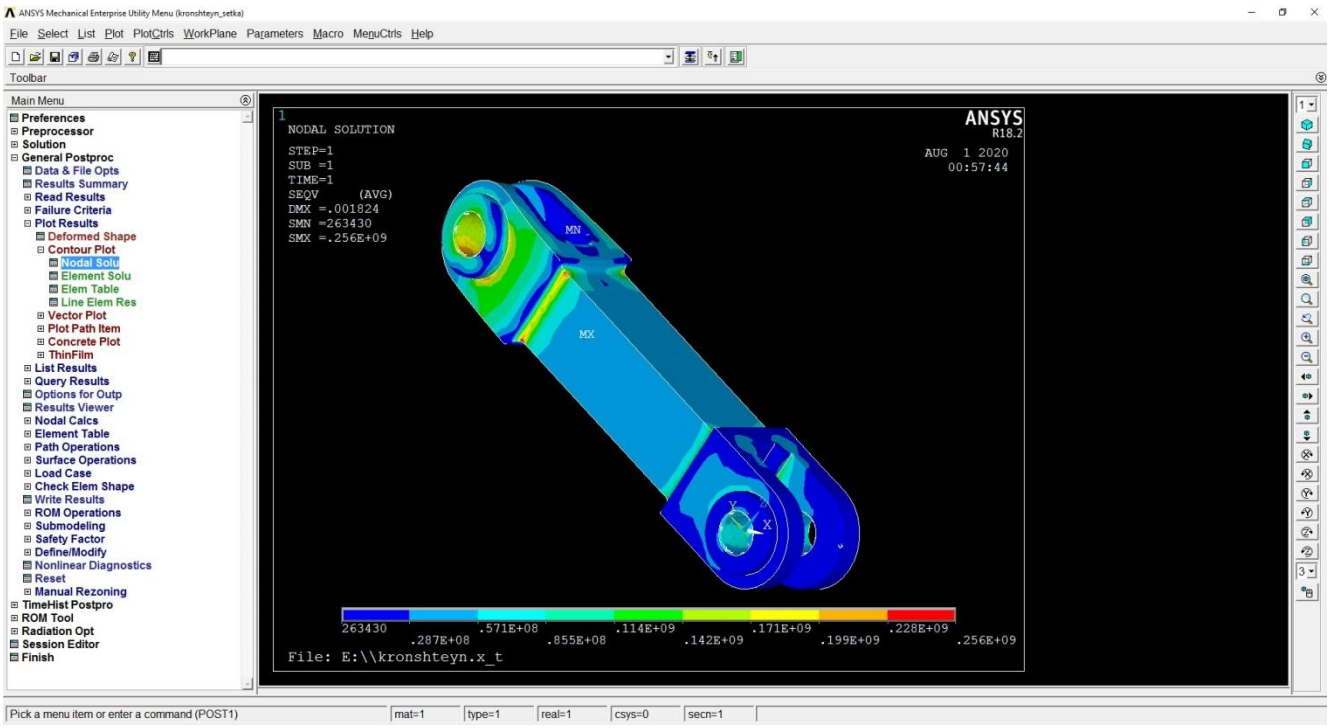


Рисунок 4.17 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 100$ МПа для штампованої деталі ($\sigma_{max} = 256$ МПа)

Рисунок 4.18 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 200$ МПа для штампованої деталі ($\sigma_{max} = 512$ МПа)

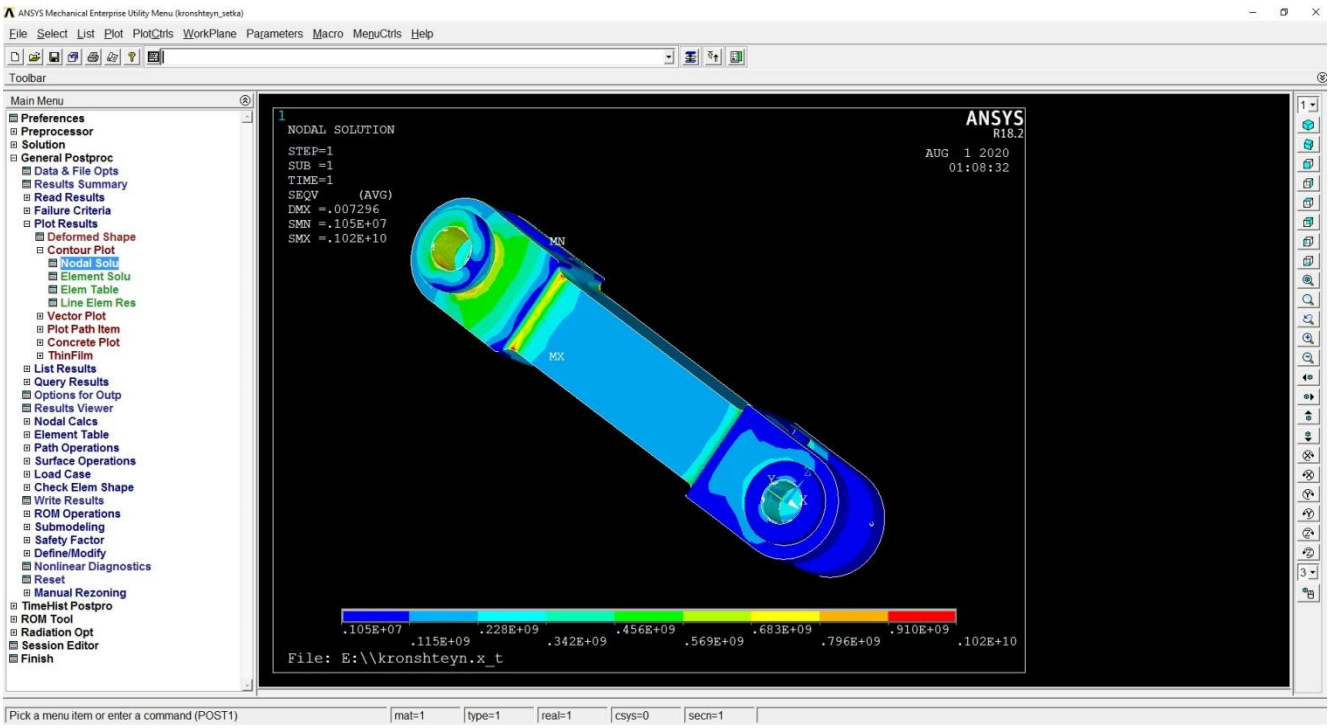


Рисунок 4.19 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 400$ МПа для штампованої деталі ($\sigma_{max} = 1020$ МПа)

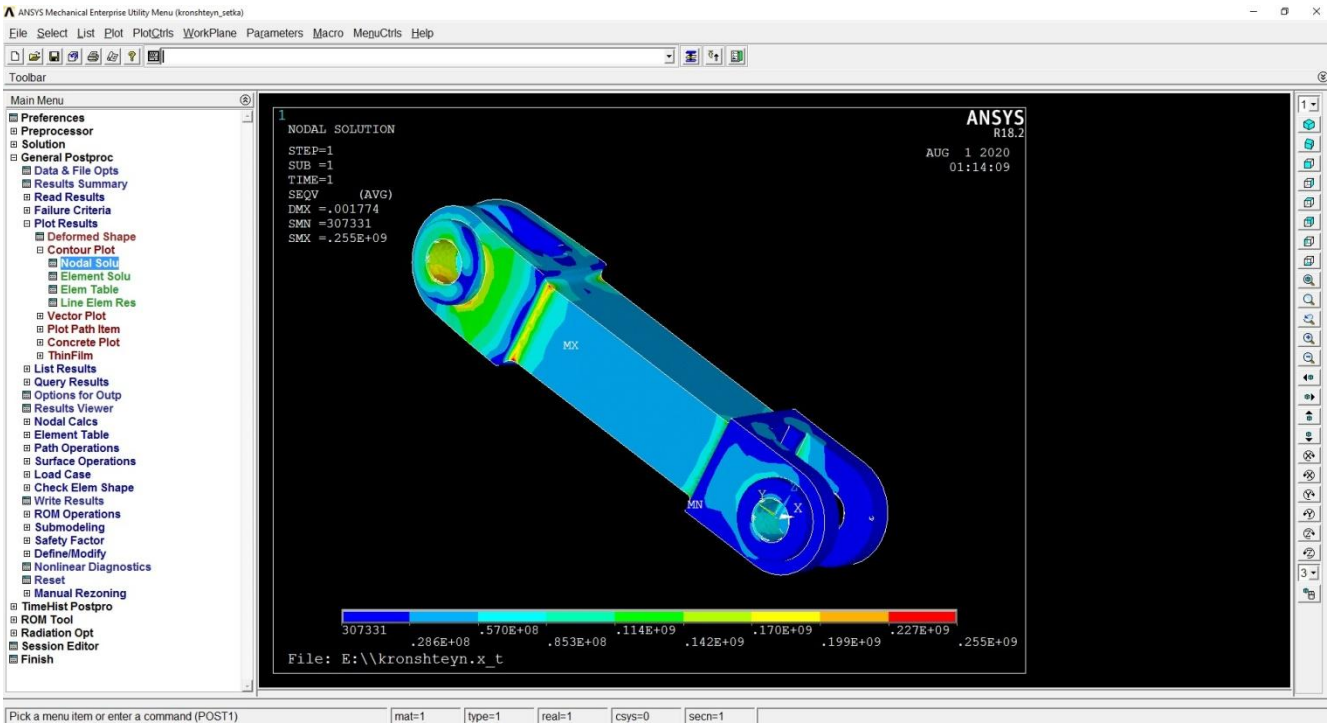


Рисунок 4.20 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 100$ МПа для деталі виробленої методом адитивних технологій ($\sigma_{max} = 255$ МПа)

