

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій БОГОМОЛ
« ____ » _____ 2021 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Вивчення процесів компактування порошкових матеріалів на
основі відходів стружки ШХ-15»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ФК-71
Шапошнікова Єлизавета Сергіївна

Керівник:

доцент, доктор техн. наук
Мініцький Анатолій Вячеславович

Консультант з назва розділу охорони праці:
професор, доктор техн. наук

Левченко Олег Григорович

Консультант з економічного розділу:
доцент, кандидат економ. наук

Нараєвський Сергій Вікторович

Нормоконтроль:

Доцент, к. т. н., доцент,

Бірюкович Ліна Олегівна

Рецензент:

Доцент каф. МТО, кандидат техн. наук

Бобіна Марина Миколаївна

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студентка _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона
Кафедра Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій БОГОМОЛ

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Шапошніковій Єлизаветі Сергіївні

1. Тема роботи «Вивчення процесів компактування порошкових матеріалів на основі відходів стружки ШХ-15», керівник роботи Мініцький Анатолій Вячеславович, доцент, д. т. н., затверджені наказом по університету від «27» травня 2021 р. № 1358-с
2. Термін подання студентом роботи 14.06.2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: Отримання високощільних виробів на основі відходів стружки ШХ-15 за допомогою методів порошкової металургії задля покращення екологічного стану держави та розвитку рециклінгу. Дослідження виготовлення високощільних зразків методом гарячої вільної ковки з різними способами попередньої обробки: пресування, допресування, вільна осадка. Розробка технологічних схем, що дозволяють отримати вироби з високими механічними властивостями.
4. Зміст роботи: Літературний огляд: 1) обґрунтування вибору матеріалу; 2) аналіз літературних даних, які освічують методи компактування порошкової металургії; 3) вибір та обґрунтування методів виготовлення виробів на основі стружки ШХ-15. Експериментальна частина: 1) вибір об'єкту дослідження та

методика експерименту; 2) виготовлення заготовок методом гарячого торцевого кування з різними способами попередньої обробки; 3) моделювання процесу деформації в середовищі DEFORM 2D/3D; 4) дослідження мікроструктури; 5) визначення твердості та міцності на стиск.
Обговорення результатів: 1) порівняння отриманих результатів механічних властивостей зразків та напружено-деформованого стану моделі в залежності від методів попередньої обробки; 2) створення технологічних схем виробництва.
Економічний розділ: 1) організаційні розрахунки; 3) економічні розрахунки; 3) визначення економічної доцільності та ефективності проведеної дослідницької роботи.
Розділ охорони праці: 1) аналіз науково-дослідної лабораторії з точки зору мікроклімату та наявності шкідливих або небезпечних факторів; 2) дослідження відповідності нормам рівня шуму та вібрації, освітленості приміщення, виробничого випромінювання; розробка шляхів вирішення проблем; 3) визначення умов електро-, та пожежної безпеки.
Написання висновків за результатами досліджень.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) : тема роботи (слайд); мета, об'єкт дослідження (слайд); актуальність теми (слайд); досліджувані технологічні схеми (слайд); визначення геометричних параметрів (слайд); моделювання процесу допресовки (слайд); моделювання процесу осадки (слайд); моделювання процесу гарячої ковки (слайд); напружено-деформований стан моделі (слайд); твердість зразків (слайд); механічні характеристики зразків (слайд); структура зразків (слайд); мікроструктура (слайд); висновки (слайд).

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ охорони праці	професор, д. т. н. Левченко О. Г.	24.05.2021	
Економічний розділ	доцент, к. е. н. Нараєвський С. В.	04.05.2021	

7. Дата видачі завдання 10.02.2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану за темою роботи. Написання літературного огляду.	09.04.2021	
2	Вибір та обґрунтування методів виготовлення зразків на основі стружки ШХ-15.	15.04.2021	
3	Обирання послідовності та способів попередньої обробки зразків перед куванням.	20.04.2021	
4	Виготовлення зразків.	02.05.2021	
5	Моделювання процесу компактування за різними технологічними схемами.	08.05.2021	
6	Вимірювання твердості зразків	13.05.2021	
7	Визначення міцності на стиск	13.05.2021	
8	Дослідження мікроструктури	14.05.2021	
9	Обробка експериментальних даних	16.05.2021	
10	Аналіз та узагальнення отриманих результатів	16.05.2021	
11	Написання розділу охорони праці та економічного розділу	08.10.2021	
12	Оформлення дипломної роботи	10.06.2021	

Студент

Єлизавета ШАПОШНІКОВА

Керівник

Анатолій МІНЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 90 с., 30 рис., 8 табл., 62 джерела.

ВИСОКОЩІЛЬНІ ВИРОБИ, ВІЛЬНА ОСАДКА, ГАРЯЧЕ ВІЛЬНЕ КУВАННЯ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІКРОСТРУКТУРА, МОДЕЛЮВАННЯ, ШЛАМОВІ ВІДХОДИ, ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ЕКОНОМІЧНОГО СТАНУ, СТРУЖКА ШХ–15.

Об'єкт дослідження суміш на основі відходної стружки ШХ–15, просіяної крізь вібраційне сито з розміром комірки 3 мм, порошку заліза марки ПЖРВ з фракцією -016+0063 та графітового порошку ГС-4.

Мета роботи: Дослідження впливу методів компактування пресовок на основі стружки ШХ–15 на щільність та фізико-механічні властивості високощільних матеріалів.

Методи дослідження та обладнання: фракціювання шламової стружки ШХ–15 проводили за допомогою вібраційного сита, змішування суміші відбувалося в змішувачі. Відпал стружки проведений в камерній електричній печі СНОЛ–11 в середовищі водню. Зразки циліндричного типу пресувалися та допресовувалися на гідравлічному пресі ГП–50. Вільна осадка реалізована на гідравлічному лабораторному пресі ЗИМ 10Т. Вільне торцеве кування зразків проводилося за допомогою пневматичного молота МА 4129. Пористість визначена гідростатичним методом та за результатами металографічного аналізу. Розподіл щільності по об'єму пресовки, напружено-деформований стан, швидкість деформацій та схильність до руйнування визначена в середовищі DEFORM 2D/3D. Дослідження мікроструктури проводилося на скануючому електронному мікроскопі РЕМ–106. Значення твердості отримані на основі результатів виміру за шкалою HRB, HRC на твердометрі ТК–2. Для випробування міцності на стиск використовувалося повірене універсальне обладнання «CERAMTEST».

ABSTRACT

The work contains: 90 p., 30 fig., 8 tab., 62 sources.

HIGH-DENSITY PRODUCTS, LOOSE SLUDGE, HOT FREE FORGING, MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE, MODELING, SLUDGE WASTE, ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC IMPROVEMENT, ИХХ–15 CHIPS.

The object of the study is a mixture based on waste shavings ИХХ–15 sifted through a vibrating sieve with a mesh size of 3 mm, iron powder of ПРЖБ brand with a fraction of -016+0063 and graphite powder ГС–4.

The aim of the work is to investigate the influence of methods of compacting presses based on shaving chips ИХХ–15 on the density and physical and chemical properties of high-density materials.

Methods of research and equipment: the sifting of the slurry chips ИХХ–15 was carried out with a vibrating sieve, mixing of the mixture was carried out in a mixer. Chips were annealed in a chamber electric furnace ЧОЖ–11 in hydrogen environment. Cylindrical type specimens were pressed and prepressed on a hydraulic press ГИ–50. Free forging was implemented on a hydraulic laboratory press ЗИМ 10Т. Free face forging was carried out with a pneumatic hammer МА 4129. Porosity was determined by hydrostatic method and by the results of metallographic analysis. Density distribution over the volume of the press, stress-strain state and propensity to destruction were determined in DEFORM 2D/3D software. Microstructure studies were carried out on a scanning electron microscope PEM–106. Values of hardness were obtained on the basis of measurements on HRB, HRC scale on hardness meter ТК–2. For the test of compressive strength we used verified universal equipment "CERAMTEST".

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1 Метод утилізації шламових відходів.....	14
1.2 Методи отримання заготовок високої щільності.....	18
1.2.1 Гаряче статичне та динамічне пресування.....	18
1.2.2 Рідкофазне спікання.....	22
1.2.3 Прокатка.....	23
1.2.4 Гаряче кування.....	25
1.2.5 Осадка.....	28
1.3 Вибір технологічної схеми.....	32
1.4 Висновки та постановка задач дослідження.....	32
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
1.1 Вибір об'єкту дослідження та методика експерименту.....	34
1.2 Статичне пресування заготовок.....	34
1.3 Вимірювання початкових розмірів зразків.....	35
2.4 Вільна осадка заготовок.....	36
2.5 Вільне кування заготовок.....	39
2.6 Моделювання процесу деформації порошкових систем в умовах вільного торцевого кування.....	41
2.7 Дослідження мікроструктури.....	47
2.8 Визначення твердості зразків.....	49
2.9 Визначення міцності на стиск.....	50
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	51
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	59
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників при виконанні роботи.....	60
4.1.1 Визначення шкідливості впливу суміші, яка піддається пресуванню.....	60
4.2 Загальний перелік чинників, які необхідно дослідити.....	61
4.2.1 Мікроклімат.....	64
4.2.2 Параметри освітлення.....	66
4.2.3 Рівень шуму та вібрації.....	66
4.2.4 Електробезпека.....	67
4.2.5 Пожежна безпека.....	68
4.2.6 Аналіз виробничого випромінювання.....	69
4.2.7 Висновки до розділу.....	70
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	71
5.1 Науково-технічна актуальність НДР.....	71
5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР.....	72
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	72
5.2.2 Єдиний соціальний внесок.....	74
5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення дослідження.....	74
5.2.4 Енергоносії для проведення досліджень.....	75

5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання.....	75
5.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій.....	76
5.2.7 Витрати на службові відрядження.....	76
5.2.8 Інші прямі невраховані витрати.....	76
5.2.9 Накладні витрати.....	76
5.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	77
5.3 Науково-технічна ефективність НДР.....	78
ВИСНОВКИ.....	82
CONCLUSION.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	84

ВСТУП

В сучасному світі з його прогресивними технологіями та масштабними виробництвами часто підіймається питання захисту навколишнього середовища від промислових відходів. Тому для кожної країни на порядку денному активно розглядаються варіанти переробки відходів або їх зменшення під час самого виробництва. Не менш важливим фактором є збереження або, навіть, підвищення якості перероблюваного матеріалу. На користь цьому також відіграє можливість більшого споживання без видобутку додаткових ресурсів.

Особливо гостро питання засмічування металічними відходами стоїть в Україні. Сьогодні існує безліч шламовалищ, які забруднюють ґрунт, підземні води та повітря. Натомість, продовжується експорт відходів, а також видобуток або імпорт нових корисних копалин, що потребує великих енергетичних та матеріальних витрат. За опосередкованими даними, після виплавки 1 тони сталі, утворюється близька 700 кг шлаків та шламів, які потім лише частково знаходять своє призначення в будівельному виробництві. Метало-оброблювальні заводи, незважаючи на використання сучасного обладнання, за 1 годину роботи на станку отримують близька 100 кг сталеві відходної стружки. Всі ці відходи відправляються на сміттєзвалища, незважаючи на те, що вони є цінним ресурсом для вторинного виробництва.

Одним із найбільш вживаних матеріалів в сучасній промисловості є інструментальні сталі. З них виготовляють деталі прес-форм, ріжучі інструменти, підшипники тощо. Таке розповсюдження, перш за все, пов'язане із поєднанням сплавів у собі досить високих механічних властивостей та низької вартості.

Однією із найпоширеніших марок сталі, що використовується на виробництві є ШХ15. Вона відрізняється високою стійкістю до втоми, стабільністю розмірів, має високі показники міцності та є корозійно стійкою.

Спочатку використовувалася для виготовлення роликів та кульових підшипників, звідки і отримала свою назву - шарикопадшипникова сталь. Закордоном з неї часто виготовляли ножі. Наразі ж ця марка знайшла своє пристосування і в інших галузях сучасного виробництва: корпуси розпилювачів, різноманітні втулки та плунжери, плашки, автомобільні та авіаційні деталі тощо. Однією із важливих переваг цієї сталі у виробництві є технологічність відходів, яка пов'язана з однорідністю стружки за складом та властивостями.

Наразі відомі технології отримання високоцільних виробів з металічних відходів за допомогою методів порошкової металургії, а саме: гаряча ковка, осадка, гіпоізостатичне та динамічне пресування тощо. Вони є дуже перспективними. Завдяки розширенню та налагодженню рециклінгу металовідходів в Україні можна одночасно підвищити цінність порошкової металургії та матеріалознавства, збільшити попит на спеціалістів в цій сфері, а також налагодити економічний та екологічний стан держави.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Більшу частину металургійних відходів України складають шлаки при виплавці та механічній обробці чавуну та сталей (в середньому 25 %). Об'єм сталевих шламовозвалищ складає понад 200 млн. т. При цьому більшість таких відходів реалізується лише в якості будівничих матеріалів або добрив в цементній промисловості. В останні роки була виявлена ефективність та перспективність переробки шламових сталевих відходів, тому в цій дипломній роботі будуть розглянуті найперспективніші методи отримання якісних або, навіть, високоякісних виробів зі сталевих шламу. В якості досліджуваного матеріалу була обрана сталь ШХ–15. Такий вибір пояснюється її поширеністю, технологічністю самих відходів та можливістю отримання з них достатньо міцних та корозійностійких виробів. Вибір оптимального методу обробки металургійних відходів може значно спростити та пришвидшити розвиток рециклінгу в Україні, зменшити кількість існуючих шламовозвалищ, покращити екологію а також відкрити нові можливості в сфері матеріалознавства [1].

ШХ15 – конструкційна підшипникова сталь, яка відноситься до заевтектоїдних хромистих сталей, як і ШХ6, ШХ9 тощо. Після оптимальної термічної обробки набуває високих значень межі міцності, стійкості до зносу та корозії. Її хімічний склад представлений в таблиці 1.1, а механічні властивості в таблиці 1.2 [2].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад ШХ15 [2]

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	S, %	P, %
0,95-1,05	0,17-0,37	0,20-0,40	1,3-1,65	не більше 0,02	Не більше 0,027

Таблиця 1.2 – Механічні властивості ШХ15 [2]

Режим термообробки	Переріз	Границя плинності $\sigma_{0,2}$	Границя міцності σ_B	Відносне видовження δ	Відносне звуження ψ	Ударна в'язкість КСУ	Твердість НВ
	мм	МПа		%		Дж/см ²	
		не менше					
Відпал; 800 °С, піч до 730 °С, потім охолодження повітрям до 650 °С зі швидкістю 10-20 °С/год.	—	370–410	590–730	15–25	35–55	44	(179–207)
Гартування: 810 °С, у воді до 200 °С, потім в маслі. Відпуск: 150 °С на повітрі.	30–60	1670	2160	—	—	5	62–65

Після проходження різних технологічних процесів у виробництвах, зі сталі ШХ15, яку обробляють на шліфувальних станках, залишається досить велика кількість шламу. Далі він надходить в колодязі відстоювання, фільтрується, збирається та відправляється в місце його подальшого зберігання – в ділянки відстоювання або шламозвалища. Там металеві відходи зберігаються впродовж довгого часу, доки їх не експортують закордон або не переплавлять, що в обох випадках є економічно недоцільним. Адже цей шлам можна рециркулювати за допомогою технологій порошкової металургії. Найбільшою проблемою для стружки ШХ15 є швидке окислення на повітрі, тому найдоцільнішим було б одразу після зневоднення та фільтрації поставляти її в пункти переробки [3].

Шліфувальний шлам, представлений на рисунку 1.1 має вигляд комкотвірних окислів заліза чорного кольору з приблизним вмістом заліза 60–85 % та 25 % діоксиду кремнію. Його насипна щільність коливається в проміжку 0,32–0,40 г/см³, а пікнометрична щільність становить 5,29 г/см³ [3].

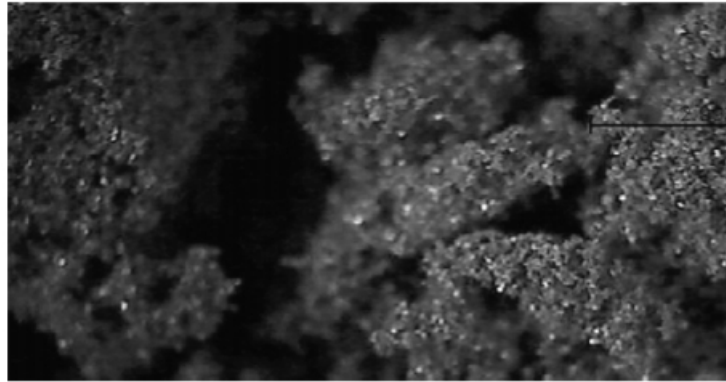


Рисунок 1.1 – Шліфувальний шлам ШХ15 [3]

Один із способів підготовки вже очищеного від МОТС, методом термічної десорбції, шламу до подальшої його обробки складається з трьох основних етапів:

1. Просіювання крізь сита з різними дифракційними розмірами комірок.
2. Додавання до шламу 15 % мас. частки води та 1 % мас. частки графіту (у вигляді порошку). Та подальше перемішування суміші протягом 2 годин в гравітаційному циліндричному змішувачі, який через особливості конструкції більш відомий за назвою «П'яна бочка».
3. Пресування заготовок [4].

Отримані таким чином порошки мають задовільні властивості для подальшого їх використання на виробництві. Найбільш прийнятним є застосування брикетування з наступною термічною обробкою. Такий метод є більш технологічним та рентабельним завдяки тому, що він менше за інші методи залежить від початкового вмісту вологи в матеріалі та його гранулометричного складу. Таким чином, втрачається необхідність ретельного просушування вихідного матеріалу, що значно спрощує технологічний процес підготовки [5].

З отриманого порошку також можна виготовляти деталі стандартними методами порошкової металургії, які будуть розглянуті нижче. Такими як: гіпоізостатичне та динамічне гаряче пресування, осадка, гаряча ковка тощо [6].

1.1 Метод утилізації шламових відходів

Традиційними методами отримання згрудкованої сировини для подальшої металургійної переробки є агломерація та виробництво окатишів. Але такі методи не підходять для переробки промислових відходів, вони є недостатньо ефективними за рядом причин:

При агломерації промислових відходів:

- знижується газопроникність шихти;
- зменшується продуктивність;
- скорочується кількість якісного агломерату на виході.

При виробництві окатишів з промислових відходів:

- не дотримуються вимоги до вологості матеріалу;
- для багатьох видів промислових відходів високотемпературні режими обробки є нераціональними, тому що при них відбуваються фазові переходи і комплекс вихідних властивостей матеріалу змінюється;
- вигоряння вуглецю.

Через неможливість використання цих методів в сучасному виробництві, було винайдено новий спосіб згрудкування шламів – брикетування [7].