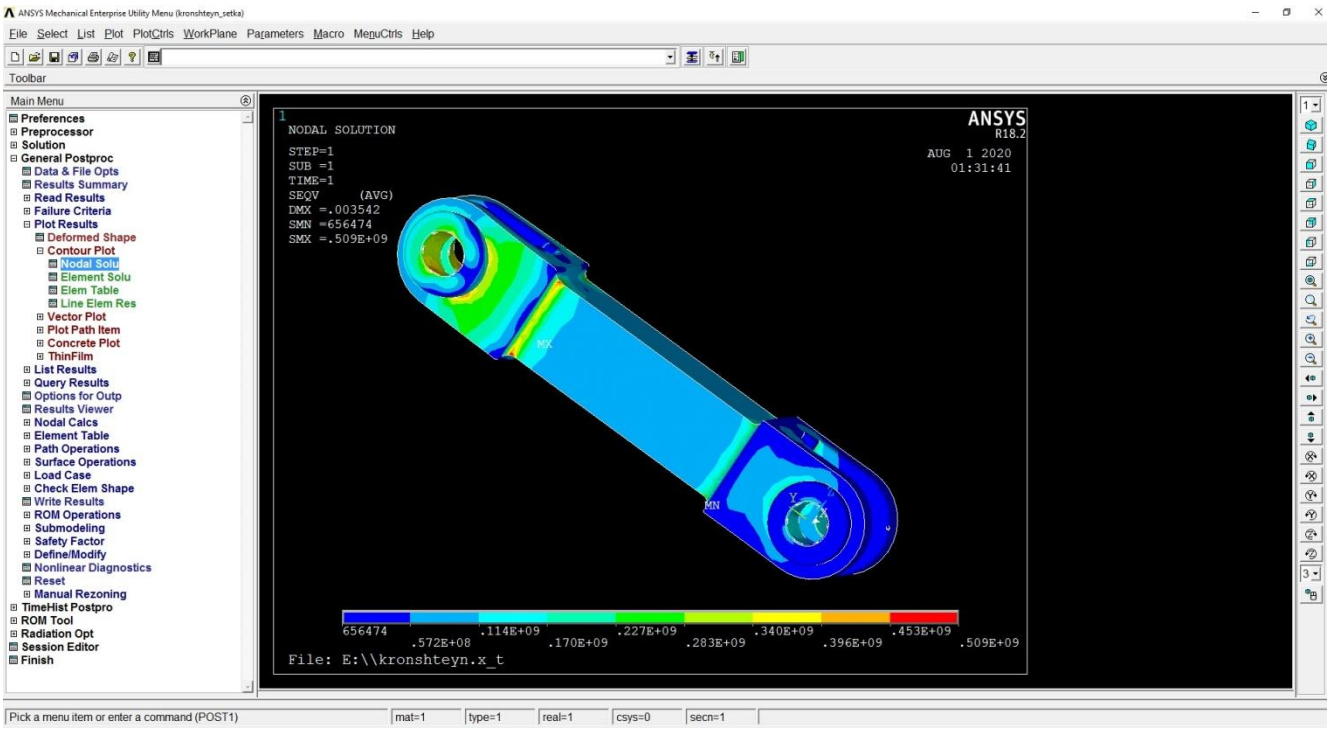


Рисунок 4.21 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 200$ МПа для деталі виробленої методом адитивних технологій ($\sigma_{max} = 509$ МПа)

Рисунок 4.22 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 400$ МПа для деталі виробленої методом адитивних технологій ($\sigma_{max} = 1020$ МПа)

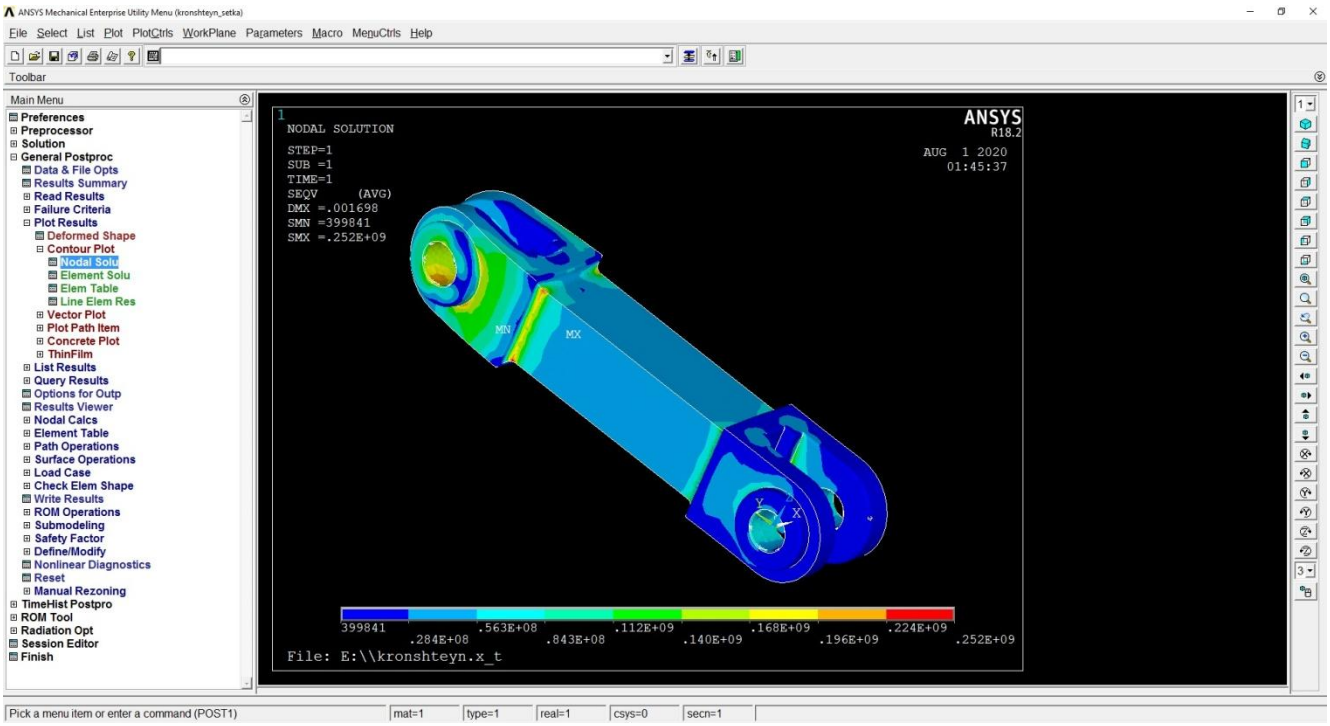


Рисунок 4.23 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 100$ МПа для деталі виготовленої методом ГІП ($\sigma_{max} = 252$ МПа)

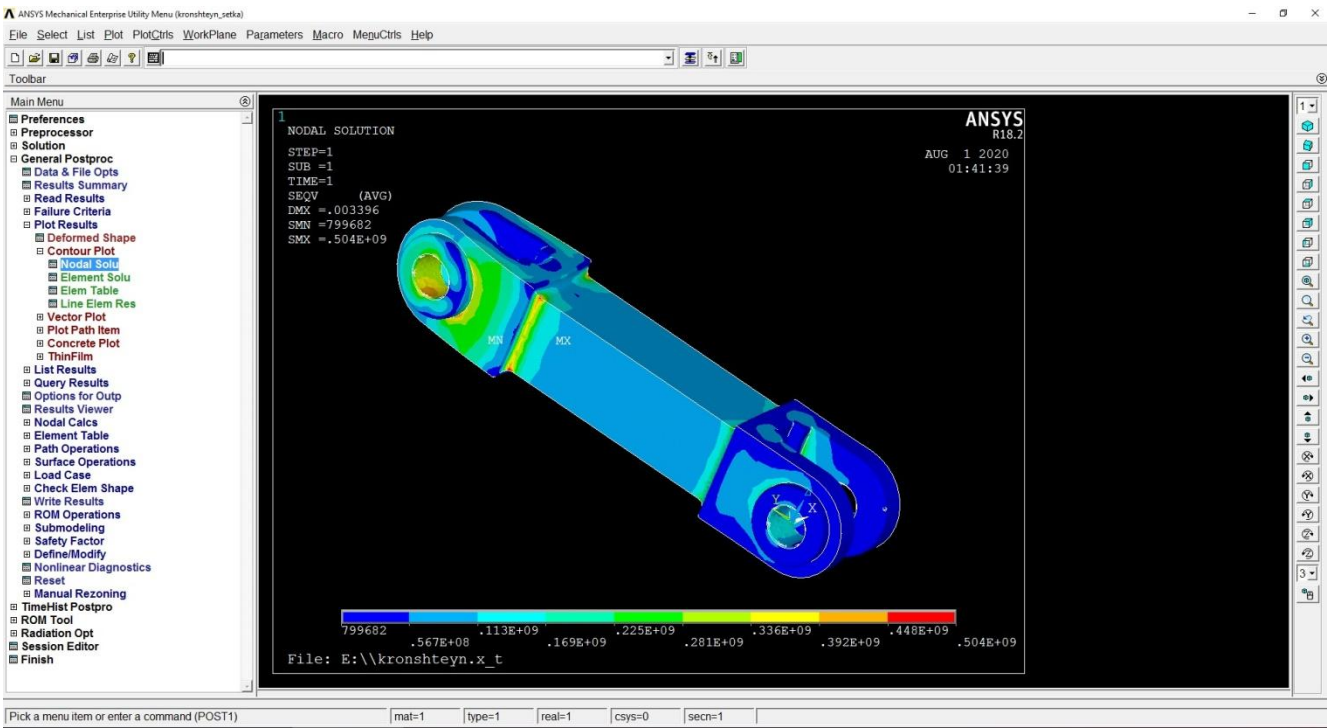


Рисунок 4.24 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 200$ МПа деталі виготовленої методом ГІП ($\sigma_{max} = 504$ МПа)

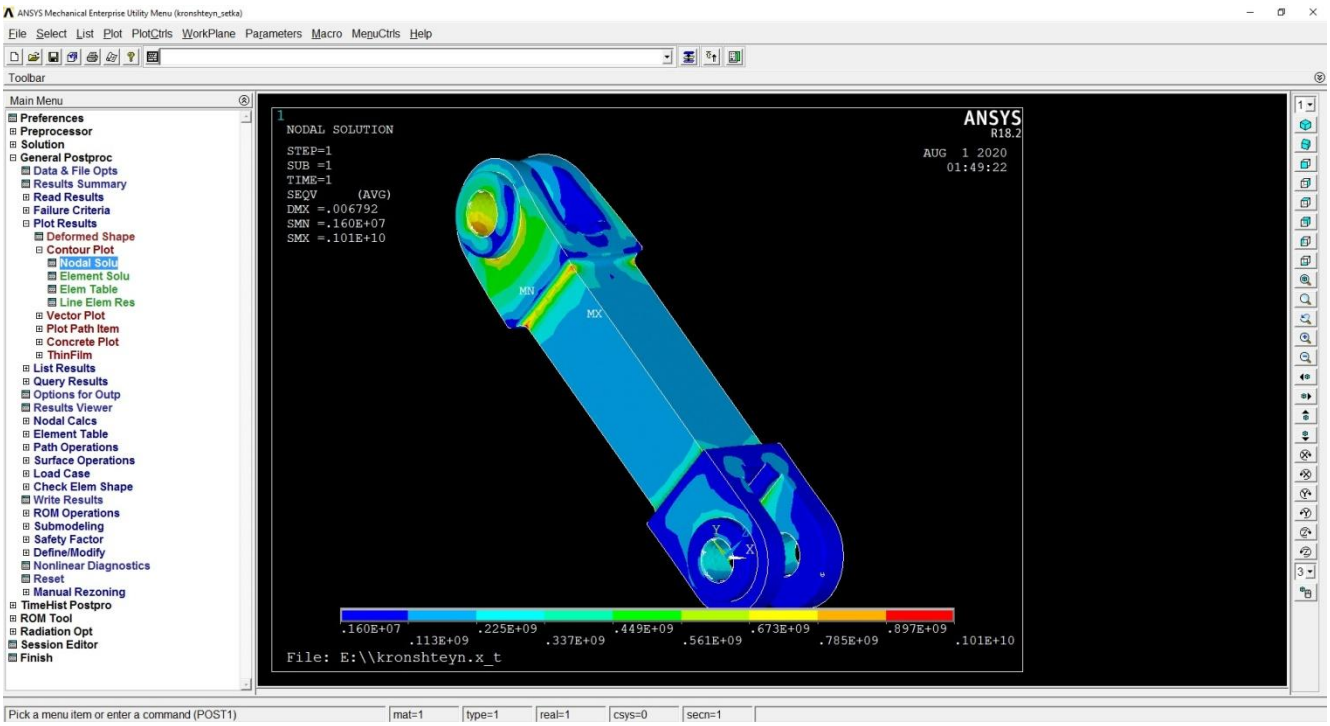


Рисунок 4.25 – Напруження за елементами/вузлами, за Мізесом (МПа) для тиску $\sigma_0 = 400$ МПа деталі виготовленої методом ГІП ($\sigma_{max} = 1010$ МПа)

Таблиця 4.7 – Результати розрахунків

σ_0, МПа	σ_{max}, МПа			
	Лиття	Штампування	Адитивні технології	Гаряче ізостатичне пресування
100	256	256	255	252
200	513	512	509	504
400	1030	1020	1020	1010

За таблицею 4.7 будуємо 4 графіка залежності опору матеріалу від прикладеного тиску (рисунки 4.26 – 4.29).

На графіках $\sigma_{\text{В}}$ - тимчасовий опір матеріалу ($\sigma_{\text{В}} = 950$ МПа). Для даної деталі запас надійності рівний 3, тому нормальний опір – $\sigma_{\text{Вн}} = 316$ МПа.

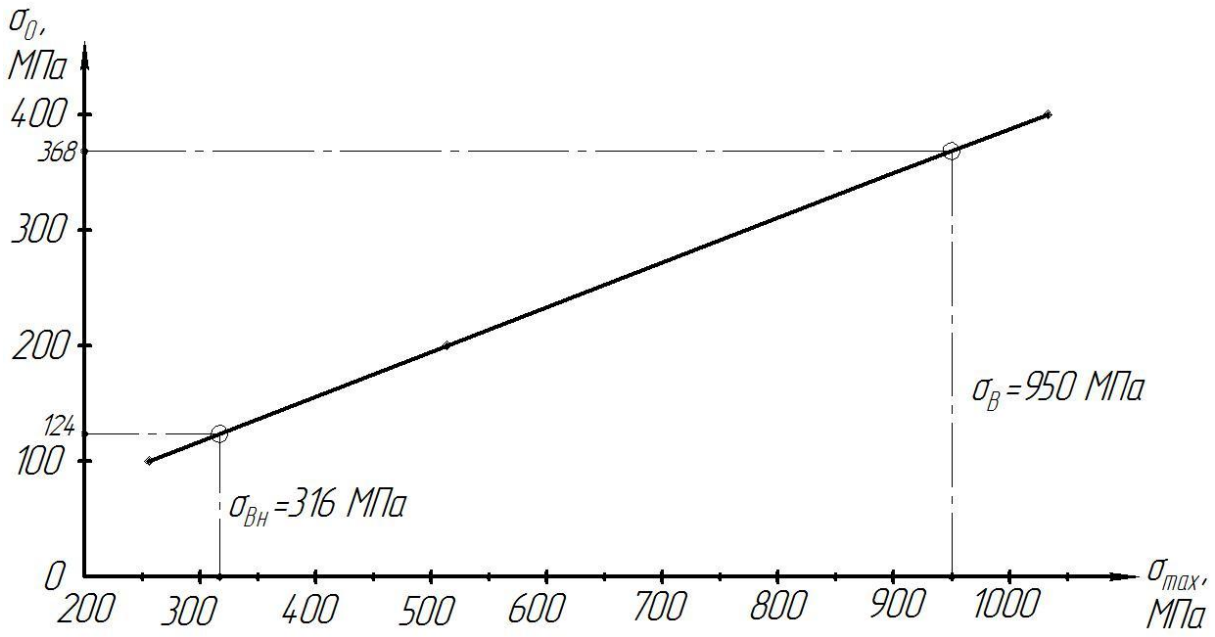


Рисунок 4.26 – Графік залежності опору матеріалу від прикладеного тиску для деталі виготовленої литтям

Нормальний опір деталь виготовлена литтям сприймає при 124 МПа, а критичний при 368 МПа.

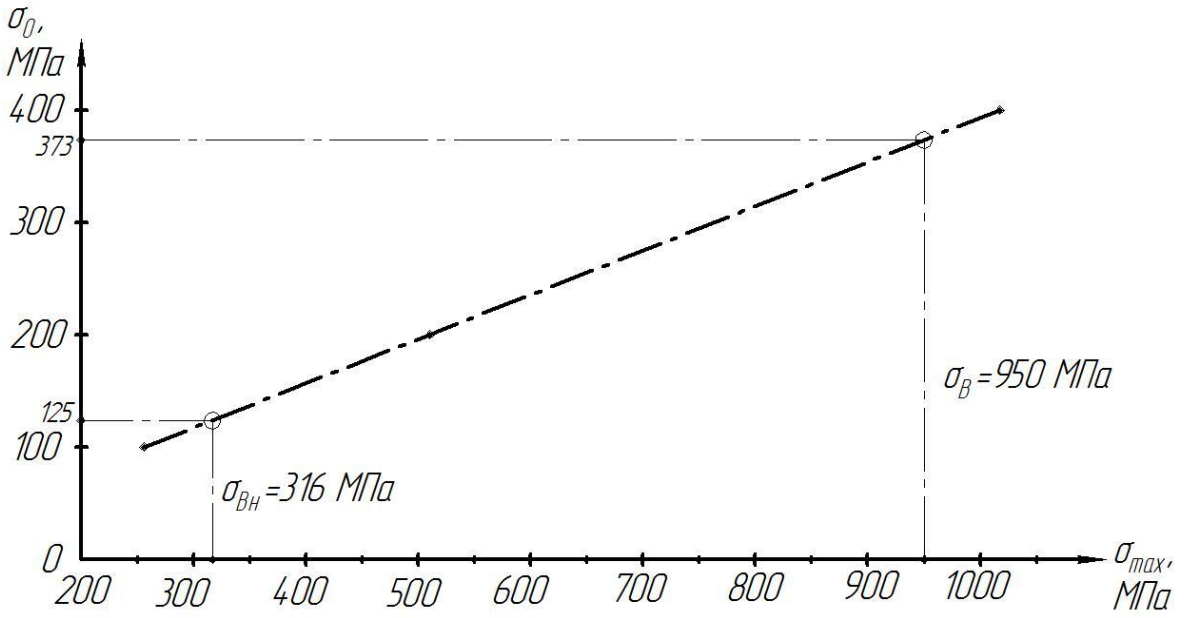


Рисунок 4.27 – Графік залежності опору матеріалу від прикладеного тиску для деталі виготовленої штампуванням

Нормальний опір деталь виготовлена штампуванням сприймає при 125 МПа, а критичний при 373 МПа.

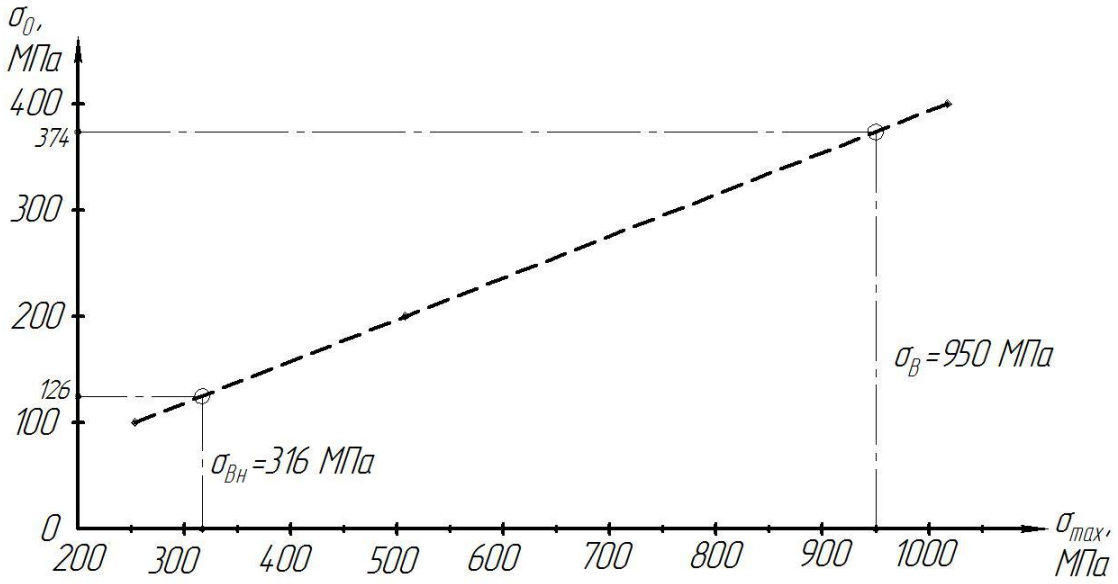


Рисунок 4.28 – Графік залежності опору матеріалу від прикладеного тиску для деталі виготовленої адитивними технологіями

Нормальний опір деталь виготовлена адитивними технологіями сприймає при 126 МПа, а критичний при 374 МПа.

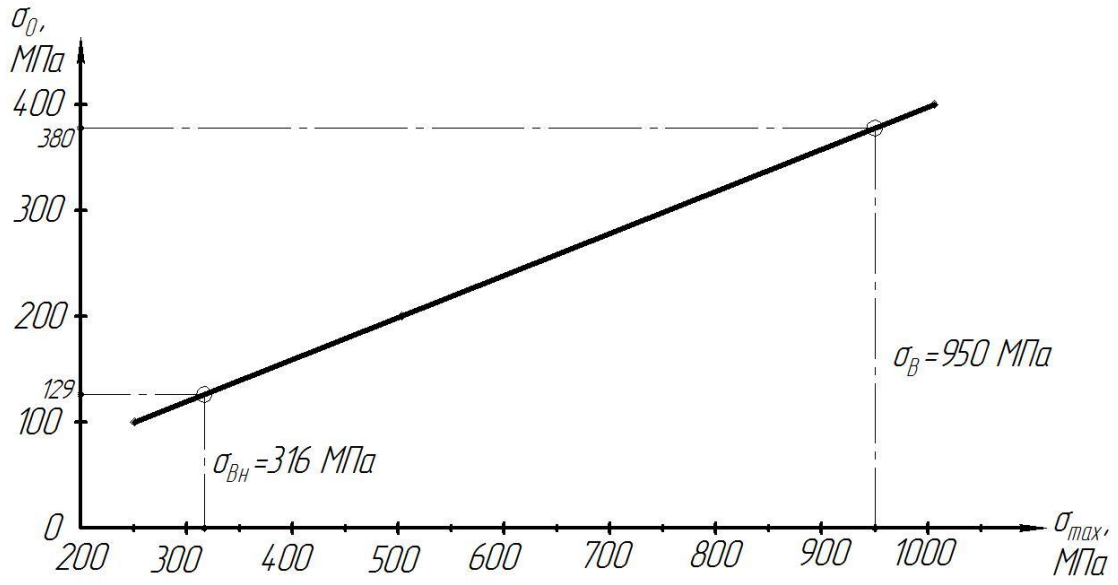


Рисунок 4.29 – Графік залежності опору матеріалу від прикладеного тиску для деталі виготовленої методом ГІП

Нормальний опір деталь виготовлена методом ГІП сприймає при 129 МПа, а критичний при 380 МПа.