Брикетування – це фізико-хімічний процес механічного або термомеханічного грудкування дрібних корисних копалин, шламів, скрапу тощо, для їх утилізації або комфортного транспортування. На сьогоднішній день цей метод є найпоширенішим в сфері рециклінгу сталевих шламу [8]. Його проводять для того, щоб зменшити об'єм відходів та поліпшити контакт між компонентами шихти/шламу/стружки тощо [9].

Взагалі, брикетування застосовується для виготовлення брикетів з руд чорних та кольорових металів, вугілля, торфу, металічної стружки та багатьох інших відходів виробництва. За технологією його поділяють на:

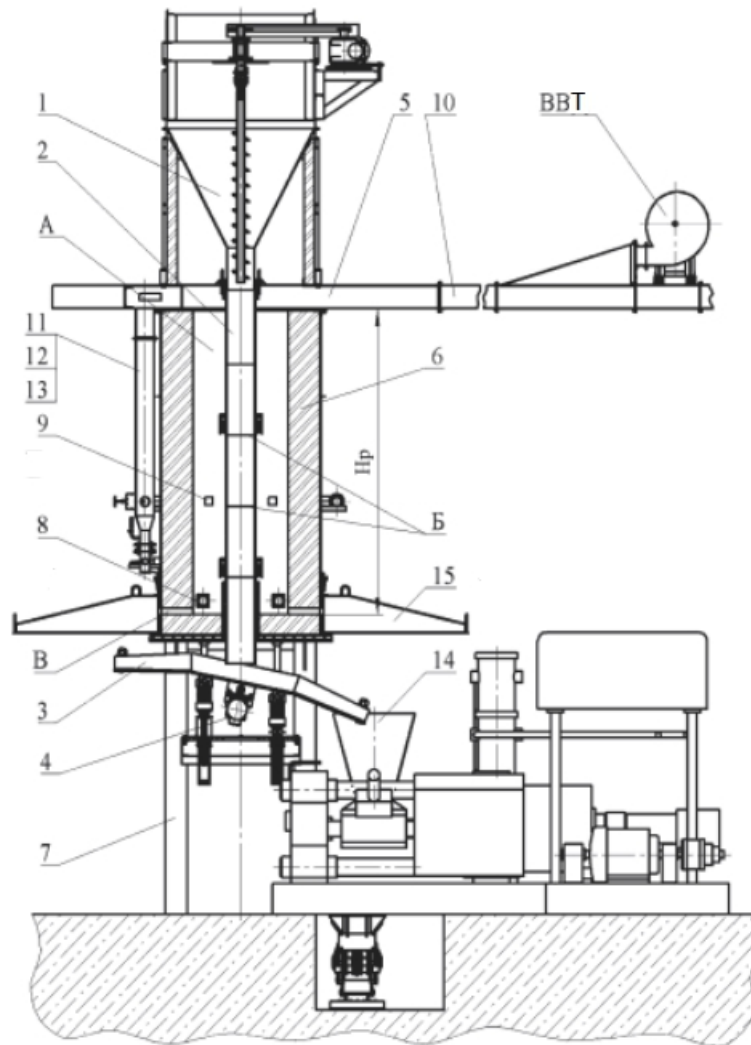
- холодне (без або зі зв'язуючим);
- гаряче (до 1050 °С) [4].

Для кожного виду шламових відходів треба визначити найбільш раціональний ряд технологічних операцій, спираючись на його склад, розмір, форму, вміст вологи та забрудненість МОТС (мастильно-охолоджуючими технологічними середовищами). Загальний набір устаткування для холодного пресування включає дробилку, сепаратор та брикетуючий прес. Для гарячого брикетування необхідно додатково використовувати піч для відпалу шламу [10].

Установка з неперервним муфельним нагрівом (рис. 1.2) часто застосовується для гарячого брикетування закордоном. Нагрівання стружки починається ще в муфелі, її температура після виходу з печі не повинна бути вище 650–700 °С. Тобто процес нагрівання складається з двох стадій:

- дегазація матеріалу;
- нагрів сухого матеріалу.

В процесі нагрівання з поверхні стружки видаляється рідка фаза, термічно розкладаються всі МОТС. Після вивантаження нагрітої стружки для пресування існує перерва в 1–1,5 хв, за яку стружка остигає на 50–100°С. При односторонньому пресуванні в замкнутій прес-формі рекристалізація та/або фазові переходи відсутні. Після досягнення в системі пресу заданого тиску, готовий брикет виштовхується та скочується по лотку на транспортер. Отримані брикети мають дрібнозернисту структуру, високі значення міцності та щільності [11].



1 – бункер; 2 – муфель; 3 – вібралоток; 4 – електромеханічний вібратор;
 5 – пустотілі балки-повітроводи; 6 – піч шахтного типу; 7 – стальна опора;
 8 – пальник; 9 – фурми; 10 – повітряний рекуператор; 11 – колекторна труба;
 12,13 – колектори; 14 – бункер преса; 15 – витяжні зонти; ВВТ – вентилятор
 високого тиску; Б, В – щілинні отвори

Рисунок 1.2 – Установа для гарячого брикетування з неперервним муфельним нагрівом [11]

Такий спосіб для переробки скрапу, сталюї та чавунної стружки набув широкого застосування в країнах Європи та Америки. Він називається «Ферро-карб». Степінь відновлення таких брикетів складає 88,6 % та забезпечує утилізацію більшої частини залізо- та вуглецевмісних відходів.

Брикети, отримані гарячим брикетуванням, стійкі до збереження на відкритому повітрі, є корозійностійкими, добре відновлюються [12].

В Україні ж широкого застосування набула сучасна технологія, описана в [13]. Такий спосіб дозволяє отримати пресовки з щільністю $5,7\text{—}6,5\text{ г/см}^3$ з задовільною до ГОСТ 2787-2019 [14] міцністю і здійснюється за такими етапами:

1. Стружка подрібнюється на фракції 20–30 мм.
2. Волога стружка завантажується в центрифугу і зневоджується до вмісту МОТС 4,5 % за частоти обертання 470 об/хв.
3. Очищена стружка нагрівається в вертикальній сталевій муфельній печі.
4. В нагріту стружку додається 6 % водно-цементної 35 %-ї пасти та 15 % холодного шламу, все це перемішується.
5. Суміш пресується на гідравлічному пресі під тиском 360 МПа за температури 600 °С [13].

Більш економічно вигідним є метод холодного брикетування. Для порівняння, брикети, отримані таким методом коштують в 2–3 рази дешевше, ніж брикети, отримані гарячим способом. Незважаючи на те, що отримані вироби не мають необхідних високих показників механічних властивостей, їх можна використовувати в якості сировини для методів, що забезпечують отримання високощільних матеріалів.

Холодне брикетування заготовок для високо-ущільнювальних методів, зазвичай, проводиться в закритих матрицях без використання зв'язуючої речовини. Для отримання брикета прикладають тиск більший за 2500 кг·с/см^2 , отримуючи при цьому показник щільності всього лиш $5\text{—}5,5\text{ кг/см}^3$. Такі брикети (рис. 1.3) дуже легко руйнуються, а проникаючі всередину гази швидко окислюють матеріал. Проте, такі заготовки легше транспортувати та простіше зберігати, ніж сам шлам [15].



Рисунок 1.3 – Брикети холодного пресування [15]

Метод холодного брикетування є універсальним і дозволяє використовувати в якості вихідного матеріалу металічну стружку, пил газоочищувального устаткування, прокатну окалину тощо. Вміст заліза в такому брикеті може сягати 90 % від усієї маси. Для забезпечення механічної міцності інколи використовують зв'язуючу речовину, в ролі якої може виступати рідке скло та комплексне зв'язуюче скло на силікатній основі, наприклад, $\text{SiO}_2 - \text{V}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$. Таке зв'язуюче додає брикету міцності при спіканні. Такий спосіб холодного брикетування назвали ОУБ [16].

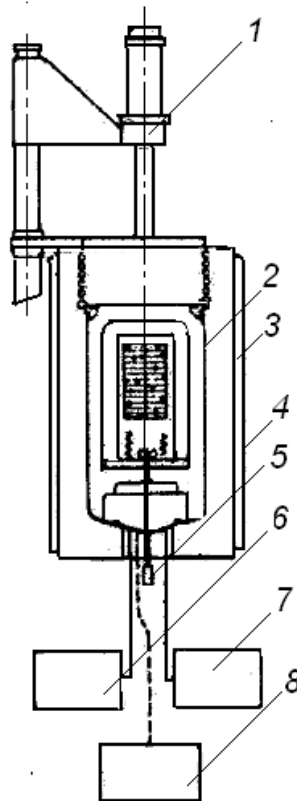
Перевагами методу ОУБ є те, що ця технологія може бути реалізована для виробництва будь-якого масштабу для будь-яких залізо- та вуглецевомістких відходів та дозволяє забезпечити максимальний ступінь відновлення залізної складової брикету в умовах технологічного нагріву [17].

1.2 Методи отримання заготовок високої щільності

1.2.1 Гаряче статичне та динамічне пресування

Гаряче пресування поєднує в собі два процеси: пресування та спікання матеріалу. При цьому, подолання сил механічної міцності сировини відбувається не тільки за допомогою сили поверхневого натягу, але й при участі зовнішнього тиску, що сприяє затіканню частинок в пори [18]. Велику роль тут відіграють в'язка та пластична течії, досліджені в роботах Маккензі та Шаттлворса [19].

Механізм процесу підпорядковується певним закономірностям: впливу тиску, часу та температури на процес формування пресовки. Найнижче значення тиску, вибраного для пресування повинно забезпечувати повне ущільнення матеріалу при температурі, максимально близькій до його температури плавлення. Область вибору тисків досить велика і багато в чому залежить від природи матеріалу. Для залізних сплавів температурні границі пластичності дуже широкі, тому для пресування можна використовувати відносно низькі температури. При цьому час, за який буде отриманий практично безпористий виріб, повинен бути мінімальним [18]. Схематичне зображення установки для гарячого ізостатичного пресування наведено на рисунку 1.4.



1 – підйомник затвору; 2 – піч; 3 – система конвекції (індукційна);
 4 – кожух для охолодження; 5 – система конвекції (примусова); 6 – система
 для підведення газу; 7 – вакуумувальна система; 8 – електропостачальна
 система

Рисунок 1.4 – Схематичне зображення установки для ГПІ [6]

Гаряче ізостатичне пресування використовують для отримання заготовок з формою, що потребує мінімальної кінцевої обробки, тобто буде максимально близькою до її кінцевого вигляду [6].

Деталі, які отримують методом ГПП, за рахунок щільної та однорідної структури набувають високих значень міцності на рівні з високими показниками пластичності. За своїми властивостями такі вироби схожі на деформовані матеріали. До того ж, таким способом можна проводити відновлення мікроструктури деталей, які працюють в умовах підвищених температур. Наприклад, газотурбінних лопаток. Газоізостатичне пресування змикає стінки пустот та тріщин, повертаючи деталь, до її початкового стану із вихідними властивостями [20].

Переваги ізостатичного пресування:

- отримання заготовок із більшою щільністю та міцністю;
- виключення фактору нерівномірного розподілу щільності по пресовці, методом підбору оптимальної температури та тиску;
- мінімізація внутрішніх напружень завдяки відсутності певного напрямку сил тиску та тертя;
- зменшення ризику розтріскування та розшаровування виробів [21];
- пришвидшення процесу (в порівнянні зі статичним холодним пресуванням та подальшим спіканням) [6].

Недоліки:

- високі ціни на установки ГПП та складність у їх керуванні (виникає необхідність наявності висококваліфікованого робочого персоналу);
- довготривалість виробничого циклу;
- застосування дорогих інертних газів;
- обмеження в конфігурації виготовлюваних деталей;
- необхідність механічної обробки (точіння, шліфівка, фрезерування тощо) [22].

Гаряче динамічне пресування можна назвати різновидом ГПП, незважаючи на лише зовнішню збіжність процесів. При статичному гарячому

пресуванні основний механізм – звичайне спікання, активоване прикладеним ззовні зусиллям. Натомість, при ДГП переважають ті ж процеси, які можна спостерігати при зварюванні під тиском. Тобто, основні відмінності між цими двома методами полягають в застосуванні різного за характером, тривалістю та величиною навантаження [23].

В масовому виробництві цей спосіб пресування застосовують лише для виготовлення деталей простої конфігурації [24].

ДГП найчастіше використовується для допресовки пористих заготовок, але можливе спікання і вільно насипного порошку, якщо необхідно отримати достатньо тонку пресовку або фільтр. При цьому пресуванням та спіканням рухають дві основні складові:

- швидка (лімітована) пластична деформація;
- повільна (нелімітована) дифузійна деформація [25].

Зазвичай, через роботу Лапласівських сил, деформація відтворюється за другим механізмом – дифузійною повзучістю. Але у випадку з динамічним пресуванням рівень напружень перевищує границю текучості, тому в ДГП деформація відбувається за лімітованим механізмом [26].

Тривалість ДГП складає 0,01–0,001 с., тобто є швидшою від ГП на 5–7 порядків. Це дозволяє уникнути нагрівання прес-форми та зменшити охолодження заготовки до закінчення циклу. Завдяки досить сильному збільшенню тисків в порівнянні з ізостатичним пресуванням забезпечується однакова ступінь усадки [27]. Особливий характер деформації, що є відмінним від інших методів за рахунок відсутності першого етапу ущільнення (взаємне переміщення частинок), ущільнює заготовку та скорочує її об'єм, піддаючи тиску кожен часточку пресовки [28].

Таким чином, при формуванні матеріалу способом динамічного гарячого пресування процеси утворення контакту між частинками та між поверхнями атомів відбуваються майже одночасно [26].

Переваги методу ДГП:

- висока продуктивність;

- можливість пресування заготовок з різноманітною пористістю по об'єму;
- високі показники щільності та міцності вироблених деталей;
- відсутність необхідності подальшої обробки;
- висока чистота поверхні [29].

Недоліками методу є дорогі ціни на обладнання, інертні гази та складність управління технологічним процесом. Внаслідок недотримання основних параметрів в допустимих проміжках, можуть утворюватися розтягуючі напруження, які призводять до виникнення тріщин [30].

До динамічних способів пресування також можна віднести вибухове, ударне, магнітно-імпульсне, гідродинамічне пресування, а також ізотермічну штамповку та вібраційне формування. Всі ці методи були створені для покращення механічних властивостей пресовок зі складноформованих матеріалів та потребують додаткових технологічних операцій для підготовки сировини [31].

1.2.2 Рідкофазне спікання

В багатокомпонентних системах, в тому числі на основі заліза, часто буває так, що один з компонентів, який не є основним, відносно інших має низьку температуру спікання. В такому випадку відбувається спікання в рідкій фазі – створення нової фази, температура плавлення якої менша за температуру спікання. Такий метод часто використовується в порошковій металургії. Завдяки участі дифузійних процесів, в результаті такого спікання отримують вироби з досить високими показниками щільності [32]. Кінетику цих процесів детально дослідив У. Д. Кінгері [33].

Результатом є перекристалізація крізь рідку фазу, при якій частинки намагаються прийняти найбільш енерговигідну форму, тобто набувають подібності до сфери. Весь процес характеризується певними

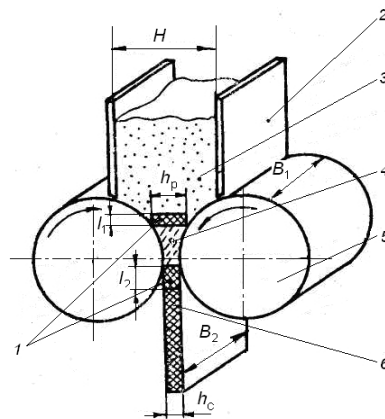
основоположними факторами, які визначають швидкість проходження процесу:

- величина часток твердої фази (обернено пропорційна швидкості);
- в'язкість рідкої фази (обернено пропорційна);
- сила поверхневого натягу (прямо пропорційна) [26].

Рідкофазне спікання ідеально підходить для виготовлення заготовок з порошку швидкорізальних сталей. Але для ШХ15, згідно з [34] такий спосіб підходить лише для виготовлення кускового легованого скрапу, щоб утилізувати ту частину шламових відходів, на яку недоцільно використовувати інші методи порошкової металургії.

1.2.3 Прокатка

Прокатка – це метод, що заснований на процесах пластичної деформації [35], який схематично зображений на рисунку 1.5.



- 1 – елементарний об'єм ущільнюваного порошку; 2 – бункер (дозатор);
 3 – вільно насипаний порошок; 4 – зона деформації; 5 – валки;
 6 – заготовка, отримана прокаткою

Рисунок 1.5 – Схематичне зображення процесу прокатки [6]

Реалізується за допомогою безперервного пресування порошку між двома валками, що обертаються назустріч один одному та ущільнюють порошок або заготовку за рахунок сил тертя. Для проходження процесу необхідно обрати оптимальні значення цих сил [6].

Одна з особливостей даного методу полягає в тому, що пресуємий порошок зменшується в об'ємному показнику, але маса залишається сталою. Процес умовно ділиться на два етапи:

а) несталий процес ущільнення (до повороту валків на $120\text{--}180^\circ$): відбувається пружна деформація, постійно збільшується щільність та довжина прокату;

б) сталий процес ущільнення:

1) гравітаційне та валкове транспортування порошку; важливим критерієм є текучість матеріалу, яка визначає величину об'ємних витрат матеріалу, швидкість обертання валків та її узгодженість із швидкістю витікання порошку;

2) структурна деформація; на даному під-етапі основними критеріями, що впливають на процес є гранулометричний склад, форма, розмір, стан поверхні порошку тощо;

3) пружна і пластична деформація — остаточне формування; утворюються тісні контакти між частинками, різко збільшується щільність прокатного матеріалу [6].

Прокатка може бути холодною або гарячою. Перший метод використовують для отримання тонких виробів (листів, труб) з поверхнею високої якості. Другий спосіб більш розповсюджений і часто застосовується для підвищення механічних властивостей виробу, адже тоді метал проявляє вищу пластичність та менше опирається деформації. Іноді реалізують проміжний метод обробки – теплу прокатку [36].

Гаряча прокатка відбувається в результаті послідовного виконання наступних операцій: підготовка металу, нагрів металу, гаряча деформація. Проблемою прокатки підшипникових сталей є необхідність використання гомогенізуючого нагріву та відповідного устаткування, що забезпечує контроль над температурними режимами прокатки та охолодження. За дослідженнями [37], [38] було зроблено висновок, що для забезпечення вимог до карбідної неоднорідності необхідно провести розчинення карбідних

часток до початку самого процесу прокатки, а потім запобігти їх повторному утворенню. Тому рекомендована температура кінця процесу не повинна перевищувати 1000 °С з подальшим швидким охолодженням до 700 °С та кінцевим охолодженням на повітрі [39].