Дані отримані з графіків заносимо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Максимальний тиск для нормального та критичного опору деталі виготовленої різними методами

Параметр	Метод отримання			
	Лиття	Штампування	Адитивні технології	Гаряче ізостатичне пресування
Критичний опір $\sigma_{В}$, МПа	368	373	374	380
Нормальний опір $\sigma_{Вн}$, МПа	124	125	126	129

Отримані значення підтверджують, що деталь виготовлена гарячим ізостатичним пресуванням витримує більші навантаження з врахуванням запасу міцності та без. Це досягається за рахунок кращих механічних властивостей які обумовлені особливістю технології. Вилита деталь має найгірші показники міцності на розрив. Штампована деталь та виготовлена на 3D принтері мають близькі за величиною значення міцності.

4.5 Застосування ізостатичного пресування

Технологія двостадійного ізостатичного пресування вдало пройшла випробування на експериментальних заготовках, тому можна впроваджувати її у виробництво. Технологія підходить для виробів різної форми та розмірів. Враховуючи особливості використаних матеріалів та титанових порошків в цілому, реально отримувати вироби з кращими механічними властивостями і структурою.

Проведений аналіз літературних джерел, отримані результати експериментів та розрахунків підтверджують, що ізостатичним пресуванням можна виробляти заготовки для авіаційних вузлів та додатково обробляти їх.

Виділимо 3 методи використання технології ізостатичного пресування для авіа вузлів:

1. Двостадійне ізостатичне пресування (ХІП + ГІП + ТО (при необхідності)) (рисунок 4.30).

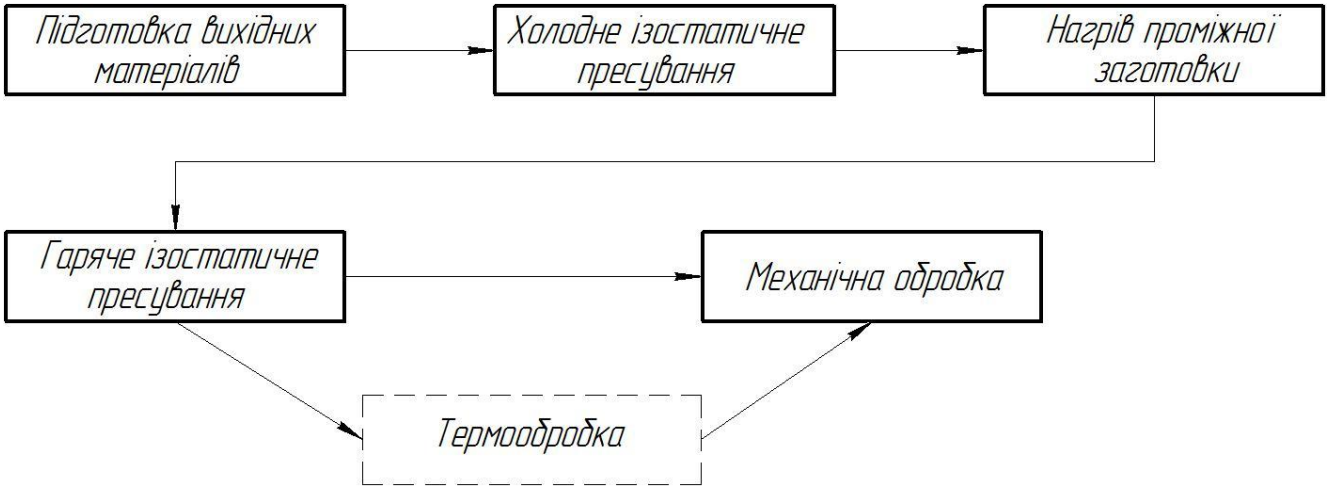


Рисунок 4.30 – Технологія виготовлення деталі з використанням ізостатичного пресування

2. 3D моделювання з подальшою обробкою ГІП. Отриманий виріб при необхідності можливо обробити механічно (рисунок 4.31).

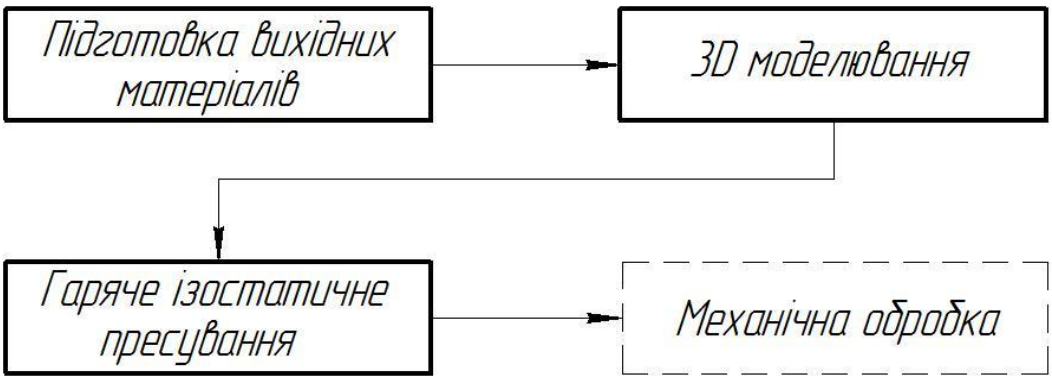


Рисунок 4.31 – Технологія виготовлення деталі з обробкою ізостатичним пресуванням

3. Покращення якості захисного покриття за допомогою ГІП.

Наприклад, у роботі [28] в якості захисного покриття використовували сплав марки СДП-ТВГ системи легування Ni-Cr-Al-Ta-W-Hf-Si-Y, який наносили методом електродугового катодного напилення на поверхню монокристальних зразків зі сплаву ЖС32 (аналог підкладки в АТ). Для отримання комбінованого покриття алітування проводили в газовому середовищі, що містить нітрати алюмінію, при температурі 1000°С. Таким чином, на поверхні лопаток створювався шар захисного композиційного покриття, основними дефектами якого були мікропори, зазвичай розташовані на кордоні розділу покриття з підкладкою (рисунок 4.32).

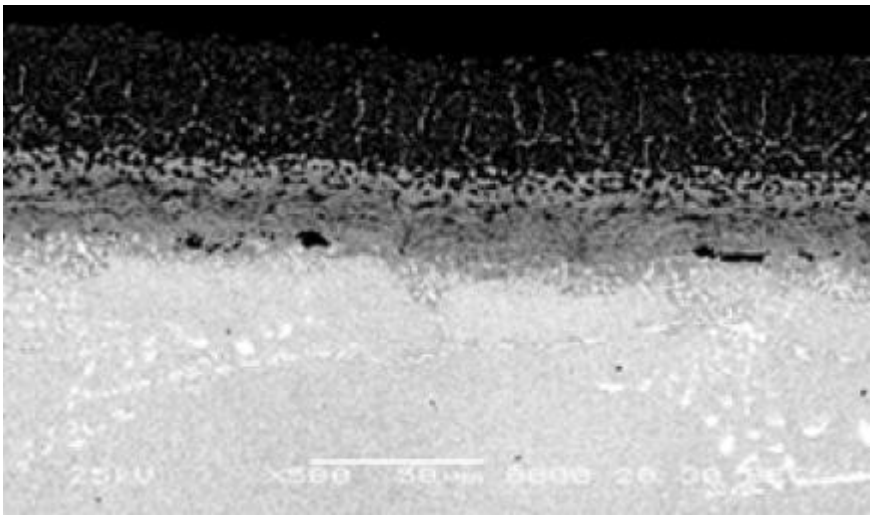


Рисунок 4.32 – Мікроструктура композиційного покриття на зовнішній поверхні пера лопатки з порами [28]

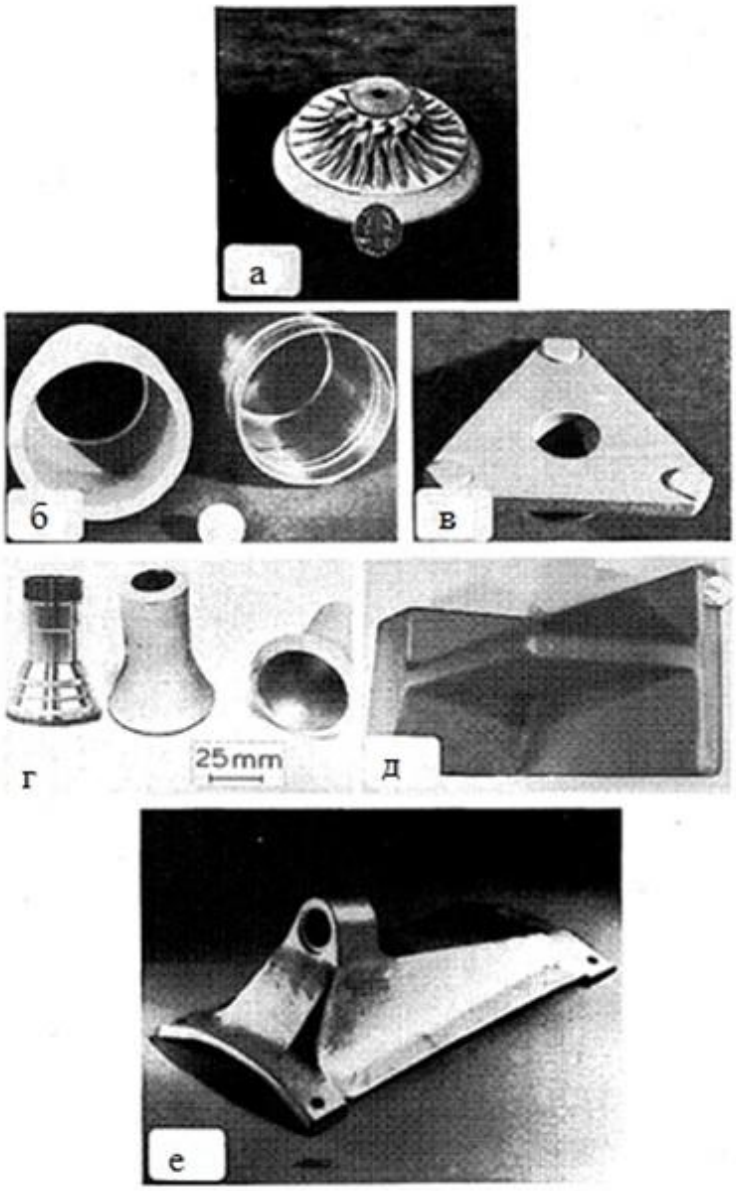
Зменшення пір і мікротріщин в зоні захисного покриття за допомогою ГІП, підвищення адгезії покриття з пером лопатки супроводжуються поліпшенням втомної міцності лопаток [19]. Отримані результати дозволили розробити технологію ГІП для ущільнення захисного жароміцного покриття на готових лопатках, яка застосовується на підприємстві ВАТ «ММП ім. Чернишова» в серійному виробництві лопаток з монокристалічною структурою зі сплаву ЖС32.

Для авіа та ракетобудування порошкова металургія з кожним роком застосовується у більших об’ємах. Дуже складні деталі, такі як відцентрове

колесо, показане на рисунку 4.33а, або елемент планера літака на рисунку 4.33д, можуть бути отримані методом ГІП [18]. Допуски на розміри становлять близько ± 0,5 мм.

Сітчаста дзеркальна втулка, показана на рисунку 4.33в, є ще одним прикладом виробленої в даний час аерокосмічної деталі, яка показала економію 60% в порівнянні з литою деталлю. Деталь, показана на рисунку 4.33д, являє собою конструктивний елемент планера винищувача F-18 (поворотний кронштейн), виготовлений з Ti-6AI-4V, який отримав премії MPIF за видатні досягнення 1987 року за продемонстровану істотну економію коштів [18].

Більші деталі важко виготовити шляхом зварювання невеликих частин, оскільки деталі з порошкового титану погано зварюються через властивий йому вміст солі та/або пористості. Однак зварюваність може бути покращена, якщо рівень хлориду нижче 150 ч/млн, а нові розроблені титанові порошки з вмістом хлориду менше 10 ч/млн повинні зварюватися, як і литий матеріал аналогічного складу.



а – відцентрове колесо; б – корпус ракети Ti-6AI-4V; в – Ti-6AI-4V сітчаста дзеркальна втулка; г – корпус лінзи; д – корпус планера; е – поворотний кронштейн Ti-6AI-4V

Рисунок 4.33 – Приклади виготовлених деталей [18]

Метод схожий на ГІП можна використовувати для виробництва фольги, листа і пластини. Пластина виготовляється шляхом прокатки ущільненої заготовки; фольга та лист виготовляються безпосередньо з порошку, як схематично показано на рисунку 4.34.

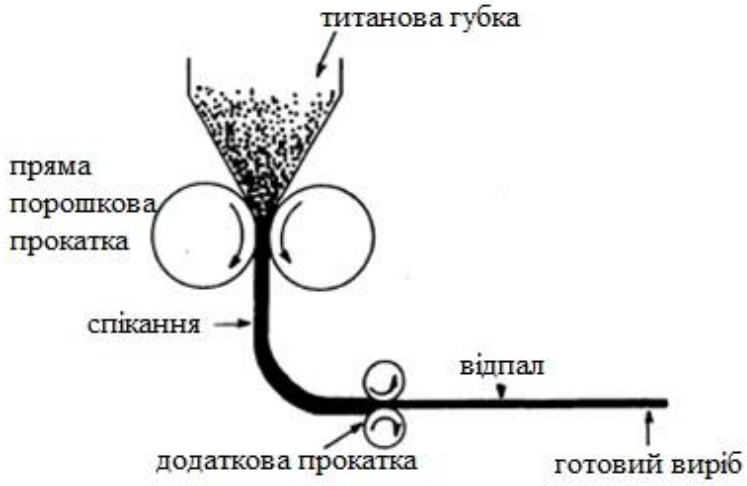


Рисунок 4.34 - Схема виготовлення листів з титанового порошку [18]

4.6 Висновки

1. Доведено економію методу ізостатичного пресування у порівнянні з куванням та литтям для деталей складної конфігурації.

2. Приведено приклади використання ГІП з адитивними технологіями та переваги виробів оброблених методом ГІП.

3. Порівняно вироби АТ та ГІП.

4. Проведено техніко-економічний розрахунок різних методів отримання заготовок та порівняння їх з заготовкою виробленою методом ГІП.

5. Проведено розрахунок на міцність у програмі Ansys деталі виробленої різними методами та доведено, що деталь після ГІП має кращі механічні властивості.

6. Перелічено способи використання ізостатичного пресування для авіа будування.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

При виконанні магістерської роботи було розроблено технологію виготовлення експериментальних партій заготовок методами ізостатичного пресування порошків титану. Дослідження проводилися на установках для ізостатичного пресування і індукторі для нагріву циліндричних заготовок (експериментальна частина) та персональному комп'ютері (ПК) (теоретична частина).

5.1 Аналіз потенційних небезпек

Під час виконання дослідів у лабораторії використовувались прес-форми для різних видів заготовок, вакуумний насос, 4 термопари, моновакуометр та твердомір для вимірювань.

При роботі з установками, індуктором та іншими приладами можуть проявитися такі потенційні небезпеки фізичного характеру [29]:

- механічне травмування робітника, яке може виникнути через вихід з ладу вакуумного насосу, це може привести як до легких (незначних) травм, так і до тяжких тілесних ушкоджень;

- ураження струмом, яке можливе при перевантажені мережі чи не коректну роботу обладнання, що призводить до можливого отримання травм від електричного струму;

- необережне перенесення прес-форми з заготовкою або необережне поводження з індуктором через недостатню кваліфікацію, що може призвести до отримання опіків;

- можливе отримання опіків при охолодженні заготовки через високотемпературні випаровування;

- підвищена стомленість очей при виконанні досліджень твердості на твердомірі;

- механічне травмування дослідника через людський фактор, яке може виникнути через його неуважність чи втому.

При роботі за ПК потенційну небезпеку становить перевищений вплив електромагнітних та іонізуючих випромінювань, може виникнути через неправильне використання комп'ютерного обладнання чи його застарілу модель, приводить до хвороб викликаними перевищеним випромінюванням.

Крім того можливі потенційні небезпеки психофізіологічного характеру:

- підвищене навантаження на нервову та психологічну систему, виникає через стомленість або нервову напруженість;

- при роботі за ПК стомленість може виникнути через неправильну позу для сидіння при роботі, або довготривалий безперервний час;

- недостатність досвіду або робота в обмеженому часі, що може призвести до помилок або невірних дій та викликати емоційне напруження.

Потенційні небезпеки санітарно-гігієнічного характеру:

- підвищений вміст пилу у робочій зоні, виникає через погане провітрювання приміщення та відсутність або вихід з ладу місцевої вентиляції, що призводить до виникнення у працюючого проблем з легенями;

- потрапляння частинок порошку в організм робочого через дихальні шляхи, причиною якого є необережне поводження з ємністю заповненою матеріалом або необережне поводження з прес-формою заповненою матеріалом, що може викликати потрапляння останнього у організм, несучи за собою проблеми зі здоров'ям.

Потенційні небезпеки, які можуть виникнути при порушені правил пожежної безпеки:

- вихід з ладу системи протипожежної безпеки призводить до знищення матеріальної бази лабораторії та отримання ушкоджень робітників;

- займання обладнання, може виникнути через коротке замикання, що призводить до опіків;

- недотримання правил експлуатації електричного обладнання, що може призвести до пожежі.

Причинами надзвичайних ситуацій у лабораторії можуть стати неправильне зберігання хімічних речовин, недостатня підготовленість персоналу, природні фактори.

5.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Для уникнення травмування при виконанні дослідницької роботи необхідно дотримуватись положень нормативно-правового акту з ОП (НПАОП) 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» зі змінами від 30.01.2017 № 140 [30].

Для забезпечення техніки безпеки при виконанні дослідів необхідно дотримуватись певних положень, що зазначено у ДСТУ EN ISO14159-2018 «Безпечність машин. Гігієнічні вимоги до конструкції машин» [31]. Обладнання повинно забезпечувати безпеку працюючих. Описуються правила користування органами управління обладнання, безпечне поводженням з ними, починаючи роботи необхідно перевіряти органи управління установок. Згідно державним стандартом, обладнання у лабораторії є безпечним для людей та навколишнього середовища [31].

При пресуванні заготовок, прес повинен відповідати вимогам ДСТУ ГОСТ 12.2.113:2007 «Преси кривошипні. Вимоги щодо безпеки» та ДСТУ EN 693:2014 «Верстати. Преси гідравлічні. Вимоги щодо безпеки» [32]. Перед початком роботи необхідно переконатися у справності манометрів, трубопроводів, кнопок, рукояток управління і кнопки «СТОП», наявності заземлюючих пристроїв. Зміну деталей при роботі на пресі робити тільки при крайньому верхньому положенні штоку. Тримати деталь при установці в пристосування, на пуансон або зняття з пристосування, пуансона за ті поверхні, де виключається травмування при мимовільному опусканні штоку [32].

Згідно «ПУЕ» опір захисного заземлення не перевищує 4 Ом [33]. Усі прилади, що виробляють магнітне поле повинні бути оснащені захисними екранами, аби обмежити дію даного поля на робочих. Лабораторія у якій

проводились досліди належить до ІІІ класу електричної безпеки (бетонні стіни та підлога), а кабінет з ПК до ІІ класу (бетонні стіни та дерев'яна підлога) [33]. Обладнання застосовується з захисним заземленням згідно ДСТУ EN 60204-32:2018 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги» [34].

Для безпечного переміщення прес-форми з заготовкою передбачено застосовувати спеціалізовані рукавиці, для зменшення ризику поранень рук, згідно вимог до індивідуального захисту робітників які наведені у ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація» [35]. Щоб не допустити пошкодження очей та органів дихання при роботі з порошком застосовуються захисні окуляри та респіратори.

Для уникнення травмування, негативних впливів та наслідків необхідно дотримуватися наступних вимог державного стандарту України (ДСТУ) 7950:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги» та ДСТУ 8604:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги» [36].

У державних санітарних правилах (ДСП) 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Зі змінами» [37] передбачені правила проектування виробничих приміщень, дослідницьких лабораторій та приміщень з ПК (площа робочого місця не менше $S = 6\text{м}^2$, об'єм робочого місця $V - 20\text{м}^3$, відстань між робочими місцями не менше 2,5 м у ряду і 1,2 м між рядами) [37].

Працюючим необхідно дотримуватись державних санітарних правил і норм (ДСанПіН) 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [38], а також згідно Плану імплементації Директиви Ради 90/270/ЕЕС від 29 травня 1990 року про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями [39], потрібно підбирати монітори з необхідною контрастністю та яскравістю, також необхідно використовувати лише справні монітори, на екрані

яких відсутні відблиски та миготіння і рекомендовано використовувати столи висотою 0,8 м.

5.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

На всіх підприємствах, учбових закладах, лабораторіях та виробничих приміщеннях необхідно дотримуватись виробничої санітарії та гігієни праці згідно державних санітарних норм та правил [40].