Переваги гарячої прокатки:

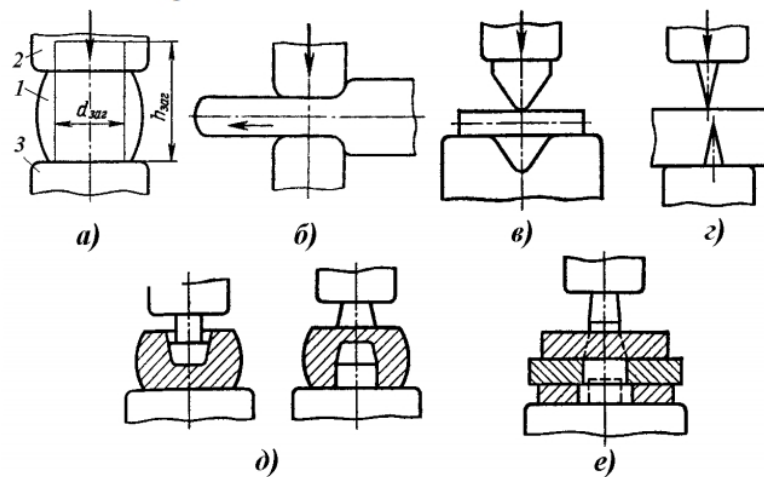
- енергетична та економічна рентабельність;
- підвищення механічних властивостей виробів: утворення дрібнозернистої структури, зменшення дефектів, стягування тріщин тощо.
- продуктивність;
- можливість автоматизації [40].

Недоліки:

- утворення шаруватої “сендвіч”-структури;
- утворення внутрішніх залишкових напружень, що виникають через нерівномірність охолодження виробів [36];
- обмеження виготовленої продукції по товщині (не більше 1% від товщини валків) [41].

1.2.4 Гаряче кування

Гаряча ковка – це процес формування металу, при якому нагріту до $0,75T_{пл}$ заготовку оброблюють до остаточного надання їй заданої форми. Метод одночасно поєднує в собі операції осадки, кантовки та протягування (рис. 1.6), та дозволяє отримати деталі з дрібнозернистою структурою, що за властивостями схожі на литі деталі. Така структура досягається завдяки зменшенню розміру заготовки, під час якого руйнуються грубі зерна. До того ж, такий спосіб можна реалізувати з мінімальною кількістю відходів [42].



1 – нагріта заготовка; 2 – верхній бойок; 3 – нижній бойок;

а – осадка; б – протяжка; в – гнуття; г – відрубка; д – двостороння прошивка;

е – наскрізна прошивка

Рисунок 1.6 – Схема основних технологічних операцій гарячої ковки [35]

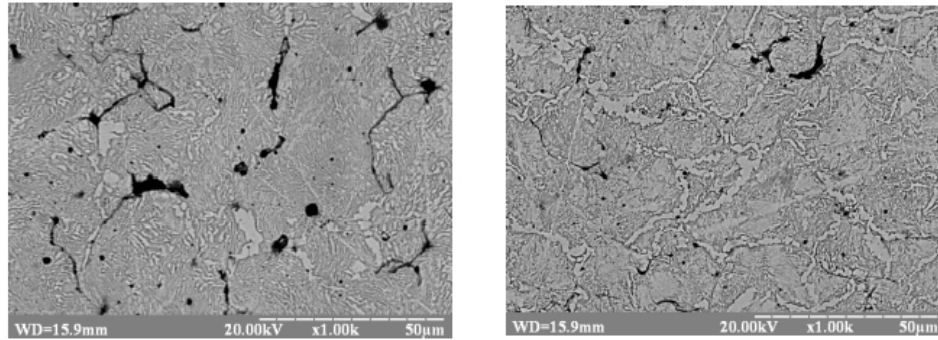
Для ковки використовується універсальне обладнання (кувальні молоти ударної дії), яке можна використовувати для виготовлення різноманітних поковок. Деталі невеликої або середньої ваги виготовляють з сортового прокату прямокутного, квадратного та круглого перерізу [35].

Для гарячого кування підшипникових сталей використовують спеціальні оптимальні режими нагріву. Початок кування для сталей ШХ15 та ШХ15СГ відбувається при 1030–1050°C, закінчення при 830–900°C. При цьому великі вироби охолоджуються тонкорозпиленою сумішшю води та повітря, а поковки звичайного розміру – примусовим дуттям. Це робиться для запобігання утворенню тріщин та карбідної сітки. При використанні індукційного нагріву температури нагрівання поковок збільшують на 50–100 °C [44]. Механічні та фізико-механічні властивості поковок на основі заліза напряму залежать від вмісту в них вуглецю. Порівняння кованих зразків та зразків, отриманих стандартним методом пресування з подальшим спіканням представлено в таблиці 1.3 [45].

Таблиця 1.3 — Порівняння властивостей спечених та кованих зразків [34]

Вміст графіту, %	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності $\sigma_{ст}$, МПа	Пластична деформація $\epsilon_{пл}$, %	Мікротвердість (Майер), НМ	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт пластичності, відн. од.	Напруження, ГПа
Спечений							
1,7	307	1186	35,2	3,4	142	0,924	0,645
4,0	241	683	16,3	3,25	162	0,93	0,761
12,0	188	288	3,3	1,62	77,5	0,92	0,34
Кований							
1,7	279	1283	26,9	4,6	184	0,9	1,05
4,0	310	794	12,3	3,8	137	0,9	0,87
12,0	220	255	0,9	1,9	63,5	0,892	0,431

Таким чином, можна впевнено сказати, що вміст графіту впливає на відсоток пористості зразків. З підвищенням його вмісту пористість зменшується. З таблиці 1.3 бачимо, що ковка збільшує показники міцності на згин та стиснення, зносостійкість та міцність зразків порівняно зі спеченим матеріалом при оптимальному вмісті графіту. Тобто, застосування гарячоїковки є технологічно доцільнішим за стандартні методи та дозволяє отримувати антифрикційні матеріали, що здатні працювати в умовах динамічних навантажень високого значення [45].



(а)

(б)

а – спечений зразок; б – кований зразок

Рисунок 1.7 – Мікроструктура зразків з вмістом графіту 1,7 % [45]

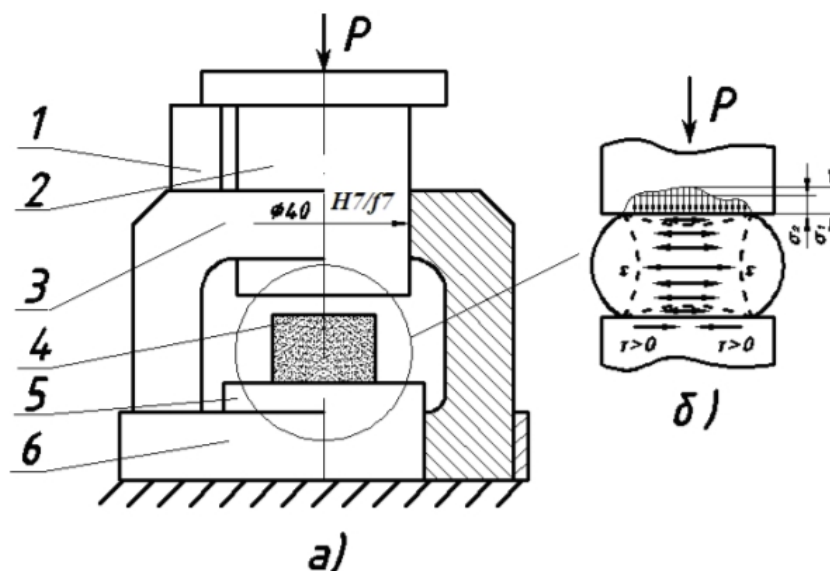
Існує більш вдосконалена варіація цього методу — ізотермічне кування. Його головна відмінність полягає в тому, що нагрівання штавів та самого матеріалу відбувається до однакової температури. Така технологія дуже популярна при куванні суперсплавів. Для попередження окислювання матеріалу, вона проводиться виключно в контрольованій атмосфері, або, взагалі, у вакуумі. Такий спосіб дозволяє отримувати деталі складної форми, але оснований на трудомістких, багатоступеневих тривимірних процесах, в яких дуже складно передбачити поведінку матеріалу. Адже в ньому відбувається еволюція мікроструктури, викликана неоднаковою пластичною деформацією, температурою, часом нагрівання та режимом охолодження [43].

1.2.5 Осадка

Осадка – це процес, при якому заготовку, зазвичай циліндричної форми, деформують між двома плоскими паралельними поверхнями, в результаті чого відбувається збільшення поперечного перерізу виробу за рахунок зменшення висоти. При осадці заготовок циліндричної форми, в результаті процесу утворюється бочкоподібна форма. Це пов'язано з неоднорідним розподілом деформацій по заготовці. Найбільша деформація відбувається всередині виробу вздовж осі, а найменше зміщення частинок проходить по

периферійній частині зразка. Через це можуть виникати додаткові та залишкові напруження, зони ускладненої деформації [46].

Внаслідок такого ущільнення, зразки мають морфологічні відмінності в структурі: периферійна зона характеризується сильною різнозернистістю, там концентрується найбільша кількість мікропор, неметалічних включень та можуть виникати тріщини. Оскільки даний процес оснований на явищі пластичної деформації, кінцеві властивості осадженого зразка залежать від ступені деформації та її технологічних умов [46]. Схема вільного гарячого осадження наведена на рисунку 1.8.



а – устаткування для вільної гарячої осадки; б – схема розподілу та напрямків деформацій та напружень

Рисунок 1.8 – Вільна гаряча осадка зразків циліндричної форми [47]

В роботі [48] було з'ясовано, що для усунення тріщин та мікропор на периферії зразка, осадку треба проводити у сталевій обичайці.

Одночасно з недоліками, які можна досить легко усунути, метод має достатню кількість переваг. Отримані осадкою зразки мають вищі механічні властивості, порівняно з литими або механічно обробленими. Це можна легко порівняти, розглянувши зернограничний потік, утворений в кожному з вищеперерахованих зразків.

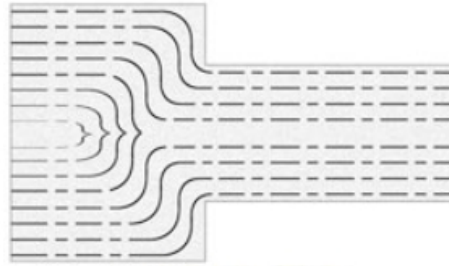


Рисунок 1.9 – Осаджений брусок [49]

Як видно з рисунку 1.9 в процесі осадження формується співнаправлений з віссю зернограничний потік, що дозволяє досягати максимальної міцності виробу. До того ж, така структура забезпечує високу пластичність, ударостійкість та стійкість до втоми.

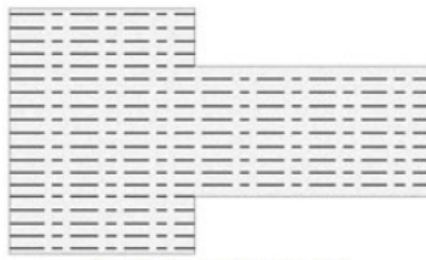


Рисунок 1.10 – Механічно оброблений брусок [49]

На рисунки 1.10 бачимо односпрямований зернограничний потік, який при зменшенні діаметру виробу також зменшується. В результаті цього «оголюються» кінці зерен. Це робить матеріал більш схильним до корозійно-механічного розтріскування та втомлюваності.

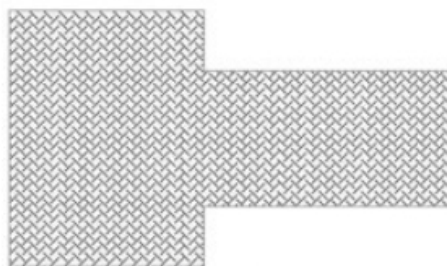
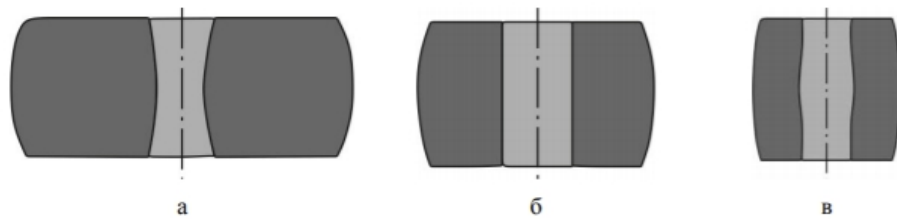


Рисунок 1.11 – Литий брусок [49]

Литий брусок, що представлений на рисунку 1.11, взагалі не має певної направленості зернограничного потоку, відповідно, підвищені міцнісні властивості вздовж певного напрямку також відсутні [49].

При вільній осадці зразків з отвором головним фактором є відношення товщини стінки виробу до його висоти (S/H). Якщо це відношення дорівнює

або є більшим за 0,5, тоді метал стікає або до периферійної частини зразка, або і до периферії, і до внутрішньої осі без зміни внутрішнього діаметру. Якщо це значення менше за 0,5 – метал буде деформуватися всередину, що може призвести до утворення зажиму у внутрішньому діаметрі отвору. Всього випадки зображені на рисунку 1.12. Для того, щоб процес проходив стабільно, вивели рекомендоване відношення зовнішнього діаметру до товщини стінки, яке повинно бути не менше 3 [50].



а, б – заготовки з відношення $S/H \geq 0,5$; в – $S/H < 0,5$

Рисунок 1.12 – Схематичне зображення зміни форми металу при вільній гарячій осадці зразків з отвором [50].

Підводячи підсумок, можна виділити такі переваги методу:

- простота реалізації;
- висока міцність та щільність отриманих зразків;
- мала кількість відходів;
- відсутність проблем з крихкістю та пористістю отриманих зразків;
- відсутність виникнення тріщин на стиках з'єднань [49].

До недоліків належать:

- неоднорідний розподіл деформацій по зразку, через що складно оцінити цілісні механічні властивості та зміну форми виробу;
- зміна форми та розмірів заготовки;
- метод недостатньо вивчений, досліджені лише прості випадки осадки [51].

1.3 Вибір технологічної схеми

Внаслідок аналізу всіх вищерозглянутих методів переробки сталевого шламу з отриманням високощільних виробів та зважування всіх переваг та недоліків було вирішено, що найбільш вигідним методом, що поєднує в собі економічність та високу якість отриманих зразків, є брикетування з подальшим гарячим куванням. Цей спосіб дозволяє отримувати високощільні вироби різноманітної форми, а також є невибагливим до вибору матеріалу. Незважаючи на трудомісткість процесу, обладнання, яке застосовується для гарячого кування є універсальним. Та, на відміну від установок для гарячого динамічного або ізостатичного пресування, є більш дешевим. Технологія є достатньо вивченою та поширеною. Недостатню точність в дотриманні розмірів можна усунути післяобробкою, або ж, як в данному випадку, застосуванням сталеві обичайки.

Для пошуку найдоцільнішого технологічного процесу будуть розглянуті 3 технологічні схеми виготовлення зразків:

- пресування з подальшим куванням;
- пресування, допресування та гаряче кування;
- пресування, допресування, осадка та гаряче кування.

1.4 Висновки та постановка задач дослідження

Аналіз літературних даних стосовно переробки відходів металообробки показав, що існують різні підходи утилізації стружки ШХ–15, найбільш перспективними з них є компактування порошкових сумішей із застосуванням операцій термодформаційного оброблення, серед яких було розглянуто гаряче динамічне та ізостатичне пресування, прокатку, гаряче кування та осадження. Додатково був розглянутий метод рідкофазного спікання. Було виявлено, що для створення ліквідних заготовок з задовільними механічними властивостями доцільно використовувати

поєднанням декількох технологічних операцій: пресовка, допресовка, осадження та гаряче кування. Створені зразки будуть поєднувати в собі різні комбінації цих методів, а потім будуть порівняні між собою та з результатами комп'ютерного моделювання відповідних процесів.

Метою роботи є створення компактних порошкових матеріалів на основі відходів стружки ШХ–15 шляхом моделювання процесів ущільнення порошкових сумішей та вивчення впливу схеми деформації на розподіл щільності та напружень в матеріалі.

Для досягнення поставленої мети в роботі були поставлені наступні задачі досліджень:

1. Провести моделювання процесу деформації порошкової суміші на основі стружки ШХ–15 методом скінчених елементів за різними технологічними схемами.

2. Проаналізувати вплив технологічної схеми (статичне пресування, допресування, осадка та вільне кування) на розподіл щільності та напружень в матеріалі пресовки.

3. Провести експериментальні дослідження процесів ущільнення порошкової суміші на основі стружки ШХ–15 за різними технологічними схемами.

4. Дослідити структуру та механічні властивості порошкових матеріалів на основі стружки ШХ–15.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Вибір об'єкту дослідження та методика експерименту

Для виконання експериментальної частини дипломної роботи використовуватимуться наступні матеріали: шламові відходи ШХ–15, просіяні крізь вібраційне сито з розміром комірки 3 мм, порошок заліза марки ПЖРВ з фракцією -016+0063 та графітовий порошок ГС–4. Для подальшого брикетування створювалася суміш з відходів стружки шарикопідшипникової сталі з додавання 50 % заліза з вмістом 4 % графіту.

1.2 Статичне пресування заготовок

На стадії підготовки відбулося фракціювання шламової стружки ШХ–15 крізь 3 мм комірку вібраційного сита з подальшим відпалом стружки при 1050 °С протягом 1 години в середовищі водню. Оскільки найбільше відновлення оксидів відбувається вище температури 1000 °С, а вже при 1100 °С починається плавлення порошку. Водень в даному випадку використовуються не тільки в якості захисної атмосфери, але й в якості відновлювача, що дозволяє отримати залізо з наклепу. В результаті відпалу збільшилась пластичність матеріалу, що в подальшому позитивно впливатиме на ущільнюваність заготовок.

Для виготовлення зразків циліндричного типу було обрано гідравлічний прес ПГ–50 з розміром діаметру робочого каналу 12 мм та 28 мм. Одностороннє пресування відбувалося при прикладанні тиску 700–800 МПа. Надалі для підвищення щільності зразків була проведена допресовка при 700 МПа. Для порівняння був також проведений відпал протягом 30 хв. при температурі 700–800°С та подальша допресовка при тому самому тиску 700 МПа. Результати наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати ущільнення зразків відпалених та сформованих за різних умов

Зразок №	Температура відпалу, °С	Час відпалу, год	Щільність після пресування, г/см ³	Щільність після допресування, г/см ³	Δγ, г/см ³
1	1050	1	5,1446	7,7822	0,6376
2	850	0,5	6,07	6,31	0,24

Як видно з таблиці 2.1 більш перспективним є перший варіант виготовлення заготовок. Враховуючи те, що для гарячої ковки вже при 15–25 % пористості процес йде недостатньо продуктивно, допресовка є важливим технологічним етапом, який забезпечує ущільнення більше, ніж на 20 %.

Оскільки початкові брикети за структурою мають частинки не ізометричної форми, їх схильність на стадії переукладання до ущільнення досить мала (утворюється мала кількість контактів між частками через низьке координаційне число). Таким чином, завдяки металографічному аналізу з'ясували, що після першого пресування отримуємо зразки з пористістю 35–40 %, а вже завдяки допресовці ці значення зменшуються до 20–25 %. Структура представляє собою хаотично розташовані луски, що місцями складені в більш щільні шари.

1.3 Вимірювання початкових розмірів зразків

Використовуючи мікрометр, були виміряні розміри пресовок. Для вирахування щільності використовувався метод гідростатичного зважування та розрахунковий метод, що виражається формулою:

$$\gamma = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

де m – маса зразка, г;

V – об'єм зразка, см³.

Пористість зразків була визначена за формулою:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho'_{\text{екс}}}{\rho_{\text{теор}}}\right) \cdot 100, \quad (2.2)$$

де $\rho'_{\text{екс}}$ – експериментально визначена щільність виробу, г/см³;

$\rho_{\text{теор}}$ – теоретична щільність компактного матеріалу, г/см³.

Вагу витісненої рідини визначаємо як різницю між вагою тіла на повітрі та вагою тіла в рідині.

$$\gamma_n = \frac{G_1}{V_n} = \frac{G_1}{\frac{G_2 - G_3}{\gamma_p}}, \quad (2.3)$$

де G_1 – маса зразка на повітрі без обмазки;

G_2 – маса зразка на повітрі з обмазкою та підвісом;

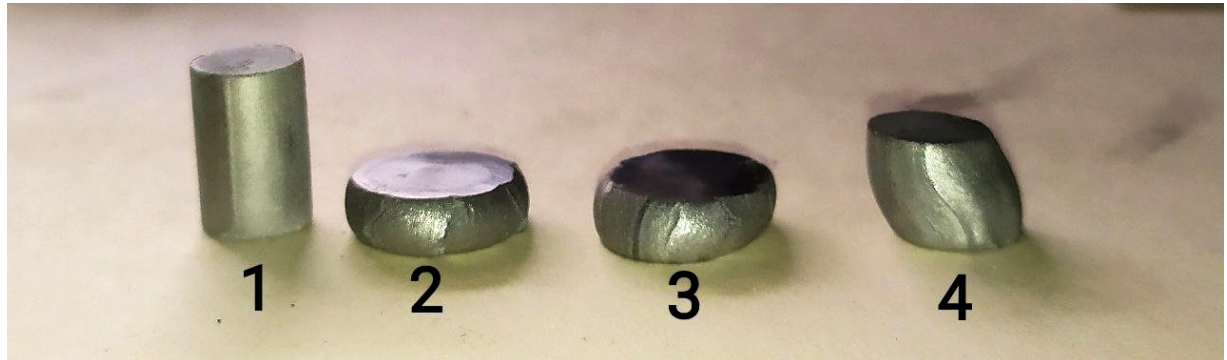
G_3 – вага зразка у рідині.

2.4 Вільна осадка заготовок

Оскільки, як вже було сказано раніше, для гарячої ковки об'єм пор 20–25 % є небажаним, проведемо додаткове ущільнення за допомогою вільної осадки. Для цього використовували лабораторний гідравлічний прес ЗИМ 50Т. Для з'ясування необхідності відпалу зразків перед допресовкою, провели осадження на відпалених та невідпалених пресовках. Для цього циліндричний зразок поміщався між двома сталевими загартованими пластинами та здавлювався вздовж осі пресування при зусиллі 20–500 кН.

В результаті чого, невідпалені зразки виявилися схильними до крихкого руйнування на периферійній частині, а відпалені характеризуються більш пластичною деформацією за механізмом пластичної течії. Зменшення висоти та збільшення розміру в радіальному напрямку відбуваються

закономірно. Для порівняння, осадження було проведено і на зразку, що не піддавався допресовці, в результаті чого виявилось, що руйнування відбувається за нижчих навантажень, незважаючи на більшу пластичність такої заготовки. А сам зразок піддається більш нерівномірній деформації. Це відбувається за рахунок того, що на периферію «скочується» більша кількість пор, ніж у допресованого зразку, а як відомо, пори є одними із концентраторів напружень в матеріалі.



1 – вихідний спресований та відпалений зразок; 2 – допресований відпалений зразок, осаджений при навантаженні в 6 т; 3 – спресований зразок, осаджений при навантаженні 4 т; 4 – спресований зразок, осаджений при навантаженні в 3 т

Рисунок 2.1 – Вихідний та осаджені зразки з заліза та шламу ШХ-15

Як бачимо на рисунку 2.1, попередньо допресований зразок може бути осаджений при більшому навантаженні з меншим руйнування. Однак, всі зразки мають однакову проблему — яскраво виражену зміну геометричних розмірів. Для того, щоб зменшити схильність до розтріскування та контролювати розподіл деформації, будемо осаджувати зразки в трубчастій обичайці з низьковуглецевого сплаву з внутрішнім діаметром 30 мм. Висота вихідного спеченого зразка співпадає з висотою обичайки та становить 16–18 мм. Порівняння вільної осадженої заготовки без обичайки та в обичайці представлено на рисунку 2.2.

Як бачимо, застосування обичайки є досить якісним рішенням поставленої проблеми. Осаджені зразки мають симетричну форму бочки, яка все ще потребує механічної обробки, але вже не має тріщин по периферії.



1 – вихідний зразок; 2 – зразок, осаджений без обичайки; 3 – зразок, осаджений в обичайці

Рисунок 2.2 – Порівняння зразків, осаджених з використанням сталеві обичайки та без неї

На рисунку 2.3 зображені брикети в обичайках до осадження та після.



Рисунок 2.3 – Вихідні зразки в обичайці до та після осадження при зусиллі 600 кН

2.5 Вільне кування заготовок

Перед проведенням гарячої ковки слід повністю прогріти заготовки без застосування обичайки. Для цього використовували камерну електричну піч СНОЛ–11. Зразки поміщали в карбонізатор – деревне вугілля та нагрівали в сталевому жаростійкому контейнері в середовищі повітря до 1100–1150 °С до їх повного прогріву (впродовж 30 хв.). Після цього зразки розміщали поруч зі сталевим плоским ковадлом, розігрітим до температури 300–350 °С. Для кожного зі зразків проводилось торцеве кування з двох сторін по 8–10 ударів. При досяганні заготовками температури в 800–900 °С процес кування припинявся, а самі зразки відправлялися на сталеву плиту для загартування та кінцевого охолодження.

В результаті такого вільного кування спостерігалось активне розтріскування периферійної частини зразків та їх осипання. Відповідно, використовуючи досвід, що був отриманий при проведенні процесу осадки зразків, було вирішено проводити кування в сталевій відпаленій трубчастій обичайці. Збірка обичайка–пресовка кувалася на багатофункціональному пневматичному молоті МА 4129, який є придатним для таких технологічних процесів, як осадка, вільне кування та протяжка, а також гаряча рубка металу та прошивка отворів. Маса падаючих частин складала 75 кг, кування відбувалося за швидкості 210 уд/хв.

Попередня підготовка зразків була така ж сама, як і для зразків без обичайки: нагрів до 1100–1150 °С в контейнері з деревним вугіллям протягом 30 хвилин, двостороннє торцеве кування (8–10 ударів с кожного торця). В результаті деформація системи обичайка–пресовка складала приблизно 70 %, залишковий об'єм пор складає майже 1 %. В таблицях 2.2 та 2.3 представлені геометричні параметри зразків до та після гарячого кування в залежності від способу попередньої обробки.

Таблиця 2.2 – Геометричні розміри зразків після гарячого кування

Параметр	Вихідні розміри	Після вільного гарячого кування
Висота, мм	20,4	11,9
Діаметр, мм	33,2	51,5
Пористість, %	7–8	~1

Таблиця 2.3 – Геометричні розміри осаджених зразків після гарячого кування

Параметр	Вихідні розміри	Розміри після вільної осадки	Після вільного гарячого кування
Висота, мм	20,4	16,5	10,1
Діаметр, мм	33,2	46,5	53,5
Пористість, %	7–8	2	~1

Спираючись на дані таблиць 2.2 та 2.3, можна сказати, що поєднання процесів гарячого кування та осадки в одній технологічній схемі не є доцільним. Ці процеси можуть бути взаємозамінними, адже дають незначні відмінності в значеннях пористості зразка. До того ж, при застосування попереднього осадження с подальшим куванням, відбувається більша зміна геометричних розмірів виробів, що не завжди є бажаним.

Використання ж сталеві обичайки виявилось доцільним. Усунулося периферійне руйнування пресовок при ущільненні. Також в такий спосіб можна збільшити коло використовуваних композиційних порошкових матеріалів для процесу гарячої ковки.

2.6 Моделювання процесу деформації порошкових систем в умовах вільного торцевого кування

З плином часу матеріали та устаткування порошкової металургії стають все більш дорогими та складними. Тому дуже актуальною є тема проведення комп'ютерного моделювання задля зменшення використання необхідного оснащення, скорочення часу проведення дослідів та заощадження коштів. Особливо популярне використання комп'ютерних технологій при створенні високоміцних, однорідних за структурою та об'ємом деталей з мінімальною пористістю. В цьому випадку моделювання дозволяє якісно встановити розподіл деформацій, залишкову поруватість та питомі зусилля, що діють на сам інструмент. Це дозволяє швидко та з мінімальними витратами спроектувати найоптимальніший технологічний процес з прогнозуванням необхідного результату [52].

При компактуванні порошків за механізмом пластичної деформації більшість процесів можна змоделювати методом скінченних елементів (МСЕ). Він оснований на поділі області вирішення задачі на маленькі відрізки, для кожного з яких будуються диференційні рівняння, які потім вирішуються. Рівняння будуються з врахуванням фізичних та хімічних процесів, що протікають. Тут необхідно чітко визначити, які елементи будуть задаватися на початку, як константи, а які змінюватися. Правильно побудована модель та задані параметри – основа вірно поставленої та, як наслідок, вирішеної задачі [53].

На даний момент на основі цього методу було створено багато програмних систем для інженерного аналізу:

- ANSYS;
- LS-DYNA;
- ABAQUS;
- DEFORM тощо.

В даній дипломній роботі моделювання технологічних процесів проводилося в середовищі DEFORM 2D/3D. Цю програму часто використовують для моделювання порошкових матеріалів методами статичного пресування, осадки та штамповки [52–55]. Натомість інформація про моделювання вільного торцевого кування практично відсутня. Тому логічним рішенням було проводити окремі моделювання процесів для різних стадій створення зразків.

За реологічну модель в середовищі DEFORM була обрана модель пористого жорстко-пластичного тіла (рис. 2.4). Геометричні розміри пресовок та трубної обичайки були взяті на основі результатів реальних експериментів, які представлені в таблицях 2.2 та 2.3. В результаті проведеного моделювання оцінювався вплив допресовки, осадження та вільного торцевого кування на напружено-деформований стан та розподіл пористості в циліндричній пресовці зі шламової стружки сталі ШХ-15, порошку заліза та графіту.

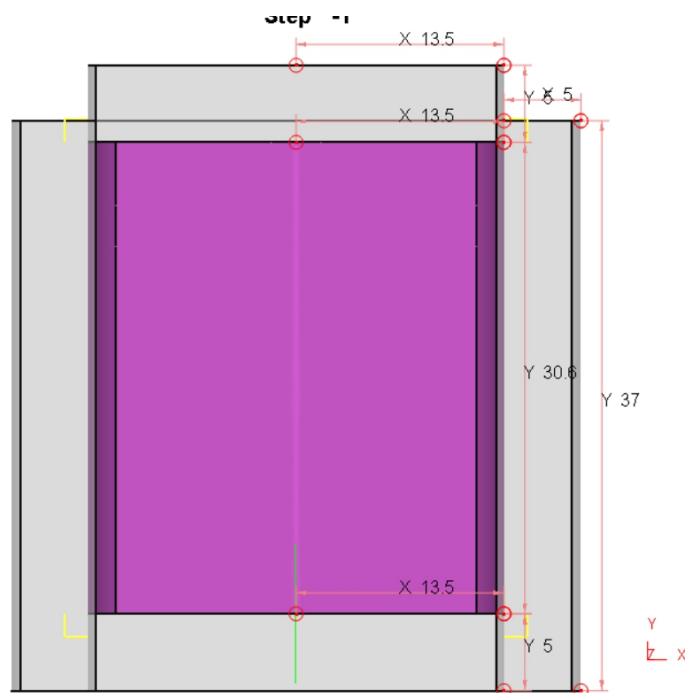


Рисунок 2.4 – Модель збірки обичайка–пресовка з позначеними геометричними розмірами

Було змодельоване пресування даної заготовки (рис. 2.5), в результаті якої були виявлені розподіл щільності, деформації та їх швидкість.

Встановлена схильність зразка до руйнування при прикладеному тиску в 700 МПа.

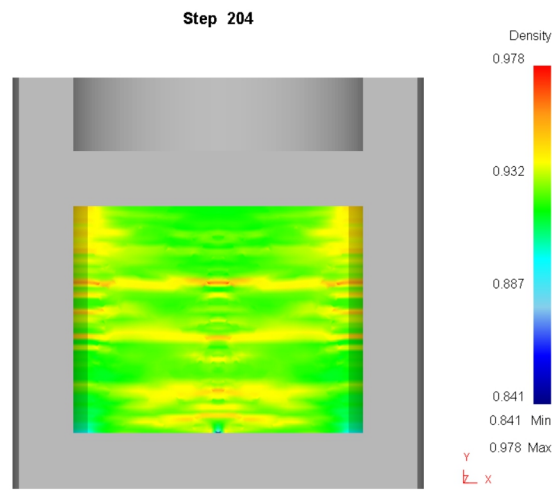
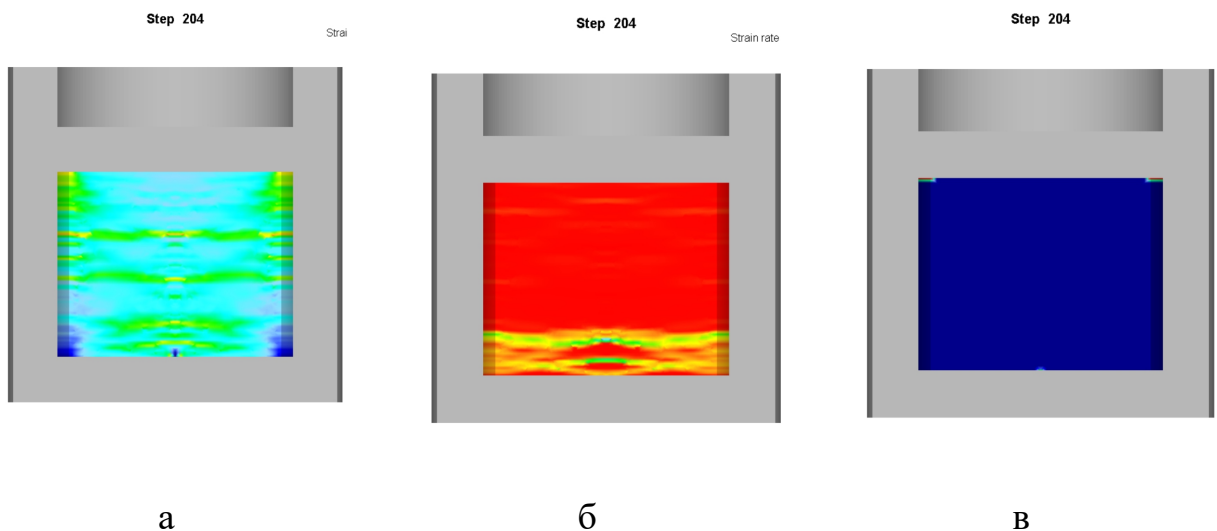


Рисунок 2.5 – Розподіл щільності по пресовці

Як бачимо з рисунку 2.5, пресовка потребує додаткового ущільнення. Структура хаотична, місцями шарувата та більш ущільнена, що спричинено особливостями форми частинок. При цьому, на рисунку 2.6 відбулася швидка незначна деформація з низькою схильністю до руйнування, що зосереджена лише по верхній периферії зразка в місцях прикладення навантаження.



а – напружено-деформований стан; б – розподіл швидкості деформацій;
в – схильність до руйнування

Рисунок 2.6 – Модель зразка після пресування

Оскільки раніше було з'ясовано, що відмінність в значеннях щільності між кованим зразком та зразком, що кували після осадження мінімальні, ці

два процеси моделювали окремо. Як і в попередній операції, досліджували розподіл щільності, швидкість деформацій та схильність зразка до руйнування, додатково був розглянутий напружено деформований стан зразка. Моделювання проводилося для системи обичайка–пресовка, бо ці технологічні процеси недоцільно виконувати без обмеження через сильну зміну геометричних розмірів. Розподіл щільності показаний на рисунку 2.7, швидкість деформацій та схильність до руйнування – на рисунку 2.8.

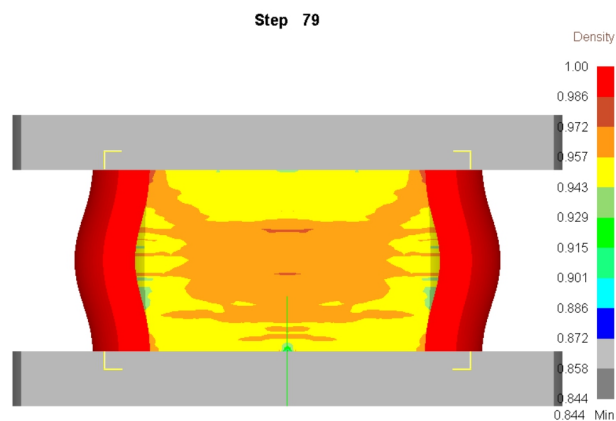
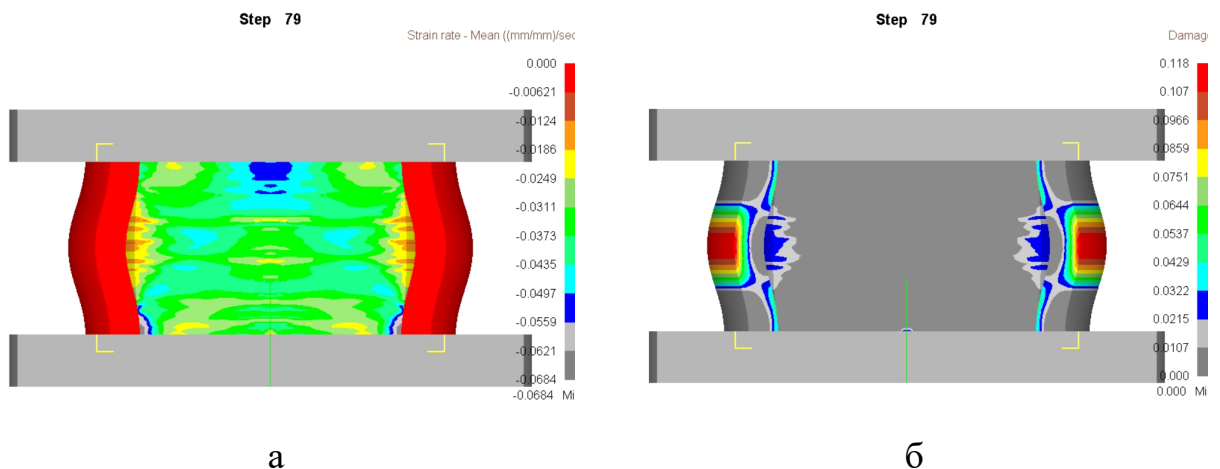


Рисунок 2.7 – Розподіл щільності зразка після осадження



а – розподіл швидкості деформацій; б – схильність до руйнування

Рисунок 2.8 – Моделювання зразка після осадження

Значення щільності значно вищі, ніж у спресованого зразка. Основне ущільнення починається з середини, з часом розходячись до периферії зразка, що відповідає теоретичним даним. Така поведінка матеріалу спричинена наявністю сил тертя у місцях контакту плити пресу та заготовки. Осадка супроводжується утворенням бочкоподібної форми зразка.