Мікрокліматичні умови у робочому приміщенні та їх забезпечення наведені у ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [41], державних санітарних нормах (ДСН) 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [42] та державних будівельних норм (ДБН) В.2.5-67-2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [43].

Нормована температура у лабораторії, де проводяться експерименти для магістерської роботи, в холодну пору року становить 21–23 °С, а у теплий період року 22–24 °С, з відносною вологістю повітря 40–60%, для кабінету з ПК в холодну пору року повинна становити 22–24 °С, а у теплий період року 23–25 °С, з відносною вологістю повітря 40–60%.

Згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [43] та ДСТУ Б А.3.2-12:2009 "Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги" [44] визначимо вимоги для систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Системи повинні у різну пору року створювати відповідний мікроклімат у робочому приміщенні. Система вентиляції повинна забезпечувати повну очистку повітря від зайвих домішок. Вміст пилу у повітрі не повинен перевішувати 30%.

Норми освітлення робочої зони приведені у Державних будівельних нормах України (ДБН В.2.5–28:2018 "Природне і штучне освітлення" [45]). Для лабораторії, у якій проводилися експерименти магістерської роботи, проведемо розрахунок загального рівномірного штучного освітлення згідно з [46].

Вихідні дані для розрахунку: довжина приміщення А=10 м, ширина приміщення В=6 м, висота приміщення Н=4 м, висота робочої поверхні $h_{\text{р}} = 1$ м, розряд зорових робіт (РЗР) IVб, коефіцієнти відбиття поверхонь $\rho_{\text{с}} = 50\%$; $\rho_{\text{ст}} = 30\%$; $\rho_{\text{п}} = 10\%$ (приміщення з незначним пиловиділенням).

5.3.1 Вибір системи освітлення та визначення рівня нормованої освітленості

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт РЗР і визначається за ДБН В.2.5–28:2018 "Природне і штучне освітлення" [45], [46, с.8]. Обираємо систему комбінованого освітлення.

Характеристика зорової роботи – середньої точності, найменший розмір об’єкта розрізнення – більше 0,5 до 1,0 мм, контраст об’єкта з фоном та характеристика фону – середні, нормальний рівень освітленості - $E_{\text{н}} = 200$ лк [46, с.19, дод. А].

5.3.2 Вибір джерела світла та типу світильника

У якості джерела світла обираємо люмінесцентні лампи (ЛЛ) типу ПВЛ (світлорозподіл – розсіяний (крива сили світла – косинусна), ступінь захисту згідно ГОСТ 14254-80 – IP 53, коефіцієнт світильника – L/h 1,5) [46, с.23, дод. В], доля світлового потоку світильника, яка спрямована у нижню півсферу 50% [46, с.26, дод. Г].

5.3.3 Оцінка коефіцієнта запасу та коефіцієнта нерівномірності освітлення

Коефіцієнт запасу приймаємо $k_{\text{З}} = 1{,}6$ [46, с.28, дод. Г, табл. 4].

Коефіцієнт нерівномірності освітлення приймаємо z = 1,1 [46, с.12].

5.3.4 Чисельне значення індексу приміщення

Розрахуємо кількість рядів світильників у приміщенні [46, с.12]:

$$N_p = \frac{B}{(H - h_p) \cdot [L/h]}; \quad (5.1)$$

де B – ширина робочого приміщення, м;

$[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника;

H – висота робочого приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні над підлогою, м.

$$N_p = \frac{6}{(4 - 1) \cdot 1{,}5} = 1{,}5 => 2 \text{ ряди.}$$

Визначимо максимально припустиму відстань між рядами світильників [46, с.13]:

$$L_{max} = \frac{B}{N_p}, \text{м}; \quad (5.2)$$

$$L_{max} = \frac{6}{2} = 3 \text{ м.}$$

Розрахуємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею [46, с.13]:

$$h = \frac{L_{max}}{[L/h]}, \text{м}; \quad (5.3)$$

$$h = \frac{3}{1{,}5} = 2 \text{ м.}$$

Знайдемо висоту звисання світильника від стелі [46, с.13]:

$$h_з = H - h_p - h, \text{м}; \quad (5.4)$$

$$h_з = 4 - 1 - 2 = 1 \text{ м.}$$

Розрахуємо індекс приміщення [46, с.12]:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}; \tag{5.5}$$

де A – довжина робочого приміщення, м;

$$i = \frac{10 \cdot 6}{2 \cdot (10 + 6)} = 1{,}87.$$

5.3.5 Значення коефіцієнта використання світлового потоку

Коефіцієнт світлового потоку приймаємо $\eta = 45\%$ [46, с.30, дод. Г].

5.3.6 Визначення світлового потоку лампи та загальної кількості світильників

Визначення сумарного світлового потоку у приміщенні [46, с.13]:

$$\Phi_\Sigma = \frac{E_H \cdot s \cdot k_з \cdot z}{\eta}, \text{лм;} \tag{5.6}$$

де E_H – нормоване значення освітленості, лк;

S – площа освітлюваної поверхні, м^2;

$k_з$ – коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт нерівномірності освітленості;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

$$\Phi_\Sigma = \frac{200 \cdot 60 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}1}{0{,}45} = 46933 \text{ лм.}$$

Визначимо розрахункову кількість світильників у приміщенні [46, с.14]:

$$N^* = \frac{A \cdot B}{L_{max}^2}, \text{шт;} \quad (5.7)$$

$$N^* = \frac{10 \cdot 6}{9} = 6{,}6 => \text{приймаємо 8 шт.}$$

Загальна кількість ламп у приміщенні [46, с.14]:

$$N_л = N^* \cdot n, \text{шт;} \quad (5.8)$$

де n – кількість ламп у світильнику [47, с.24, дод. В];

$$N_л = 8 \cdot 2 = 16 \text{ шт.}$$

Визначимо розрахунковий потік лампи $Ф_л^*$ [46, с.14]:

$$Ф_л^* = \frac{Ф_Σ}{N_л}, \text{лм;} \quad (5.9)$$

$$Ф_л^* = \frac{46933}{16} = 2933 \text{ лм.}$$

Обираємо тип стандартної лампи ЛХБ холодно-білого світла (6000 – 8000 К), $Ф_л = 2840$ лм, $Р_л = 40$ Вт [46, с.21, дод. Б, табл. 1].

Знаходимо коефіцієнт пропорційності [46, с.14]:

$$m = \frac{Ф_л^*}{Ф_л}; \quad (5.10)$$

де $Ф_л$ – фактичний світловий потік лампи;

$$m = \frac{2933}{2840} = 1{,}03$$

Визначаємо оптимальну кількість світильників у приміщенні [46, с.14]:

$$N = N^* \cdot m, \text{шт;} \quad (5.11)$$

$$N = 8 \cdot 1{,}03 = 8{,}24 => 8 \text{ шт.}$$

5.3.7 Визначення загальної розрахункової освітленості у приміщенні

$$\mathrm{E_р} = \frac{\Phi_л \cdot N_{фл} \cdot \eta}{S \cdot k_з \cdot z}, \text{лк;} \quad (5.12)$$

де $N_{фл} = N_ф \cdot n = 8 \cdot 2 = 16$ ламп – фактична кількість ламп у приміщенні [46, с.15];

$$\mathrm{E_р} = \frac{2840 \cdot 16 \cdot 0{,}45}{60 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}1} = 193 \text{ лк.}$$

При правильному виборі типу і кількості стандартних ламп повинна виконуватися умова [46, с.15]:

$$\mathrm{E_р} = (-10\% \ldots + 20\%) \cdot \mathrm{E_н}, \text{лк;} \quad (5.13)$$

$$193 - 200 = -7(-3{,}5\%) - \text{умова виконується.}$$

5.3.8 Розрахунок загальної потужності освітлювальної установки

$$\mathrm{P_\Sigma} = N_{фл} \cdot \mathrm{P_л}, \text{Вт;} \quad (5.14)$$

де $\mathrm{P_л}$ – потужність вибраної стандартної лампи [46, с.21, дод. Б, табл. 1];

$$\mathrm{P_\Sigma} = 16 \cdot 40 = 640 \text{ Вт.}$$

5.3.9 Ескіз розташування світильників на плані приміщення, враховуючи розміри світильників

За результатами розрахунків будуємо ескіз розташування світильників [46, с.16] (рисунок 5.1).

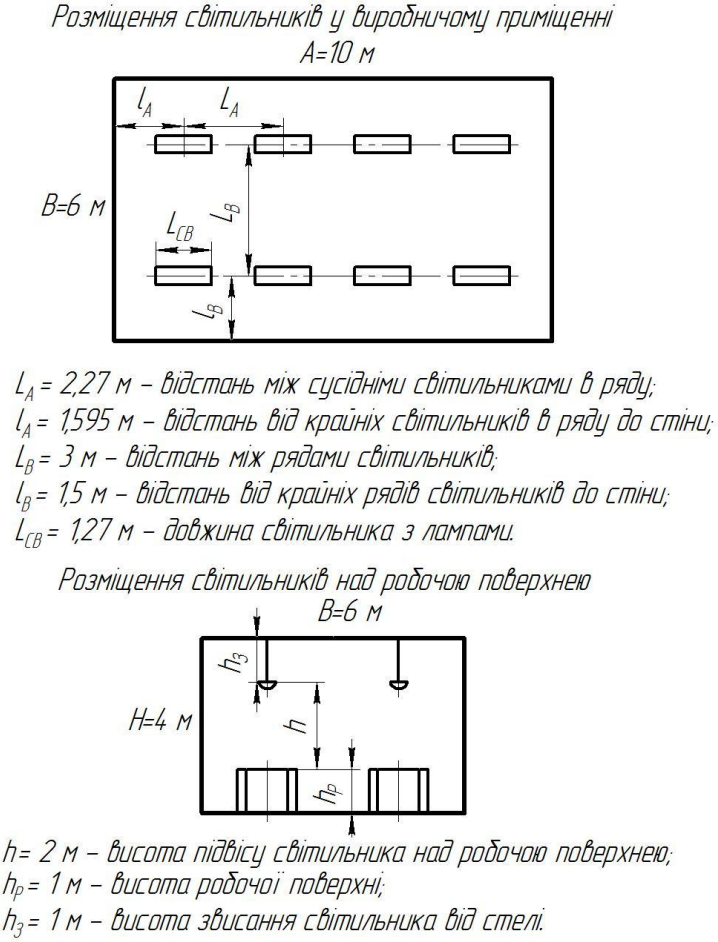


Рисунок 5.1 – Ескіз розташування світильників для лабораторії

Правильно спроектоване освітлення дозволяє поліпшити умови зорової роботи, знижує втому, сприяє підвищенню продуктивності праці, чинить позитивний психологічний вплив на працюючих, підвищує безпеку і знижує травматизм на виробництві. Природне освітлення подається через світлові прорізи. Для захисту від сонячних променів на вікнах встановлені жалюзі або штори. Для кабінету з ПК нормальний рівень освітленості $E_н = 400\ лк$ [45].

Рівень шуму у робочій зоні регламентується за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [47] та ДСТУ ГОСТ 12.2.113:2007 «Преси кривошипні. Вимоги щодо безпеки» [32]. Рівень шуму у лабораторії не повинен перевищувати 80 дБ [47]. Для зниження шуму пресів треба використовувати акустичні захисні кожухи, акустичні панелі, демпфуючі пристрої та виконати антивібраційний монтаж пресу.

При завантаженні порошку титану у прес-форму, його насипають у бункер який вібрує і забезпечує кращу щільність насипу порошку, також установки для ізостатичного пресування створюють певні вібрації при роботі. Оцінку впливу рівня вібрацій проводять за ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину» [48] та ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрацій» [49].

Для зниження рівня вібрацій необхідно застосовувати спеціальні віброізоляції і вібропоглинання та проводити вчасну перевірку обладнання. При роботі, що супроводжуються вібраціями необхідно робити перерви кожні 10 – 15 хвилин, в залежності від рівня вібрацій [48].

Кабінет з ПК має бути спроектований згідно з НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями» [50].

Організація робочого місця працівника з екранними пристроями повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування різним вимогам, а також характеру робіт які виконуються [50].

Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислюваних машин» [38], при восьмигодинному робочому дні необхідно робити перерви на 10 – 15 хвилин після кожної робочої години, а при дванадцятигодинному робочому дні – 15-хвилинні перерви, або слід скоротити робочий день до чотирьох годин при неможливості проведення перерв [38].

ГОСТ 12.1.045-84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» [51] зазначає, що

випромінювання не повинні перевищувати допустимі значення на робочих місцях.

5.4 Заходи з пожежної безпеки

Забезпечення пожежної безпеки є важливим завданням. Заходи по забезпеченню протипожежної системи приведені у державному нормативному акті з пожежної безпеки (НАПБ) А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [52].

Згідно ДСТУ EN 2:2014 «Классификация пожаров (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT)» [53], та ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [54] і за Будівельними нормами і правилами (СНиП) 2.09.02-85 «Производственные здания. С изменениями» [55], лабораторія з установками відноситься до категорії виробництва з пожежної небезпеки «Д» (знижено пожежонебезпечна) та класу можливої пожежі «D» (що супроводжуються горінням металів), а кабінет з ПК до класу пожежної небезпеки «Д» (знижено пожежонебезпечна) і класу можливої пожежі «А» (що супроводжуються горінням твердих матеріалів).

Вогнегасники підбираються згідно ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» [56]. Лабораторію необхідно укомплектувати вогнегасником порошковим, а кабінет з ПК вуглекислотним вогнегасником.

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги» [57], ступінь вогнестійкості для лабораторії І, для кабінету з ПК ІІ.

Згідно ДБН В.2.5-56:2014 «Системы противопожарной защиты» [58] необхідно встановлювати у приміщення систему протипожежної безпеки. Така система повинна попереджувати про розпочату пожежу або велике задимлення, і почати гасіння пожежі до приїзду пожежної служби [58].

5.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

У даному підрозділі розглянемо єдину державну систему цивільного захисту, її складові та режими функціонування. Інформацію взято з Постанови Кабінету Міністрів України «Положення про єдину державну систему цивільного захисту» [59].

Єдина державна система цивільного захисту – сукупність органів управління, сил і засобів центральних та місцевих органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, виконавчих органів рад, підприємств, установ та організацій, які забезпечують реалізацію державної політики у сфері цивільного захисту.

Органи управління цивільного захисту – органи виконавчої влади, Рада міністрів Автономної Республіки Крим, виконавчі органи рад та їх структурні підрозділи, призначені для безпосереднього керівництва діяльністю у сфері цивільного захисту відповідно до компетенції.

Координаційні органи – державна, регіональні, місцеві комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій, комісії з питань надзвичайних ситуацій підприємств, установ, організацій, державна, регіональні, місцеві та об’єктові спеціальні комісії з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Основною метою функціонування єдиної державної системи цивільного захисту є забезпечення реалізації державної політики у сфері цивільного захисту у мирний час та в особливий період.

Керівництво єдиною державною системою цивільного захисту здійснює Кабінет Міністрів України. Безпосереднє керівництво діяльністю єдиної державної системи цивільного захисту здійснює ДСНС.

До складу сил цивільного захисту єдиної державної системи цивільного захисту входять:

- оперативно-рятувальна служба цивільного захисту;
- аварійно-рятувальні служби;
- формування цивільного захисту;

- спеціалізовані служби цивільного захисту;

- пожежно-рятувальні підрозділи (частини);

- добровільні формування цивільного захисту.

Оперативно-рятувальна служба цивільного захисту функціонує в системі ДСНС.

До складу сил цивільного захисту функціональних підсистем входять:

- спеціалізовані професійні аварійно-рятувальні служби;

- об’єктові аварійно-рятувальні служби;

- об’єктові формування цивільного захисту;

- галузеві та об’єктові спеціалізовані служби цивільного захисту;

- державні пожежно-рятувальні підрозділи (частини), що забезпечують відомчу пожежну охорону;

- добровільні формування цивільного захисту.

До складу сил цивільного захисту територіальних підсистем входять:

- підрозділи (частини) Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту;

- регіональні, комунальні, об’єктові аварійно-рятувальні служби та аварійно-рятувальні служби громадських організацій;

- об’єктові та територіальні формування цивільного захисту;

- територіальні та об’єктові спеціалізовані служби цивільного захисту;

- добровільні формування цивільного захисту.

Залежно від масштабу і особливостей надзвичайної ситуації, що прогнозується або виникла, в Україні або в межах конкретної її території встановлюється один із таких режимів функціонування єдиної державної системи цивільного захисту:

- повсякденного функціонування;

- підвищеної готовності;

- надзвичайної ситуації;

- надзвичайного стану.

В умовах нормальної виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, сейсмічної, гідрогеологічної, гідрометеорологічної, техногенної та пожежної

обстановки та за відсутності епідемій, епізоотій, епіфітотій єдина державна система цивільного захисту функціонує в режимі повсякденного функціонування.

Підставами для тимчасового введення в Україні або в межах конкретної її території для єдиної державної системи цивільного захисту режиму підвищеної готовності є:

- на державному рівні – загроза виникнення надзвичайної ситуації державного рівня;

- на регіональному рівні – загроза виникнення надзвичайної ситуації регіонального рівня;

- на місцевому рівні – загроза виникнення надзвичайної ситуації місцевого рівня.

Підставами для тимчасового введення в Україні або в межах конкретної її території для єдиної державної системи цивільного захисту режиму надзвичайної ситуації є:

- на державному рівні – виникнення надзвичайної ситуації, що класифікується як ситуація державного рівня;

- на регіональному рівні – виникнення надзвичайної ситуації, що класифікується як ситуація регіонального рівня;

- на місцевому рівні - виникнення надзвичайної ситуації, що класифікується як ситуація місцевого рівня.

Режим підвищеної готовності та режим надзвичайної ситуації в Україні або в межах конкретної її території вводиться:

- за рішенням Кабінету Міністрів України – на території усієї держави або її окремих регіонів;

- за рішенням Ради міністрів Автономної Республіки Крим, обласних, Київської та Севастопольської міських держадміністрацій – на території відповідного регіону;

- за рішенням райдержадміністрацій та органів місцевого самоврядування - на території відповідного району (міста).

У період дії надзвичайного стану в разі його введення єдина державна система цивільного захисту функціонує відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та з урахуванням особливостей, що визначаються згідно із Законом України “Про правовий режим надзвичайного стану” та іншими нормативно-правовими актами.

Основними завданнями, що виконуються єдиною державною системою цивільного захисту, є:

а) у режимі повсякденного функціонування:

1) забезпечення спостереження, гідрометеорологічного прогнозування та здійснення контролю за станом навколишнього природного середовища та небезпечних процесів;

2) забезпечення здійснення планування заходів цивільного захисту;

3) здійснення цілодобового чергування пожежно-рятувальних підрозділів;

4) розроблення і виконання цільових та науково-технічних програм запобігання виникненню надзвичайних ситуацій і зменшення можливих втрат;

5) здійснення планових заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;

6) забезпечення готовності органів управління та сил цивільного захисту до дій за призначенням;

7) організація підготовки фахівців цивільного захисту;

8) створення і поновлення матеріальних резервів для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, ліквідації їх наслідків;

9) організація та проведення моніторингу надзвичайних ситуацій, визначення ризиків їх виникнення;

10) підтримання у готовності автоматизованих систем централізованого оповіщення про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій;

б) у режимі підвищеної готовності:

1) здійснення оповіщення органів управління та сил цивільного захисту, а також населення про загрозу виникнення надзвичайної ситуації;

2) формування оперативних груп для виявлення причин погіршення обстановки та підготовки пропозицій щодо її нормалізації;

3) посилення спостереження та контролю за гідрометеорологічною обстановкою, ситуацією на потенційно небезпечних об’єктах;

4) уточнення (у разі потреби) планів реагування на надзвичайні ситуації, здійснення заходів щодо запобігання їх виникненню;

5) уточнення та здійснення заходів щодо захисту населення і територій від можливих надзвичайних ситуацій;

6) приведення у готовність наявних сил і засобів цивільного захисту, залучення у разі потреби додаткових сил і засобів;

в) у режимі надзвичайної ситуації:

1) здійснення оповіщення органів управління та сил цивільного захисту, а також населення про виникнення надзвичайної ситуації;

2) призначення керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та утворення у разі потреби спеціальної комісії з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації;

3) визначення зони надзвичайної ситуації;

4) здійснення постійного прогнозування зони можливого поширення надзвичайної ситуації та масштабів можливих наслідків;

5) організація робіт з локалізації і ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, залучення для цього необхідних сил і засобів;

6) організація та здійснення заходів щодо життєзабезпечення постраждалого населення;

7) організація та здійснення (у разі потреби) евакуаційних заходів;

8) організація і здійснення радіаційного, хімічного, біологічного, інженерного та медичного захисту населення і територій від наслідків надзвичайної ситуації;

9) здійснення безперервного контролю за розвитком надзвичайної ситуації та обстановкою на аварійних об’єктах і прилеглих до них територіях;

10) інформування органів управління цивільного захисту та населення про розвиток надзвичайної ситуації та заходи, що здійснюються;

г) у режимі надзвичайного стану - виконання завдань відповідно до Закону України “Про правовий режим надзвичайного стану”.

5.6 Висновки

1. Проведено аналіз потенційних небезпек при роботі в лабораторії з обладнанням та на ПК.
2. Приведено ряд дій для забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці і пожежної безпеки.
3. Розраховано загальне рівномірне штучне освітлення для лабораторії та зроблено ескіз розташування світильників.
4. Розглянуто єдину державну систему цивільного захисту, її складові та режими функціонування.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано літературні джерела щодо використання, особливостей та переваг ізостатичного пресування.

2. Проведено холодне та гаряче ізостатичне пресування для двох партій заготовок.