Спираючись на результати моделювання на рисунку 2.8, можна сказати, що зразок активно деформується по всьому об'єму з достатньою швидкістю. При цьому, самому зразку властива мінімальна схильність до руйнування при прикладеному до нього навантаженні, внаслідок застосування трубчастої сталевий обичайки.

Моделювання кожного процесу окремо дозволяє порівняти ефективність методу осадки та вільного торцевого кування без виконання реального дослідження механічних властивостей зразків. Таким чином, можна швидко виявити недоліки та переваги кожного з методів. Було проведено моделювання ковки зі збором відповідних даних для їх порівняння (рис. 2.9).

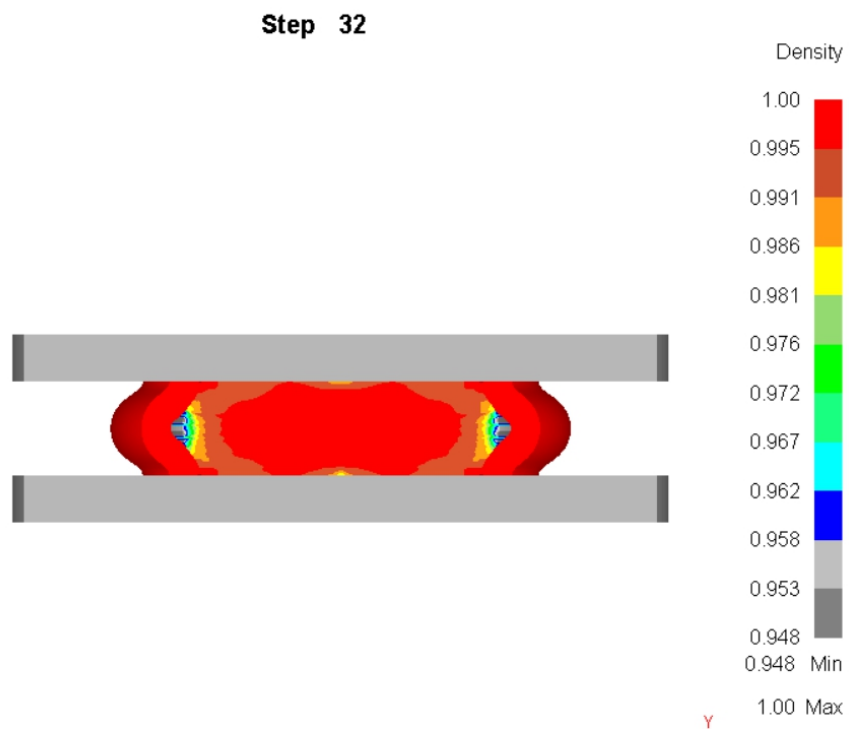
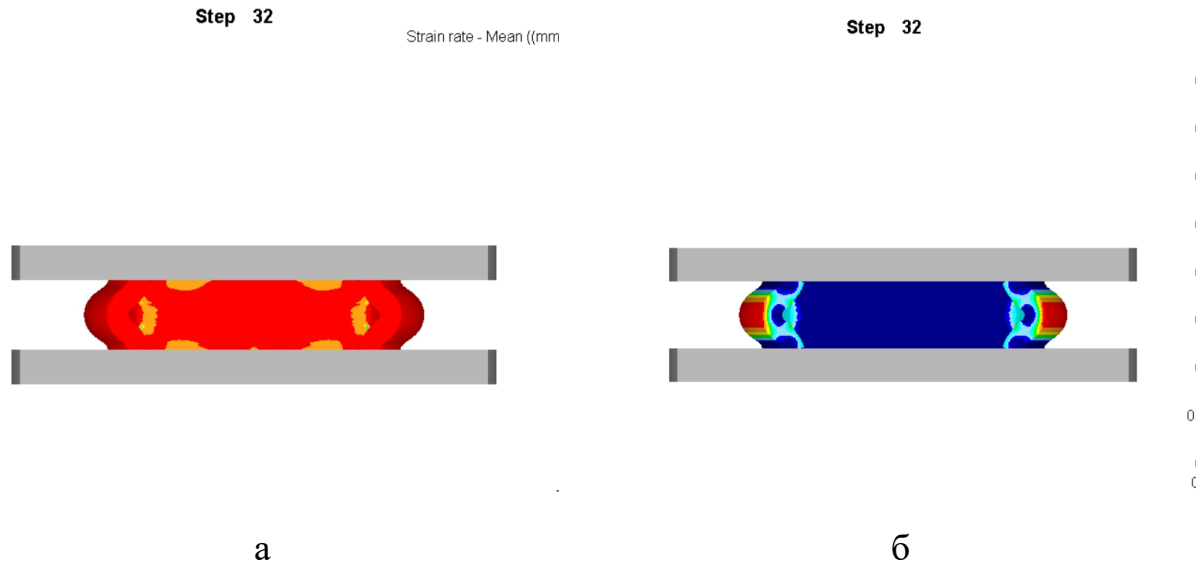


Рисунок 2.9 – Розподіл щільності в кованому зразку

Порівняно з осадженим зразком, кований має майже стовідсоткову щільність, що достатньо рівномірна по всьому об'єму. Щільність набагато менша по боковій поверхні шайби, що спричинено застосуванням сталевий обичайки.

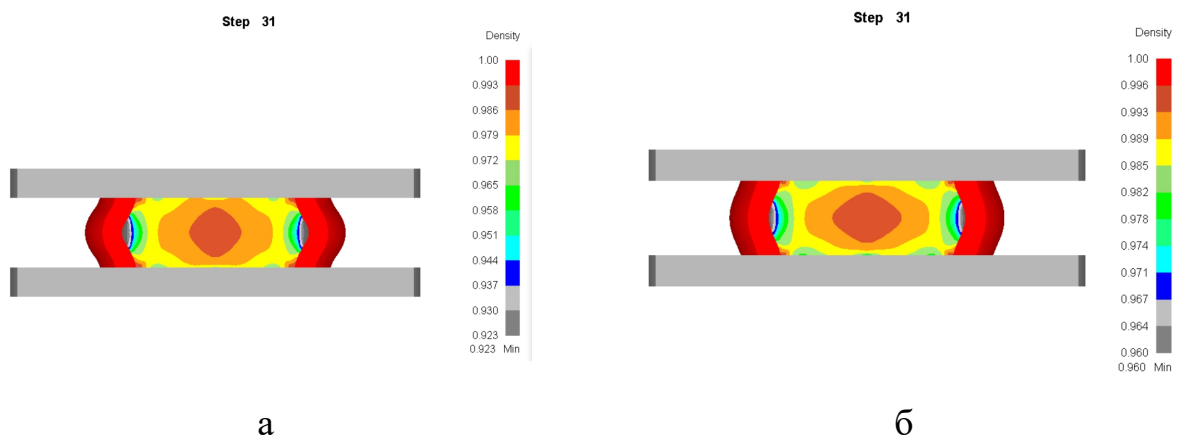


а – розподіл швидкості деформацій; б – схильність до руйнування

Рисунок 2.10 – Моделювання зразка після кування

Незважаючи на високі швидкості деформування, зразок має мінімальну схильність до руйнування, що видно з рисунку 2.10. До того ж, ущільнюється майже на 100 %, з незначними пористими областями по периферії. Для порівняння, при осадженні об'єм пор становить приблизно 3–4 %, ущільнення відбувається менш рівномірно.

Додатково були проведені дослідження впливу початкової пористості заготовки на її ущільнення в процесі кування на основі моделювання (рис.2.11).



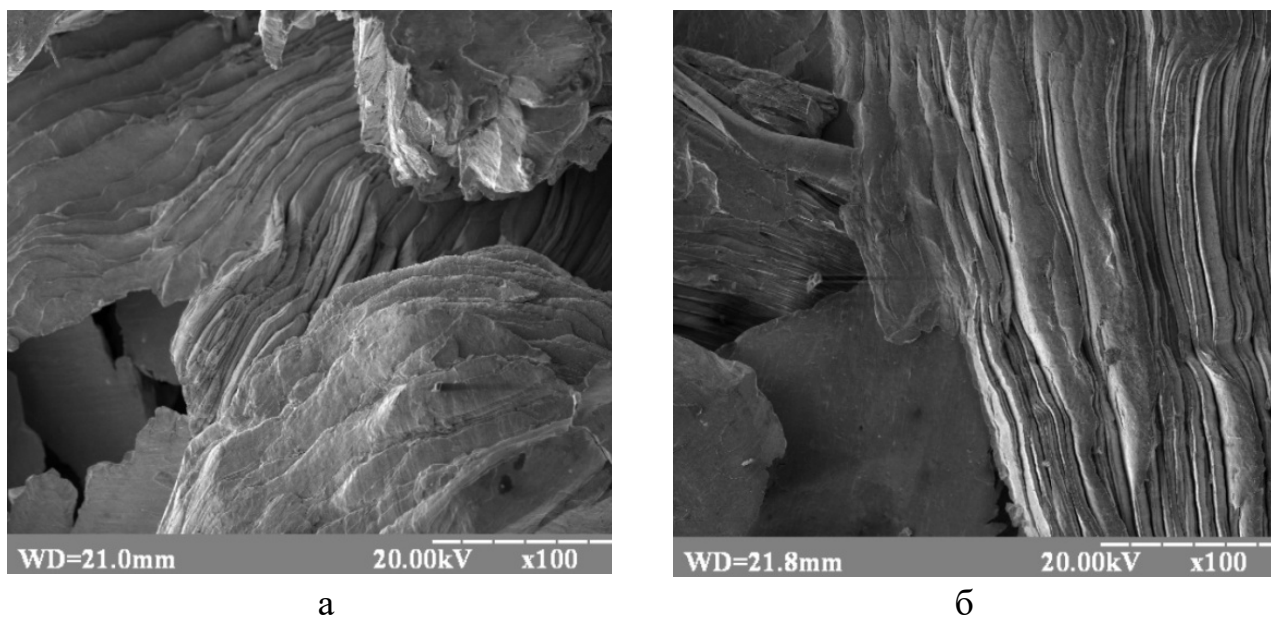
а – 12 %; б – 7 %

Рисунок 2.11 – Моделювання розподілу відносної щільності з різним об'ємом пор перед куванням

Відповідно до рисунку 2.11 пресовка з більшою пористістю схильна до утворення більш яскраво вираженої форми бочки, що спричинене інтенсивною деформацією в нормальному напрямку. При меншій пористості пресовка, навпаки, піддається інтенсивним радіальним навантаженням, а нормальним чинить опір.

2.7 Дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури проводилося на скануючому електронному мікроскопі REM-106. Для цього зі зразків виготовлялися стандартні шліфи, які протравлювалися у 5 % розчині азотної кислоти. Зображення мікроструктури одноразово спресованого зразка при 700 МПа та зразка, допресованого при тому ж тиску, наведені на рисунку 2.12.

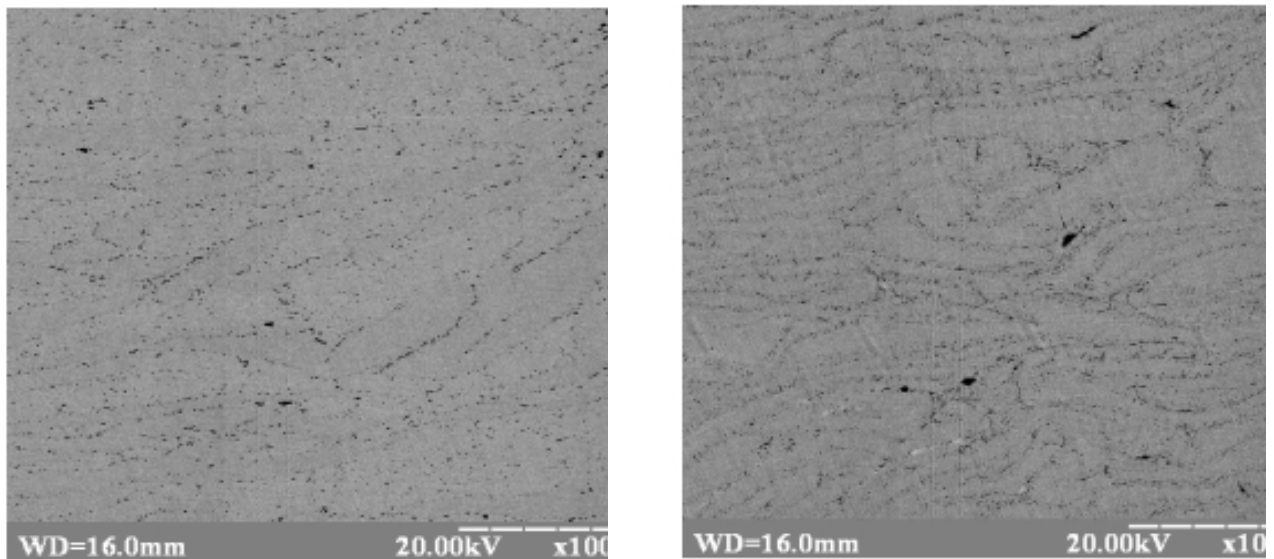


а – пресування при 700 МПа; б – допресування при 700 МПа

Рисунок 2.12 – Мікроструктура пресованих на основі стружки ШХ-15 зразків

Після пресування отримується пориста структура з великим об'ємом пор, після допресовки бачимо окремі нагромадження частинок лускатої форми, які розташовані хаотично. При цьому, пориста структура зберігається, але в меншій кількості.

Структура зразків після кування, в залежності від методу попередньої обробки, представлена на рисунку 2.1.



а

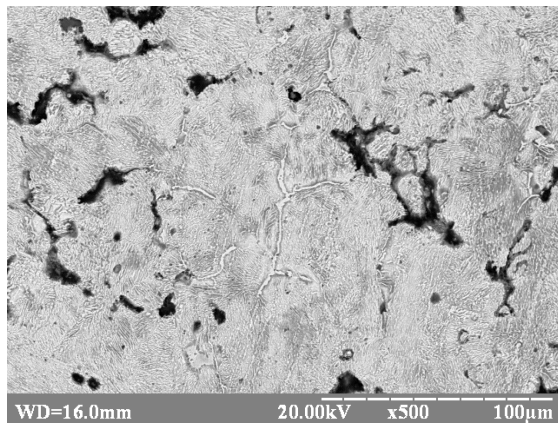
б

а – попереднє допресування; б – попереднє допресування та осадження

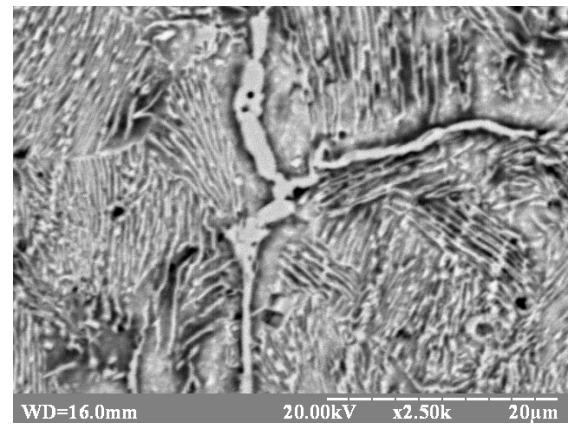
Рисунок 2.13 – Структура зразків на основі стружки ШХ–15 після вільного торцевого кування

Як і було припущено, структура після попереднього допресування та допресування з осадженням майже не відрізняються. Можна виділити тільки більш виражену шарову структуру зразка (рис. 2.13 б), що спричинено додатковим усуненням пор при осадці.

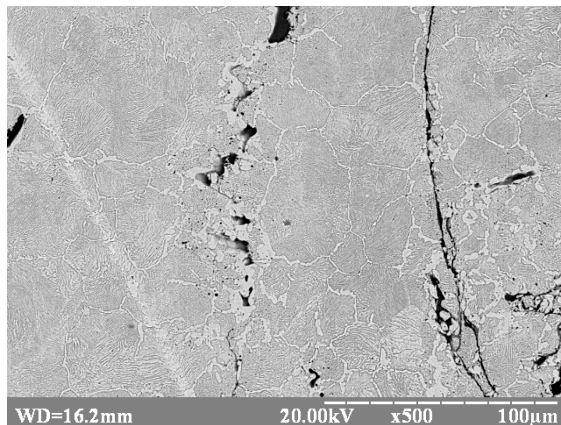
Мікроструктура зразків, виготовлених із суміші шламової стружки ШХ–15, залізного порошку та графіту подібна до структури заевтектоїдної сталі, яка складається з вторинного цементиту та перліту. Після проведення гарячого кування відбувається потоншення цементитної сітки та зменшення розміру зерна, що підвищує міцнісні властивості.



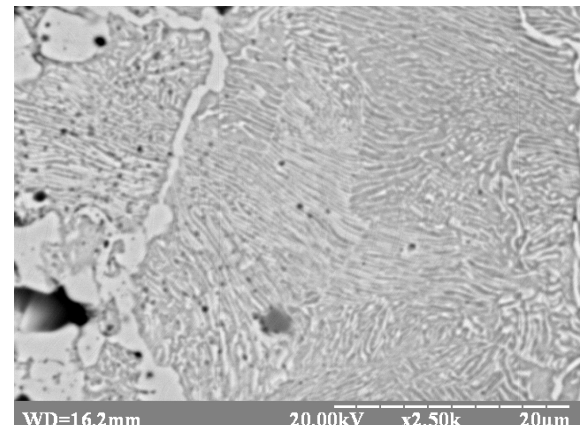
а



б



в



г

а, б – до кування; в, г – після кування

Рисунок 2.14 – Мікроструктура зразків на основі стружки ШХ–15

2.8 Визначення твердості зразків

Вимірювання твердості проводилося на твердометрі ТК–2 за шкалою HRB та HRC шляхом вдавлювання кульки або алмазного конусу відповідно. Індентор вдавлювався в поверхню зразка з дотриманням відповідних вимог ISO 4498.