3. Досліджено властивості матеріалів після ХІП та ГІП.

4. Створено технологію виготовлення експериментальних партій заготовок.

5. Порівняно ізостатичне пресування з іншими методами отримання заготовок і деталей з економічної точки зору та за властивостями матеріалу отриманих виробів.

6. Проведено техніко-економічне обґрунтування вибору виду та методу отримання заготовки.

7. Розраховано в системі Ansys деталь отриману різними методами на міцність.

8. Приведено схеми застосування ізостатичного пресування для виготовлення заготовок для авіа промисловості.

9. Проведено аналіз небезпек, які можуть виникнути при роботі у лабораторії чи на ПК. Було проведено розрахунок загального рівномірного штучного освітлення для лабораторії, та зроблено ескіз розташування світильників на плані приміщення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. В.А.Павлов Разработка технологии и оборудования для получения беспористых заготовок и изделий из порошков и отсевов губчастого титана методом горячего изостатического прессования (ГИП). Отчет / ЗМИ им. В.Я.Чубаря, № гос.рег.78036125, инв. № Б 829306. – Запорожье: 1980. – 107с.

2. Крычков Д. И. Моделирование и совершенствование процессов прессования титановых композитов из порошкообразного сырья. Диссертация / Институт машиноведения уральского отделения российской аккадемии наук – Екатеринбург 2015 – 143 с.

3. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металургии / Металообработка, 2015, с 56 – 60.

4. Жуковский В.Б., Прокопьев И.В., Литвинчук А.Ю. Технология получения биметалических переходников титан – сталь для шар – баллонов методами горячего изостатического прессования и сварки взрывом / Красноярск, 2010, с 303 – 304.

5. Дехтяр А.И., Моисеева И.В., Невдача В.В., Саввакин Д.Г., Структурно – фазовые превращения и механические свойства титановых сплавов, полученых методом порошковой металургии, после горячего изостатического прессования / Киев, 2012 – 13 с.

6. Шелухина А.И. Получение анизотропной поровой структуры хирургических имплантов прессованием губчатого порошка титана пуансоном с эластичной облицовкой из полеуритана / ГНУ «Институт порошковой металургии», Минск, 2015 – с 62 – 66.

7. Утюж А.С., Михайлова М.В., Нефедова И.В. Современные методы изготовления бюгельных протезов на основе титановых сплавов / Москва, 2016 – с 1 – 3.

8. Скиба В.Ю., Иванцивский В.В., Анализ напряженно-деформированного состояния проектируемых конструкций эндопротезов коленного сустава / Новосибирск, 2017 – с 93 – 102.

9. Косяков С.Я., Пахилина Е.В., Федосеев В.И. Отдаленные результаты поршневой стапедопластики с применением тефлоновых и титановых протезов / Москва, 2006 – с 19 – 21.

10. Заболотный Д.И., Сушко Ю.А., Борисенко О.Н. Выбор оссикулярного протеза при втором типе тимпанопластики / Киев, 2015 – с 6 – 11.

11. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Бондарева К. А., Моксон В. С., Дузь В. А. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения / Киев, 2005 – с 44 – 56.

12. Михайлютенко А.В., Басов Ю.Ф., Овчинников А.В. Применение аддитивных технологий для производства деталей газотурбинных двигателей с использованием перспективных порошков титановых сплавов / Запорожье, 2016 – с 37 – 37.

13. Капустян А.Е., Овчинников А.В., Коваленко Т.А., Шевченко А.В. Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники / Запорожье, 2016 – с 107 – 116.

14. Капустян А.Е., Овчинников А.В., Вакуленко И.А. Получение сварных изделий из спеченных титановых сплавов / Запорожье, 2014 – с 84 – 91.

15. Матвийчук М.В., Саввакин Д.Г. Синтез высоколегированных титановых сплавов методом порошковой металлургии / Киев, 2010 – с 81 – 84.

16. Вдовиченко А. В., Мешкова Г. А., Назаренко В. А. Исследование упругости пористого титана акустическим неразрушающим методом / 2008 – с 145 – 150.

17. Макаренко Николай Удивительные свойства сплавов титана / Наука и техника – 2020 - №5 с 44-49.

18. Froes F. H., Eylon D. Powder metallurgy of titanium alloys / 1990 The Institute of Metals and ASM INTERNATIONAL

19. Береснев А.Г., Разумовский И.М. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства / АО «Композит», г. Королев, Московская обл., Россия 2017 с. 44 – 48.

20. Павлов В.А. Разработать и внедрить установку и технологию горячего изостатического проссования заготовок и деталей из порошков и отсевов губчастого титана. Отчет / ЗМИ им. В.Я.Чубаря, № гор. Ред 018226000073, инв №02850004481. – Запорожье, 1984. – 43с.

21. Павлов В.А., Прушинский Б.П., Якунин С.Н. Способ гидростатического прессования / А.С. 1092006, Б.И. №18, 1984.

22. Процессы деформирования ультрадисперсных оксидных порошков при холодном изостатическом прессовании [Электронный ресурс] – URL: https://ceramlab.at.ua/publ/cip_oxide_powders/1-1-0-26

23. Павлов В.А. Разработать и внедрить установку и технологию горячего изостатического прессования заготовок и деталей из порошков и отсевов губчастого титана. Отчет / ЗМИ им. В.Я.Чубаря, № гос. Рег. 018226000073, инв. №02840003146. – Запорожье, 1985. – 82с.

24. Прушинский Б.П., Павлов В.А. Горячая изостатическая обработка полуфабрикатов из цветных металов и сплавов / М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1980. – 52с.

25. Лазерное выращивание металлических деталей — важнейшее направление аддитивных технологий [Электронный ресурс] – URL: https://www.kommersant.ru/doc/3256048

26. Hjärne J., Ahlfors M. Hot Isostatic Pressing for AM parts. Västerås, Sweden, May 2016, Quintus Technologies. P. 1–5.

27. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Технології машинобудування» (розділ – проектування технологічних процесів), для студентів напрямку 6.050502. Спеціальності «Металорізальні верстати та системи» усіх форм навчання, / Укл.: О.В. Алексєєнко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – 86с.

28. Береснев А. Г., Маринин А. Г., Разумовский С. Ф., Бутрим И. М., Тихонов В. Н. Горячее изостатическое прессование монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей с защитными композиционными покрытиями. Конструкции из композиционных материалов. 2014, № 2. С. 20–23.

29. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» за освітньою програмою (спеціалізація) «Технологія машинобудування»; 133 «Галузеве машинобудування» за освітньою програмою (спеціалізація) «Металорізальні верстати та системи; 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» за освітньою програмою (спеціалізація) «Авіаційні двигуни та енергетичні установки», «Технології виробництва авіаційних двигунів та енергетичних установок» / Укл. : В.І. Шмирко – Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 32 с.

30. НПАОП 0.00-4.12-05.Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. [На заміну ДНАОП 0.00-4.12-99, ДНАОП 0.00-8.01-93]. К. : Держнаглядохоронпраці, 2005. 26с. [Електронний ресурс] – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text (Нормативно-правовий акт охорони праці).

31. ДСТУ EN ISO14159-2018 «Безпечність машин. Гігієнічні вимоги до конструкції машин» [Електронний ресурс] – URL: http://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY1/dsty_iso_14159-2005.pdf

32. ДСТУ ГОСТ 12.2.113:2007 «Преси кривошипні. Вимоги щодо безпеки» [Електронний ресурс] – URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841547.pdf

33. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с. [Електронний ресурс] – URL: http://www.energiy.com.ua/PUE.html

34. ДСТУ EN 60204-32:2018 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги» [Електронний ресурс] – URL: http://www.rts.ua/rus/forpro/613/0/31/#bookmark96

35. ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація» [Електронний ресурс] – URL: http://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2011/09/dstu_7239_2011.pdf

36. ДСТУ 8604:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги» [Електронний ресурс] – URL: ttps://nau.edu.ua/site/variables/docs/science/ndi/dizain/ДСТУ-РМ сидячи.doc

37. ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Зі змінами» [Електронний ресурс] – URL: https://dnaop.com/html/2375/doc-%D0%94%D0%A1%D0%9F_173-96

38. ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [Електронний ресурс] – Чинний від 1998-10-10. К. : МОЗ України, 1998. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text

39. План імплементації Директиви Ради 90/270/ЕЕС від 29 травня 1990 року [Електронний ресурс] – URL: https://dsp.gov.ua/978/

40. Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення [Електронний ресурс] – Чинний від 1994-24-02. К. : МОЗ України, 1994. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text

41. ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [Електронний ресурс] - URL: https://files.stroyinf.ru/Data/15/1583.pdf

42. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс]:– Чинний від 1999-12-01. К. : МОЗ України, 1999. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99.

43. ДБН В.2.5-67-2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [Електронний ресурс] - URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/1704-17#Text

44. ДСТУ Б А.3.2-12:2009 "Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги" [Електронний ресурс] – URL: http://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/1535-dstu-b-a-3-2-122009-ssbp-sistemi-ventilacijni-zagalni-vimogi

45. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. [Електронний ресурс] – URL:https://ledeffect.com.ua/images/__branding/dbn2018.pdf

46. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення виробничих приміщень» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі»: для студентів усіх спеціальностей та форм навчання /Укл. : В.І. Шмирко, О.В. Коробко, Ю.І. Троян. – Запоріжжя: каф. ОПіНС. НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 36с., 3 рис., 12 табл.

47. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.037-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999.– URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text

48. ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину» [Електронний ресурс] – URL: https://dnaop.com/html/2280/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_ISO_2631-1_2004

49. ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрацій» [Електронний ресурс] – Чинний від 1999-12-01. К. : МОЗ України, 1999. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99#Text

50. НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями» [Електронний ресурс] – Чинний від 2018-02-14. К. : МОЗ України, 2018. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text

51. ГОСТ 12.1.045-84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» [Електронний ресурс] – URL: http://www.gostrf.com/normadata/1/4294845/4294845260.pdf

52. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] – Чинний від 2014-12-30. К. : МОЗ України, 2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text

53. Правила эксплуатации огнетушителей [Электронный ресурс] – URL: http://xcc.ua/index.php/themeum/19-joomla/196-nova-klasifikatsiya-pozhezh.html

54. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою». На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. [Електронний ресурс] – URL: https://studfile.net/preview/7596676/

55. СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания. С изменениями» [Електронний ресурс] – URL: http://docs.cntd.ru/document/5200092

56. ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» [Електронний ресурс] – URL: https://dnaop.com/html/2503/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_4297_2004

57. ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги». [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. [Електронний ресурс] – URL: http://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/08/DBN-V.1.1-7-2016.pdf

58. ДБН В.2.5-56:2014 «Системы противопожарной защиты» [Електронний ресурс] – URL: https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/08/ZM_DBN_V2556.pdf

59. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту [Електронний ресурс] – Чинний від 2014-01-09. К. : МОЗ України, 2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text