Для вимірювання твердості загальне навантаження для вимірювання за шкалою HRC становило 1500 Н, для HRB – 980,7 Н (діаметр кульки становив 1,5875 мм). На основі отриманих даних було побудовано таблицю 2.4, яка представлена нижче.

Таблиця 2.4 – Твердість зразків на основі стружки ШХ–15 після гарячого кування, в залежності від попередньої обробки

Вид попередньої обробки	Твердість, HRB	Твердість, HRC
Спікання 1050 °С, допресовка	–	16–18
Спікання при 1050 °С, допресовка та осадка	–	18–20
Нагрів під кування 30 хвилин	87–90	–

За отриманими даними, можна зробити висновок, що гаряче торцеве кування дозволяє отримати зі вторинної сировини, а саме суміші на основі відходної стружки сталі ШХ–15 зразки достатньої твердості.

2.9 Визначення міцності на стиск

Для випробування міцності на стиск використовувалося універсальне повірене обладнання «CERAMTEST» з максимальною потужністю 10 т.

Машина керується автоматично, обробка даних відбувається за допомогою програми, яка розраховує криві навантаження під час стиснення та дозволяє отримати дані по механічним характеристикам випробуваних зразків. Таким же чином можна проводити і випробування на розтяг, але в даній дипломній роботі його проводити недоцільно.

Для визначення шуканих характеристик, випробування проводилось на призматичних зразках з відношенням висоти до площі перетину рівним 1,5. Під час стиснення зразків визначалася границя плинності (σ_{02}), що є показником початку пластичної деформації, границя міцності (σ_B) та пластична деформація ($\epsilon_{пл}$).

Були порівняні значення механічних характеристик зразків після різних способів попередньої обробки: допресовки, осадження та нагріву під кування.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В рамках дипломної роботи були проведені дослідження, які дозволили дослідити можливість створення виробів високої міцності зі вторинної сировини. Для створення зразків використовувалася суміш заліза 50 % (фракції -016+063) з 4 % графітового порошку та шламова стружка шарикопідшипникової сталі ШХ–15, яка попередньо була просіяна крізь вібраційне сито з фракцією 3 мм та відпалена в захисному середовищі водню протягом 1 години при 1050 °С. Зразки циліндричної форми пресувалися на ПГ–50 з діаметром робочого каналу 12 мм та 28 мм при прикладанні тиску 700 МПа. Далі деякі зразки відпалювалися при 700–800°С в водні потягом 20–30 хвилин для зняття деформаційного наклепу та підвищення пластичності, а потім допресовувалися при 700 МПа. Деякі зразки проходили допресовку без попереднього відпалу.

Для виявлення доцільної технологічної схеми, в подальших експериментах заготовки піддавалися різним методам попередньої обробки. Частина невідпалених зразків була осаджена між плоскими загартованими пластинами при прикладанні зусилля 20–500 кН на гідравлічному лабораторному пресі ЗИМ 50Т. Що призвело до їх крихкого руйнування по периферії. Натомість, відпалені зразки за тих самих умов деформувалися більш рівномірно за механізмом пластичної течії без утворення тріщин та зламів. Проблема сильної зміни геометричних розмірів в подальшому була вирішена застосуванням сталеві трубочасті обичайки, виготовленої з низьковуглецевої сталі.

Осадження в системі обичайка–пресовка дозволило отримати зразки з більш рівномірним розподілом щільності та збільшити відносну деформацію, отримавши пористість близько 2–3 %. Загалом, проведення вільної осадки призводить до зменшення пористості зразків до 10 %. Більше ущільнення неможливе через виникаючі радіальні напруження, через які замість ущільнення відбувається зменшення висоти та збільшення діаметру без

подальшого зменшення об'єму пресовки. Обмеження свободи пресовки сприяло утворенню високої щільності та міцності на периферійних частинах зразка, з щільною, але менш міцною серцевиною. Для підвищення міцнісних властивостей за необхідності можна проводити відпал або гарячу осадку.

Надалі проводилося гаряче кування попередньо спечених зразків, спечених та допресованих зразків, а також пресовок, що піддавалися вільній осадці після попереднього доущільнення. Систему обичайка–пресовка піддавали вільному торцевому куванню з попередні нагрівом заготовок протягом 1100 °С в подрібненому дерев'яному вугіллі. Проводили кування з двох сторін по 8–10 ударів на пневматичному молоті МА 4129, прикладаючи вагу в 75 кг до остигання заготовок до 800–900 °С. Охолодження проводили на повітрі на холодній сталевій плиті, де одночасно проходило неповне гартування. Результати значень твердості представлені в таблиці 2.4, а зміна геометричних параметрів в таблицях 2.2 та 2.3. За допомогою машини «CERAMTEST» були зняті механічні характеристики зразків після кування, враховуючи відмінності попередньої обробки. Вони представлені в таблиці 2.5.

Зважаючи на отримані дані, можна сказати, що вид попередньої обробки майже не впливає на кінцеві механічні властивості зразків. В усередненому значенні межі міцності допресовані та осаджені зразки мають границю міцності близько 1481,5 МПа. Однак, попередньо допресовані зразки відрізняються нижчими значеннями пластичності. Це пов'язано з більшою пористістю допресованих зразків, яка складає 5–7 %, натомість пористість осаджених зразків становить 2–3 %. При пресуванні відбувається більш високе зміцнення через виникнення наклепу. В цьому випадку при осадженні витрачається додаткова енергія на деформацію пор, тому «спаювання» частинок між собою відбувається гірше. Незначні відмінності спостерігаються і в структурі (рис. 2.14).

Згідно таблиці 3.1, середнє значення границі міцності для кованого зразка, що був просто спресований та спечений (нагрів під кування) протягом

30 хв. при 1100 °С незначною мірою поступається двом попереднім та становить 1308 МПа. Пластичність цих зразків знаходиться на високому рівні, вони мають найнижчу границю плинності.

Таблиця 3.1 – Міцність матеріалів на основі стружки ШХ–15 після вільного гарячого кування зважаючи на відмінності в попередній обробці

Вид попередньої обробки	Номер зразка	Границя пружності σ_{001} , МПа	Границя плинності σ_{02} , МПа	Границя міцності σ_B , МПа	Пластичність, %
Відпал, допресовка	31	844	967	1284	5,8
	32	747	925	>1747	>15,9
	33	1007	1093	1414	10,2
Відпал, осадка	51	663	717	1520	25,9
	52	494	572	1318	28,7
	53	699	806	1610	26,8
Нагрів під кування 30 хвилин	61	557	664	>1425	>20,5
	62	353	441	1173	29,3
	63	339	421	1328	29,4

Встановлено, що наявність попередньої обробки перед куванням покращує механічні властивості кінцевих виробів. Але виконувати їх в одній технологічній схемі недоцільно.

Для більшого розуміння процесів, що протікали під час різних етапів виготовлення зразків було проведено математичне моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ) в середовищі програми DEFORM 2D/3D. Деформувалася модель жорстко-пластичного тіла, геометричні розміри якої були задані на основі реальних вимірювань (табл. 2.2, 2.3). Були змодельовані такі технологічні процеси, як пресування, вільне осадження та вільне торцеве кування. Отримані результати (рис. 2.6–2.13) наглядно показали розподіл щільності по об'єму пресовки на кожному етапі, швидкість деформації та схильність до руйнування. Оскільки моделювання проводилося для системи обичайка–пресовка ризику руйнування були зведені до мінімуму.

Додатково було досліджено вплив початкової пористості зразка перед куванням на кінцевий розподіл щільності (рис. 2.12). Встановлено, що зменшення початкової пористості перед початком кування позитивно впливає на процес ущільнення. Чим менша пористість, тим менша буде зміна геометричних розмірів, що допомагає запобіганню утворення бочкоподібної форми та розтріскування по периферії.

Дуже важливу роль в процесі формування зразків методом осадження або кування грає напружено-деформований стан зразків (рис. 3.1, рис. 3.2), який впливає на кінцеві механічні властивості. В свою чергу на нього впливають швидкості деформації, форма заготовки та співвідношення її висоти до перерізу, сумарний ступінь деформації, міждеформаційні паузи тощо. В процесі кування важливими параметрами впливу додатково є кінетичний вплив інструменту на деформуєму заготовку та температурне поле. Саме від напружено-деформованого стану поковки залежить рівномірність або нерівномірність розподілу деформацій по об'єму.

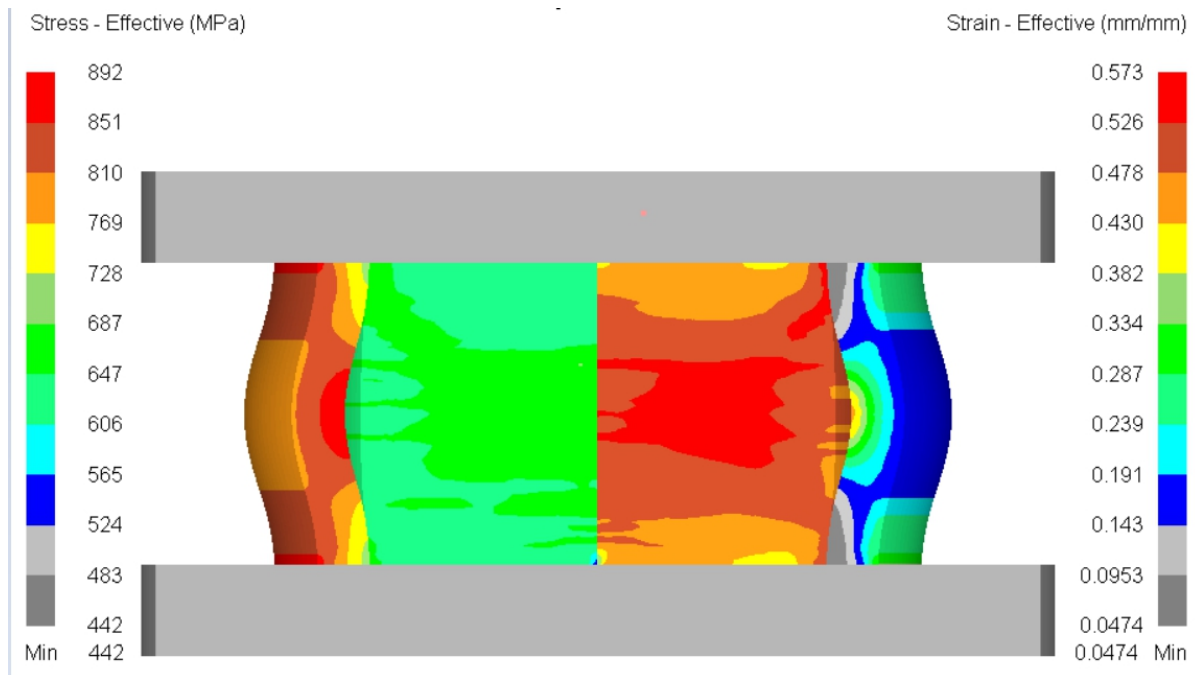


Рисунок 3.1 – Напружено-деформований стан моделі після осадження

Осадка супроводжується неоднорідною деформацією, яка викликана накопиченням областей додаткових напруг. Таким чином, в деяких місцях схеми напруженого стану з'являються розтягуючі напруження, за рахунок яких і утворюється форма бочки. Однак, завдяки застосуванню обичайки напруження не настільки високі, щоб спричинити руйнування зразка. На рисунку 3.1 спостерігаються досить високі нерівномірності в розподілі деформацій по об'єму, що призводить до утворення областей ускладненої деформації. По периферійним частинам заготовки виникають розтягуючі напруги, в той час, як найбільш рівномірний розподіл деформацій спостерігається всередині зразка.

Як бачимо на рисунку 3.2 після кування розподіл деформацій та напруг по всьому об'єму зразка є більш рівномірним, завдяки більш інтенсивній та багаторазовій деформації. Не менш важливим фактором такого розподілу став повний нагрів зразка перед куванням.

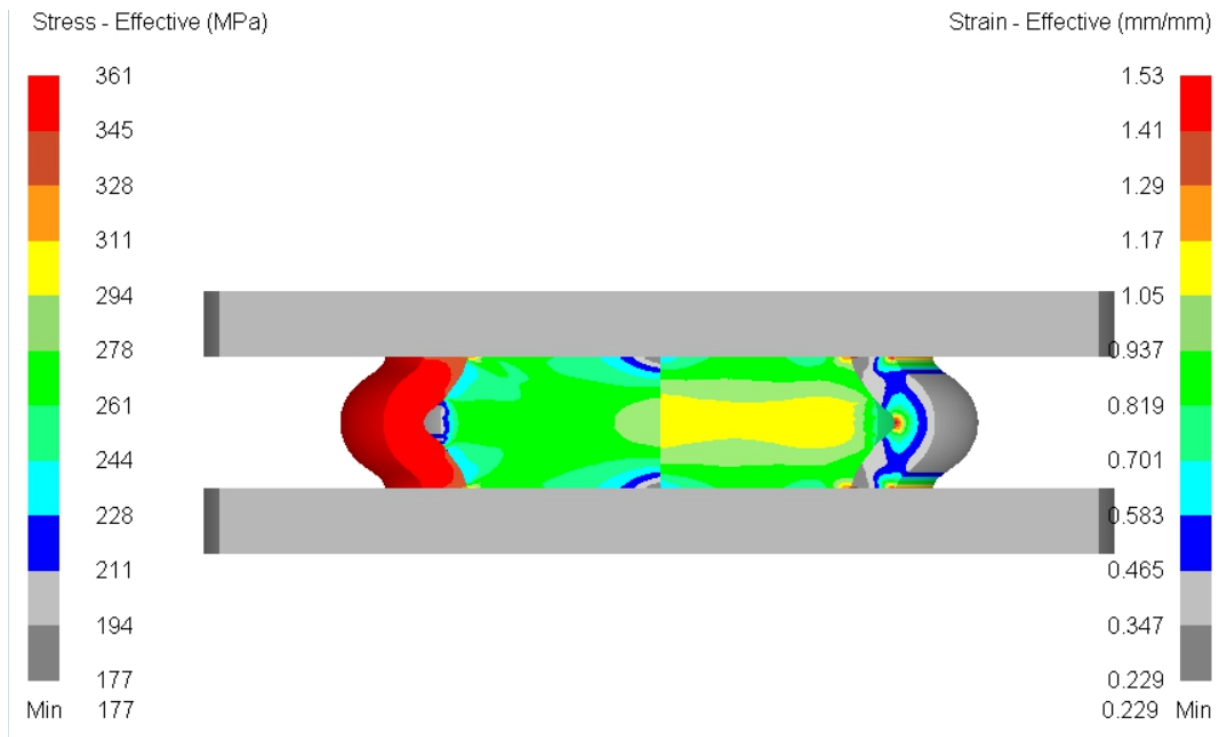


Рисунок 3.2 – Напружено-деформований стан моделі після кування

Завдяки моделюванню було встановлено, що вже після перших 3–4 ударів відбувається основне деформування зразків і більша частина пресовки досягає значення відносної щільності 98–99 %. При цьому периферійна частина зразка має відносну щільність 94–96 %. Проведення кування в системі обичайка–пресовка дозволяє регулювати ступінь радіальних деформацій без руйнування. Це пояснюється хорошою адгезією між зернами різного складу та утворенням дифузійних зв'язків в нових контактах між частинками. Забезпечується подрібнення розміру зерна за рахунок зсувних деформацій та усуваються міжчасткові пори.

Таким чином, можемо прийти до висновку, що повторне використання шламових відходів стружки ШХ–15 є економічно та технологічно доцільним. Вироби, виготовлені способами порошкової металургії, а саме куванням з попередньою обробкою, на виході мають високі міцнісні властивості, майже стовідсотковий ступінь ущільнення та достатні показники міцності. Розглянуті технологічні процеси дозволили створити дві найсприятливіші технологічні схеми для формування таких зразків (рис. 3.3, 3.4).

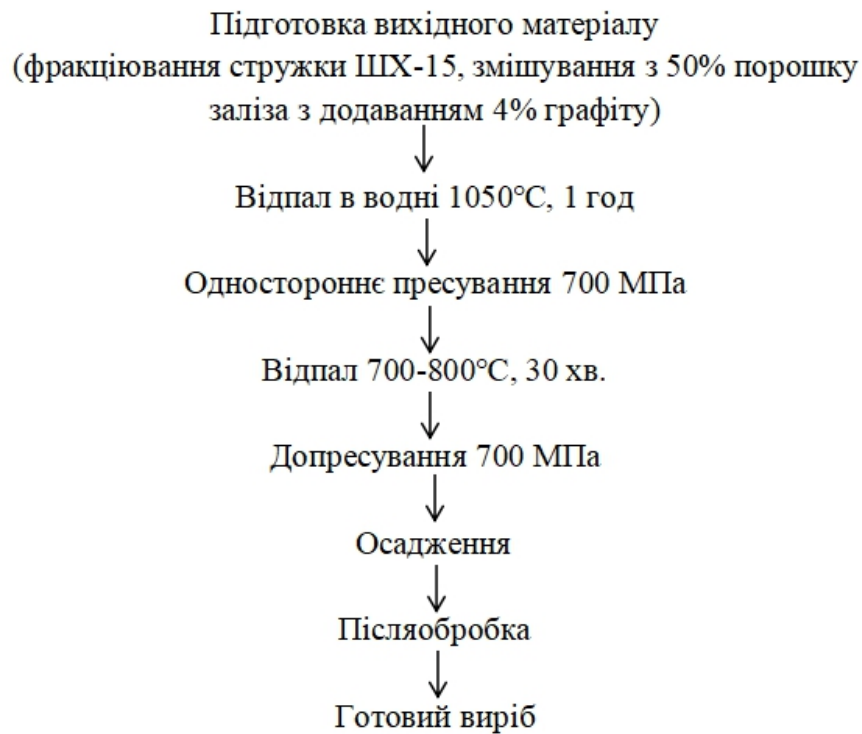


Рисунок 3.3 – Перша технологічна схема ущільнення матеріалу на основі суміші ШХ–15, залізного порошку та графіту

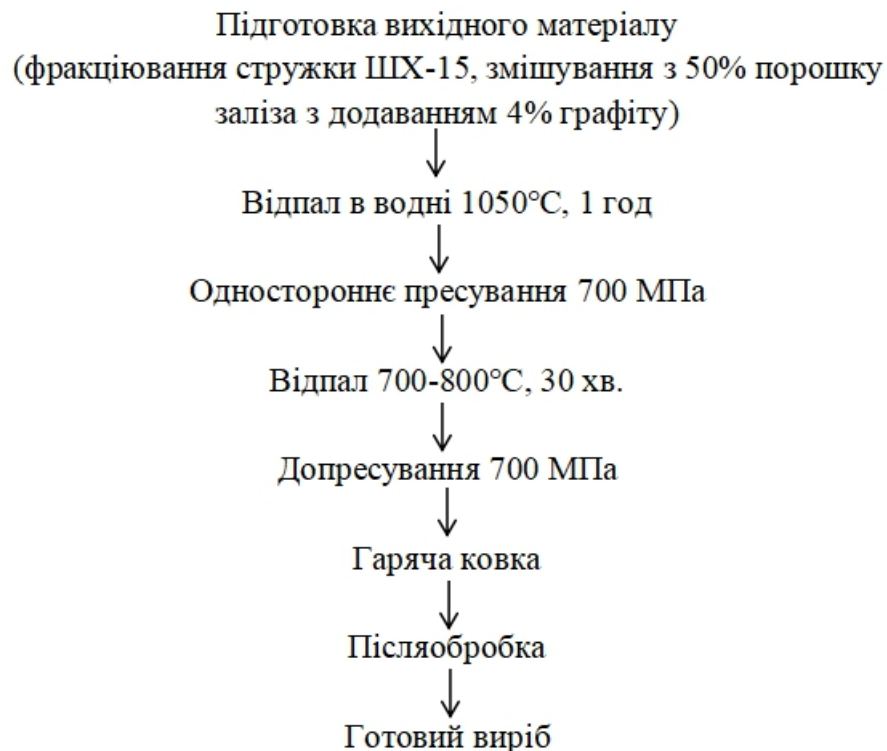


Рисунок 3.4 – Друга технологічна схема ущільнення матеріалу на основі суміші ШХ–15, залізного порошку та графіту

Вибір технологічної схеми залежить від того, які механічні властивості необхідні для майбутнього виробу а також від його геометричної форми. Незважаючи на те, що процес осадження має багато недоліків: висока нерівномірність розподілення по всьому об'єму деформацій, утворення зон ускладнених деформацій, висока ступінь бочкоутворення, анізотропія властивостей, вищий показник пористості, – його можна використовувати для виготовлення геометрично простих виробів різних габаритів, таких як пластини, плити, втулки, підшипники, корпуси. До того ж процес осадки набагато простіше в реалізації. При необхідності створення складної конфігурації з більш рівномірним розподілом щільності та більшою пластичністю виробу з меншим ступенем деформації, слід застосовувати гаряче кування. Основним недоліком обох технологічних схем є необхідність механічної післяобробки виробів, що є джерелом нових відходів.

Створені в середовищі DEFORM 2D/3D моделі забезпечують достатньо високу точність в прогнозуванні поведінки матеріалів в розглянутих процесах. Це дозволяє в подальшому спрощувати та вдосконалювати надані технологічні схеми.

Проведені експерименти та дослідження підтверджують можливість рециклінгу металургійних відходів з відтворенням високих механічних властивостей готових виробів. В подальшому можна покращувати обрані технологічні схеми, підбираючи більш оптимальні технологічні параметри пресування, спікання, кування та осадження, або змінюючи вихідний склад суміші, додаючи до неї легуючі елементи.

4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Обов'язковою умовою роботи на будь-якому виробництві є забезпечення безпечної та комфортної (наскільки це можливо) роботи працівників. Для цього необхідно передбачати всі чинники, які впливають на самопочуття людини: травмонебезпечність приладдя, наявність шкідливих домішок, освітлення, вологість, температуру тощо. Охорона праці – це структурована система заходів, яка, враховуючи всі ці чинники, створює норми, які дозволяють забезпечити працівникам збереження здоров'я, працездатності, а головне – життя.

Перед початком проведення досліджень або виконання технологічних операцій на підприємстві, слід перевірити, наскільки існуючі умови відповідають нормам безпеки. Задля цього необхідно врахувати всі параметри, починаючи з розміру приміщення, закінчуючи розрахунком робочого місця. В разі наявності шкідливих чинників, які неможливо усунути, потрібно дослідити степінь небезпеки для здоров'я людини та ввести необхідне оснащення та лікувально-профілактичні заходи задля зменшення негативного впливу.

В даному розділі описуються правові та організаційні питання та аналізуються параметри науково-дослідної лабораторії, в якій виконувалася основна частина дослідницької роботи: освітленість, електробезпека, рівень шуму, якість повітря, пожежна безпека. Був створений план лабораторії, в якій проводилася більшість технологічних операцій. Основною метою даного розділу є виявлення шкідливих та небезпечних факторів, які виникають при реалізації методу гарячого вільного кування та розробка заходів для часткового або повного їх негативного впливу на здоров'я людини. Більшість роботи проводилася в лабораторії 022, де виготовлялися, відпалювалися, осаджувалися та кувалися зразки.

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників при виконанні роботи

Зважаючи, на вимоги, висунуті до будівель виробничого призначення, що перелічені в ДБН В.2.2-28:2010 [56], об'єм та площа робочого приміщення повинна відповідно становити 15 м³ та 4,5 м² на одного працівника, висота повинна бути від 3,2 метрів. Під час виконання роботи в лабораторії працювало 4 людини, тоді, спираючись на дані в таблиці 4.1, об'єм на одну людину становить 60,75 м³, а площа – 13,5 м².

Таблиця 4.1 – Геометричні параметри лабораторії

Геометричний параметр	Величина
Довжина, м	9
Ширина, м	6
Висота, м	4,5
Площа, м ²	54
Об'єм, м ³	243

Порівнюючи отримані значення з нормативними вимогами [56], можна прийти до висновку, що геометричні параметри науково-дослідної лабораторії, в якій проводився експеримент, повністю відповідають нормі.

4.1.1 Визначення шкідливості впливу суміші, яка піддається пресуванню

В якості вихідного матеріалу використовувалася сталева стружка ШХ–15, порошок заліза та порошок графіту. Під час очищення стружки від МОР (мастильно охолоджуючі речовини) та відпалу, а також при контакті

заліза та його з'єднань з людиною, виникає небезпека для верхніх дихальних шляхів, що викликає пневмокопотичні зміни в організмі. При довготривалому та частому контакті з повітрям, що містить подібні речовини, в працівників можуть розвиватися порушення нервової системи (астено-вегетативний синдром) та вегето-судинна дистонія. Спостерігаються випадки тканинного ураження печінки, хвороби шлунково-кишкового тракту, моноцитоз та анемія. Натомість, зважаючи на відсутність в використовуваній суміші вільного діоксиду кремнію, можна стверджувати про її нефіброгенність.

4.2 Загальний перелік чинників, які необхідно дослідити

Відповідно до системи стандартів безпеки праці [57], можна виділити такі загальні фактори, які мають найбільший вплив на здоров'я та працездатність працівників:

- фізичні навантаження: незначне, середнє, сильне та дуже сильне;
- нервові навантаження: незначне, середнє, підвищене;
- монотонність: незначна, середня, підвищена;
- робоче положення: незручне, обмежене, незручно-стиснене, дуже зручне;
- ступінь забруднення повітря: незначний, середній, підвищений, сильний, дуже сильний;
- вологість, температура та теплове випромінювання: незначні, підвищені (знижені), середні, високі, дуже високі;
- освітленість робочого місця: недостатня, нормальна, осліплююча;
- рівень шуму: помірний, підвищений, сильний;
- вібрація, поштовхи, обертання: підвищені, сильні, дуже сильні.

Задля запобігання травматизації, необхідно з'ясувати найбільш небезпечні фактори на певному конкретному виробництві та чітко дотримуватися норм безпеки.

Таблиця 4.2 – Загальні шкідливі та небезпечні фактори

Види процесів	Шкідливі виробничі фактори										Небезпечні виробничі фактори			
	Шкідливі речовини	Випромінювання в оптичному діапазоні			Електромагнітні поля	Магнітні поля	Вібрація	Шум	Запилення	Статичне навантаження на руку	Електричний струм	Іскри, бризки та викиди розплавленого металу	Механізми і вироби, що рухаються	Системи, які знаходяться під тиском
		Ультрафіолетове	Видиме	Інфрачервоне										
Змішування	x	-	-	-	-	-	x	x	x	-	-	-	x	-
Пресування	-	-	-	-	-	-	xx	xx	-	x	-	-	xx	x
Відпал	x	-	-	x	x	-	-	-	x	-	xx	-	-	-
Осадження	-	-	-	-	-	-	xx	-	-	-	-	-	x	xx
Кування	-	-	-	-	-	-	xx	xx	-	-	x	-	xx	xx
Моделювання	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примітки: xx — інтенсивний фактор; x — помірний фактор; (-) — незначний фактор/відсутність.

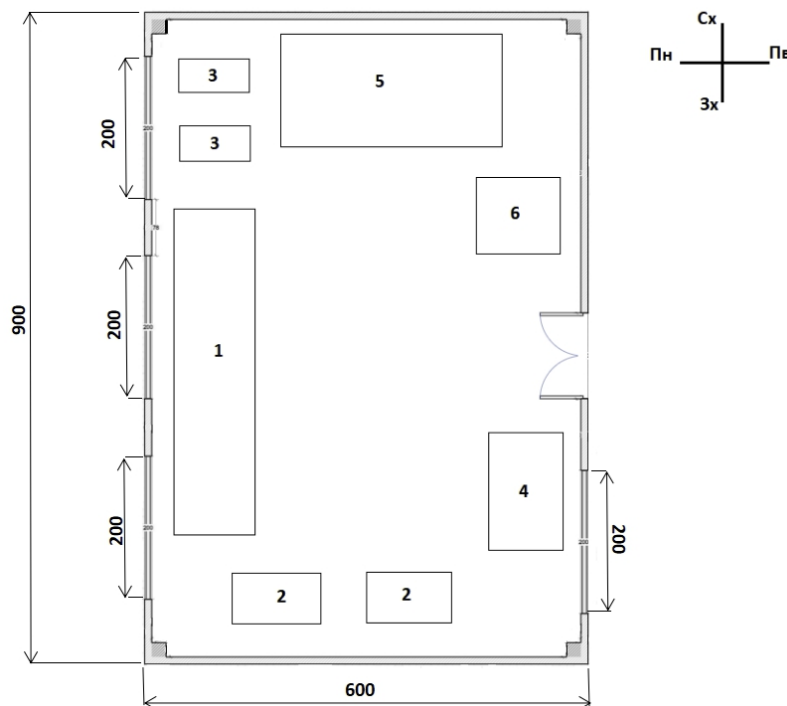
Таблиця 4.3 – Основні шкідливі та небезпечні фактори дослідницької роботи

Назва операції	Приладдя	Потенційні небезпеки
Пресування, осадка	Гідравлічний прес	Травматизм, вібрація
Відпал	Камерна електронна піч	Ураження електричним струмом
Гаряче кування	Пневматичний молот	Травматизм, шум, електричний струм

Згідно з таблицею 4.3 основними факторами небезпеки в даній дослідній роботі є можливість отримання травм та ураження електричними струмом, а також шум та вібрація.

Задля зменшення ризику травматизації працівники повинні бути проінструктовані, обладнання повинно бути перевірено на наявність пошкоджених елементів, необхідно уникати контакту з рухомими частинами пресів та молоту та частинами, що знаходяться під тиском.

Одним з головних способів зниження небезпеки для здоров'я є раціональне, послідовне розташування використовуваних установок та допоміжного обладнання, правильна організація робочого місця. Зважаючи на розміри, технологічні умови та вимоги до техніки безпеки, створюється план розташування устаткування в лабораторії. Послідовність розташування обладнання повинно бути логічним та комфортним для послідовного виконання обраної технологічної схеми.



1 – робочий стіл; 2 – гідравлічні преси ПГ–50; 3 – камерні печі;
4 – гідравлічний прес ЗИМ 10Т; 5 – пневматичний молот; 6 – змішувач

Рисунок 4.1 – План розташування устаткування в лабораторії

Марки та основні характеристики обладнання та оснащення, схематично зображеного на рисунку 4.1, представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристики обладнання та оснащення лабораторії

№ п/п	Назва	Розміри, мм	Основні характеристики	К-ть	Позначення на плані
1	Гідравлічний прес ПГ–50	2300x1580x1800	Макс. тиск 500 кН; Макс. хід поршня 180 мм; Вага 5 т	2	2
2	Гідравлічний лабораторний прес ЗИМ 10Т	880x650x1530	Макс. навантаж. 100 кН; Макс. швидк. переміщ. поршня 48 мм/хв; Макс. хід поршня 50 мм; Вага 450 кг	1	4
3	Камерна електрична піч СНОЛ–11	300x500x300	Макс. робоча темп. 1100 °С; Потужність 9кВт	2	3
4	Пневматичний молот МА 4129	1566x790x2160	Мін. енергія удару 1,55 кДж; Частота ударів 220 уд/хв; Номінальна маса падаючих частин 75 кг; Потужність двигуна 5,5 кВт; Вага 3100 кг	1	5

4.2.1 Мікроклімат

Оскільки технологічні операції не пов'язані з переміщенням важких предметів, більшу частину дослідницької роботи працівник знаходиться в вільному положенні сидячи або стоячи. Дослідження, проведені в лабораторії 022, потребують незначного фізичного навантаження та відносять до

категорії середньої важкості Па. Енерговитрати організму знаходяться в діапазоні 150–200 ккал/год.

Показники відносної вологості, температури та швидкості руху повітря відповідають нормативним вимогам для категорії середньої важкості Па, як для холодної, так і для теплої пори року. Результати викладені в таблиці 4. 5.

Таблиця 4.5 – Параметри мікроклімату

Категорія	Параметр	Період року	Нормовані значення за ДСН 3.3.6.042-99		Дані вимірювань	Результат
			Оптимальні	Допустимі		
Середньої важкості	Температура, °С	Холодний	19–21	17–23	18	Допустимий
		Теплий	21–23	18–27	22	Оптимальний
	Відносна вологість повітря, %	Холодний	40–60	75	71	Допустимий
		Теплий	40–60	65	54	Оптимальний
	Швидкість руху повітря, м/с	Холодний	0,2	≤ 0,3	0,2	Оптимальний
		Теплий	0,3	0,2–0,4	0,3	Допустимий

Параметри мікроклімату варіюються від оптимальних до допустимих значень, відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [58]. Мікроклімат регулюється за допомогою системи опалення взимку, та вентиляційної системи влітку.

При роботі були виявлені небезпечні та шкідливі фактори, що негативно впливають на мікроклімат. А саме: запиленість повітря та наявність в ньому шкідливих речовин, наявність вібраційного та шумового впливу, теплового та інфрачервоного випромінювання, небезпека ураження електричним струмом.

4.2.2 Параметри освітлення

Лабораторії 022, в якій проводилися дослідницькі роботи, відповідає IV розряд, в підрозряд зорової роботи – середня точність. За умов загального штучного освітлення нормованим значенням є 200 лк, яке задовольняє реальні показники в 207,07 лк. Його джерелом є 10 світильників, розташовані в 2 ряди (по 5 світильників в кожному) з лампами ЛД–40. В результаті маємо загальне рівномірне освітлення всього приміщення.

В разі застосування бокового природного освітлення, табличне значення КПО становить 1,5 %, а коефіцієнт світлового клімату 0,85 відповідно до ДБН-В.2.5-28-2006 [59]. Оскільки роботи, проведені в даній лабораторії не потребують високої точності зорової роботи, отримані значення є задовільними, оскільки допустиме можливе відхилення становить 10 %. Працівники не перенапружують зір та здатні роздивитися дрібні деталі без застосування додаткового освітлення.

4.2.3 Рівень шуму та вібрації

Приладами, що створюють шум та звукові коливання є гідравлічні преси, молот для кування, електроустаткування та камерні печі. За звичайних умов протягом дня середній рівень шуму становить 5 дБА та менше, в той час як нормованим показником є значення до 60 дБА. Але при активній одночасній роботі всього обладнання в лабораторії 022, рівень шуму може перевищувати норми, допустимі за ДСН 3.3.6.037-99 [60]. В такому разі при тривалій роботі за таких умов в працівників може виникати головний біль, втома, підвищується нервовість. При регулярній дії такого рівня шуму виникають хронічні проблеми зі слухом та мігрені.

В даній роботі основним джерелом вібрацій є молот для кування. Якщо людина буде часто піддаватися вібраційному впливу, її чекають порушення функціонального та фізіологічного стану. За нормативними даними ДСН

3.3.6.039-99 [61] допустима тривалість знаходження в середовищі вібраційного впливу становить не більше 2 годин.

Задля зменшення впливу шуму та вібрації можна застосовувати звуко- та віброізоляцію та глушники шуму. При посиленому рівні шуму та вібрації додатково застосовуються індивідуальні засоби захисту, як, наприклад, беруші. Для віброізоляції можна застосовувати віброізолюючі опори та резинові прокладки під устаткування.

Оскільки в умовах проведення досліджень для цієї дипломної роботи застосування всього устаткування одночасно не вимагалось, рівень шуму та вібрації є недовготривалим та незначним. Тому його впливом на здоров'я можна не враховувати.

4.2.4 Електробезпека

Оскільки в повітрі лабораторії 022 розпилені дрібні частинки металічних порошків, що проводять струм, приміщення належить до категорії з підвищеною небезпекою електротравмування. В ній використовується струм стандартною напругою 220 В для живлення камерних печей, сушильної шафи та шліфувального верстату. Найбільш небезпечна частота становить 60 Гц, допустима напруга роботи електроустановок складає 2–3 В для змінного струму та 8 В для постійного. Оскільки відносна вологість становить 75 %, а підлога складається зі струмопровідних матеріалів (бетона, цегли, металу) підвищується можливість отримати електричний опік.

Найбільш розповсюдженими причинами ураження електричним струмом є пошкоджені розетки, ізоляція або заземлення, а також необережність користувачів установки. Для захисту лабораторії від нещасних випадків встановлені ізольовані корпуси приладів, реле та ізольовані відкриті ділянки дротів.

Для запобігання ураження током необхідно проводити регулярну перевірку електросистеми та окремих приладів на наявність пошкоджень, забезпечити всі електроустановки засобами орієнтації, а всіх користувачів засобами особистого захисту, в ролі яких можуть виступати гумові рукавиці.

4.2.5 Пожежна безпека

Лабораторія 022–9 відноситься до пожежі класу А (горіння твердих речовин). За вибухонебезпечністю приміщення належить до категорії Г, так як в ньому знаходяться негорючі матеріали в високотемпературному або, навіть, розплавленому стані, в результаті якого може бути активне виділення горючих газів, іскор та бризків металу. За ДБН В.1.1-7-2002 [62] будівля відноситься до I ступеня вогнетривкості.

Головними причинами виникнення пожежі в науково-дослідній лабораторії можуть стати несправності електроприладів, коротке замикання, пошкодженість проводки, перенавантаження електроустаткування, збій в системі водяного охолодження та порушення правил пожежної безпеки.

Для вирішення подібних проблем місце проведення дослідів повинно бути забезпечено потужною вентиляційною системою та пожежною сигналізацією. Для безпечної евакуації людей в разі виникнення займання, в лабораторії повинна бути розташована план-схема евакуації, яка представлена на рисунку 4.2 та вогнегасник ОУ–2.

Через наявність приладів, які працюють в постійному режимі, необхідно забезпечити регулярний нагляд за лабораторією відповідальними особами. Для лабораторії 002 такою особою є Святий Олег Васильович. Перед тим, як покинути лабораторію необхідно знеструмити всі електроустановки, які можливо, та ретельно оглянути приміщення.

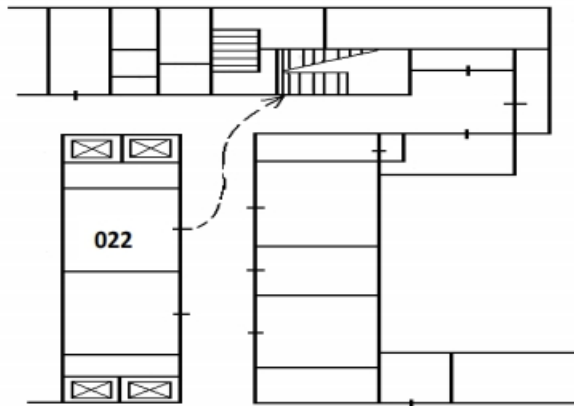


Рисунок 4.2 – План-схема евакуації

Дана лабораторія оснащена на достатньому рівні. В наявності є 4 пожежні сигналізатори ИП–105, які спрацьовують при підвищенні температури до 72 °С. В коридорі встановлений пожежний кран з пожежним рукавом для своєчасного подолання вогню.

4.2.6 Аналіз виробничого випромінювання

В лабораторії знаходяться джерела електромагнітного та інфрачервоного випромінювання (сушильні шафи та камерні печі для спікання). Але вони або взагалі не приймають участь в проведенні експерименту, або їх використання є мінімальним з застосуванням додаткового екранування. Тобто їх дію на здоров'я можна не враховувати.

Загалом, допустимий час проведення людини в полі інфрачервоного випромінювання складає 7–12 хв. При довшому знаходженні людини біля джерела, в неї може з'явитися зниження концентрації, головний біль та, навіть, виникнути тепловий удар. В разі необхідності захисту від теплового випромінювання джерела екранують теплоізоляційним матеріалом, а працівники використовують засоби індивідуального захисту: захисні костюми, окуляри та спеціальні металеві щипці для завантаження та вивантаження досліджуваних зразків. Допустиме значення густини світлового потоку ІЧВ за ДСН 3.3.6.042-99 [58] становить 140 Вт/м².

4.2.7 Висновки до розділу

Внаслідок проведеного аналізу науково-дослідної лабораторії 022–9, було виявлено, що мікроклімат відповідає санітарним нормам. Освітленість приміщення знаходиться на достатньому для проведення даних досліджень рівні. Показники небезпечних та шкідливих чинників, що представлені шумом, вібрацією та травматичністю не перевищують допустимих значень. З точки зору електробезпеки лабораторія є достатньо небезпечним місцем в разі недотримання правил безпеки або несправності приладдя. Приміщення обладнане всіма необхідними засобами для вчасного запобігання пожежі.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність НДР

Будь-яке виробництво по переробці металів є джерелом утворення великої кількості металургійних відходів в вигляді шламів, окалини, стружки тощо. Існує багато методів порошкової металургії, які дозволяють їх утилізувати. Але загалом вони є дуже витрато- та енергоємними як, наприклад, гаряче ізостатичне та динамічне пресування. Одним із найпоширеніших видів відходів є стружка від шліфувальних та різальних станків, яка складається з суміші самого оброблюваного матеріалу та домішок абразиву, мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) та технічних масел. Такий шлам потребує ретельної підготовки перед його вторинним використанням, до того ж, на його якість сильно впливає час та умови збереження. Найбільш поширеними шліфувальними відходами є стружка сталей ШХ–9, ШХ–15 та ШХ–15СГ. Оскільки технології їх переробки на даний час є ще недостатньо вивченими або дають недостатньої якісний результат, їх неможливо впроваджувати на реальні виробництва.

Метою цієї дипломної роботи стало дослідження способів компактування суміші на основі відходної стружки ШХ–15, задля зменшення кількості шламовалищ та покращення екологічного та економічного стану України. Використання вторинної сировини є одним з найдосліджуваніших напрямів у всьому світі. Разом з високою вартістю, не меншою проблемою є якість отриманих виробів, яка дуже часто є недостатньою для успішного використання деталей, вироблених таким чином.

Задля пошуку перспективної технологічної схеми був проведений аналіз існуючих методів порошкової металургії, які дозволяють отримувати вироби високої щільності. Було виявлено, що застосування гарячого кування з попередньою обробкою в вигляді пресування та допресування дозволяє отримати зразки з високими показниками твердості, міцності та якісною

мікроструктурою. В результаті були отримані зразки зі значенням твердості близько 87–90 HRB, границею міцності на стиск 1300–1482 МПа та пластичністю 25–30%. При цьому, витрати на виробництво будуть набагато меншими через універсальність застосовуваного обладнання. Таким чином, розроблена технологічна схема може бути корисна на виробництві. До того ж, існує багато способів її вдосконалення та прогнозування за допомогою програм, заснованих на методі скінчених елементів (МСЕ).

5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок витрат на проведення НДР дозволяє оцінити доцільність проведених досліджень в економічному напрямку та спланувати оптимальне використання матеріальних, енергетичних та людських ресурсів під час проведення дослідів. Розрахунок витрат відбувається за такими основними статтями:

- витрати на оплату роботи працівників;
- відрахування на соціальні заходи;
- вартість матеріалів, що використовувались для дослідження;
- вартість устаткування, необхідного для проведення роботи;
- витрати на використання комп'ютерної техніки та програмного забезпечення;
- накладні витрати;
- інші витрати.

5.2.1 Витрати на оплату праці

Розраховані витрати, необхідні для виконання даної дипломної роботи, включають в себе заробітну плату виконавців на основі трудомісткості окремих процесів, враховуючи посади працівників. Розрахунок проводиться в одиницях людино-днів. Результати представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок трудомісткості проведених досліджень

Етапи НДР	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів			
	Доцент	Інженер-технолог	Інженер-дослідник	Лаборант
1	2	3	4	5
Підготовчий	5	4	2	–
Експериментальний	14	25	29	31
Написання записки	5	3	5	–
Оформлення роботи, захист	4	3	5	–
Разом	28	35	41	31

Денна заробітна плата розраховувалася за допомогою відношення місячного окладу працівника до умовного місця роботи. Розрахунки проводилися без врахування бонусів та додаткових витрат на прибуток, основується на даних трудомісткості, розрахованих в таблиці 5.1. Дані щодо місячного окладу були взяті з оновленого штатного розкладу КПІ за програмою 2201160, дійсного з 1 січня 2021 року. НДР проводилося за п'ятиденним робочим тижнем, відповідно, середня кількість робочих днів на місяць становить 21,2 дні. Для розрахунку заробітної плати працівників середньоденна зарплата множилася на трудомісткість відповідного учасника НДР. Результати розрахунків наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на заробітну плату

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Доцент	28	18 262	861,415	24 119,62
Інженер-технолог	35	9 718	458,4	16 044
Інженер-дослідник	41	7 730	364,62	14 949,53
Лаборант	31	6 249	294,76	9 137,56
Разом оплата праці з теми				64 250,71

5.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок вираховується в відсотках від загальної суми зарплати працівників і становить 22 %. Базою для його нарахування є підсумкова сума оплати всіх працівників, що працювали над дипломним проектом.

$$ЄСВ = 64\,250,71 \cdot 0,22 = 14\,135,16 \text{ грн.}$$

5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення дослідження

Для розрахунку витрат на матеріали, що використовувалися при проведенні дослідження, ціна на одиницю товару помножується на використану кількість одиниць. Результати розрахунків зведені в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1. Порошок заліза ПЖРВ	ГОСТ 9849-86	кг	1	60,00	60,00
2. Порошок графіту ГС –4	ГОСТ 4960-2009	кг	0,1	15,00	1,5
Загальні витрати на матеріали					61,5

Транспортно заготівельні витрати становлять 10 % від планової вартості використаних матеріалів, в такому разі загалі витрати складають:

$$V_m = 61,5 \cdot 1,1 = 67,65 \text{ грн}$$

5.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Оскільки тема дослідження не була пов'язана з процесами плавки, високої хіміко-термічної та термічної обробки та нанесенням покриттів на досліджувані зразки, всі енерговитрати будуть включені в плановий кошторис до накладних витрат.

5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Дипломна робота не передбачала оренду спеціального обладнання, бо всі дослідження проводилися на вже придбаних приладах та установках.

5.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

Всі випробування та дослідження проводились на вже придбаних установках КПП, тому витрати на послуг сторонніх організацій відсутні.

5.2.7 Витрати на службові відрядження

Під час виконання дослідної роботи не відбувалося жодних відряджень, тому даний вид витрат також відсутній.

5.2.8 Інші прямі невраховані витрати

Всі витрати, які не увійшли до попередніх пунктів, складають приблизно 10% від усієї суми, що була витрачена на проведення дослідницької роботи і становить:

$$I_B = (64\,250,71 + 14\,135,16 + 67,65) \cdot 0,1 = 7\,845,35 \text{ грн.}$$

5.2.9 Накладні витрати

Накладні витрати включають в себе заробітну плату господарського, обслуговуючого та управлінського персоналу з єдиним соціальним внеском; кошти, витрачені на придбання спеціальних установок та приладів та утримання виробничих площ з їх устаткуванням; витрати на охорону праці та техніку безпеки, на винахідництво, на оплату послуг банків, збори та податки.

Сума накладних витрат складає 20% від суми всіх прямих витрат:

$$H_B = (64\,250,71 + 14\,135,16 + 67,65 + 7\,845,35) \cdot 0,2 = 17\,259,77 \text{ грн.}$$

5.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Усі витрати, які були витрачені під час виконання науково-дослідницької роботи, занесені до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1. Витрати на оплату праці	64 250,71	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	14 135,16	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	67,65	Відповідно до розрахунків
4. Енергоносії для проведення досліджень	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	–	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7. Витрати на службові відрядження	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	7 845,35	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	17 259,77	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10. Усього витрат по темі	103 558,644	Сума попередніх статей

5.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для того, щоб зрозуміти, чи доцільно проводити дане наукове дослідження, на основі бальної системи оцінювання розраховується очікуваний економічний ефект НДР.

Маємо наступні параметри оцінювання економічної ефективності:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів та для даної дослідницької роботи становить:

$$B = 3 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 7 = 504$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень	7

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{НДР}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot B_{НДР}, \quad (5.1)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{НДР}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 5.4);

$$E_{НДР} = 500 \cdot 504 - 0,2 \cdot 103\,558,644 = 231\,288,27 \text{ грн}$$

Для визначення економічної ефективності треба вирахувати відношення умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання. Ця величина називається коефіцієнтом умовної економічної ефективності та в даному випадку становить:

$$E_e = \frac{231\,288,27}{103\,558,644} = 2,23 \quad (5.2)$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності становить , що більше 1.
Таким чином, виконання даної науково-дослідницької роботи є доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз літературних джерел показав, що перспективними та економічно вигідними методами компактування високощільних виробів на основі відходів стружки ШХ–15 є метод вільної осадки та вільної гарячої ковки.

2. Проведені експериментальні дослідження процесів ущільнення показали, що різні методи попередньої обробки перед гарячою вільною торцевою ковкою не мають вагомого впливу на кінцеві властивості та структуру матеріалу.

3. Виявлена необхідність застосування обмеження радіальної деформації під час проведення осадки та ковки (сталева трубчаста обичайка) задля зменшення зміни геометричних розмірів та підвищення ущільнюваності.

4. За допомогою середовища DEFORM 2D/3D було проведено моделювання процесів деформації матеріалу на основі відходів стружки ШХ–15 під час допресування, вільної осадки та гарячого торцевого кування. Досліджено розподіл щільності по об'єму моделі, швидкості деформацій, напружено-деформований стан та схильність зразка до руйнування.

5. Досліджена структура та механічні властивості отриманих зразків. Встановлено, що гаряче кування дозволяє отримати зразки з твердістю 87–90 HRB, 16–20 HRC, границею міцності на стиск 1308–1482 МПа та пластичністю від 10 до 25 %.

6. Виявлено дві найдоцільніші технологічні схеми, які дали найкращий результат в ході проведення дослідів.

7. Встановлено небезпечні та шкідливі чинники впливу на працівників та розроблено заходи безпеки.

8. Проведено економічно-організаційну роботу, розраховано витрати на проведення НДР та науково-технічну ефективність.

CONCLUSION

1. The analysis of literary sources has shown that promising and cost-effective methods of compacting high-density products based on waste shaving of IIX–15 chips are methods of free settling and free hot forging.
2. Experimental studies of compaction processes have shown that different methods of pretreatment before hot face forging have no significant effect on the final properties and structure of the material.
3. The necessity of using the restriction of radial deformation during free settling and forging (steel tubular shell) to reduce changes in geometric dimensions and increase compaction has been revealed.
4. DEFORM 2D/3D program was used to simulate material deformation processes based on waste IIX–15 chips during prepressing, free settling and hot end forging. The density distribution over the model volume and the tendency of the sample to fracture were investigated.
5. The structure and mechanical properties of the obtained samples have been investigated. It is established that hot forging makes it possible to obtain specimens with hardness 87–90 HRB, 16–20 HRC, crush strength limit 1308–1482 MPa and ductility from 10 to 25 %.
6. The two most expedient technological schemes, which gave the best result in the course of the experiments, are revealed.
7. The most dangerous and harmful factors of influence on workers are established and safety measures are developed.
8. Conducted economic-organizational work, calculated the costs of SDW and scientific and technical efficiency.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Демидик В. Н. Устойчивое развитие и рециклинг отходов черной металлургии [Текст] / В. Н. Демидик // Металл и литье Украины. — 2014. — №8. — С. 36—40.
2. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов [Текст] / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин. — Москва : Машиностроение, 1989 — 640 с.
3. Гальчук Т. Н. Рациональное использование сырья и переработка промышленных отходов [Текст] / Т. Н. Гальчук, Т. Е. Божко // World Science. — 2018. — №3(31). — С. 26—30.
4. Кокорин В. Н. Процессы переработки металлосодержащих отходов производств черной металлургии и прокатки стального листа с использованием процесса ОМД [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Кокорин, Е. М. Булыжев, Е. П. Терешено — Ульяновск : УлГТУ, 2011. — 64 с.
5. Промышленный рециклинг техногенных отходов [Текст]: учеб. пособие / В. Н. Кокорин, А. А. Григорьев, М. В. Кокорин, О. В. Чамаева. — Ульяновск : УлГТУ, 2005. — 42 с.
6. Степанчук А. М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів [Текст] : навч. посіб. / А. М. Степанчук. — Київ : ЗАО “ВІПОЛ”, 2016. — 320 с.
7. Брикетирование металлургического сырья, актуальность и пути развития метода [Текст] / Б. Н. Маймур, А. Ю. Худяков, В. И. Петренко [и др.] // Черная металлургия. — 2016. — № 1. — С. 74—81.
8. Сурженко А. М. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокомпонентних брикетів [Текст] / А. М. Сурженко // Вісті Донецького гірничого інституту. — 2014. — № 1 (34)—2(35). — С. 28—34.
9. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук [Текст] : підручник / А. М. Степанчук. — Київ : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2006. — 410 с.
10. Злотников Е. Г. Современные технологии переработки и брикетирования металлической стружки в автоматизированных производствах [Текст] / Е. Г. Злотников, В. В. Максаров // Записки Горного института. — 2014. — Т. 209. — С. 37—41.
11. Дьякон О. М. Получение металлургических брикетов на основе стружко-порошковых композиций горячим прессованием [Текст] / О. М. Дьякон // Литье и металлургия. — 2011. — № 4(63). — С. 129—137.

12. Мухтар Ж. М. Технология брикетирования металлургических материалов [Текст] / Ж. М. Мухтар // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, 23—25 ноября, 2017 г., г. Юрга : сборник трудов конференции. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — С. 116—118.

13. Пат. 76634 Україна, МПК С22В 1/243, С22В 1/248, В30В 9/32. Спосіб брикетування металевої стружки [Електронний ресурс] / В. Н. Пенза, А. М. Гагасов, О. М. Дьяконов, Є. С. Амелянчик ; Открытое акционерное общество «Минский подшипниковый завод». — №20041210636 ; заявл. 23.12.2004 ; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8. — 2 с. — Режим доступа: <https://uapatents.com/2-76634-sposib-briketuvannya-metalevo-struzhki.html>. — Назва з екрану. — Дата перегляду : 15.04.21.

14. Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови [Текст] : ДСТУ 4121—2002. — Чинний з 2003-01-01. — Київ : Держспоживстандарт України, 2003. — 33 с.

15. Переработка стружки черных металлов [Текст] / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, Т. М. Заяц, О. М. Валицкая / Литейное производство. — 2017. — № 4(89). — С. 94—101.

16. Новицкий Н. А. Разработка технологических рекомендаций производства брикетированного шихтового материала из техногенного сырья и исследование физико-механических свойств окалиноуглеродных брикетов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.07 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов» [Электронный ресурс] / Новицкий Никита Александрович. — Москва, 2017. — 31 с. — Режим доступа: https://misis.ru/files/5535/Novickiy_AR.pdf. — Название с экрана. — Дата просмотра: 15.04.21.

17. Гоник И. Л. Метод холодного брикетирования — современный способ рециклинга металлургических отходов [Текст] / И. Л. Гоник, Н. А. Новицкая, А. В. Соловьев // Чёрная металлургия: бюллетень науч.-техн. и экон. информации. — 2012. — № 12. — С. 1—6.

18. Самсонов Г. В. Горячее прессование [Текст] / Г. В. Самсонов, М. С. Ковальченко. — Киев : Гостехиздат УССР, 1963. — 391 с.

19. Mackenzie J. K. A Phenomenological Theory of Sintering [Text] / J. K. Mackenzie, R. Shuttleworth // Proceeding of the Physical Society. — 1949. — Vol. 62, Issue 12. — P. 385—391.

20. Сергієнко О. С. Вплив гарячого ізостатичного пресування на структуру та механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів [Текст] /

О. С. Сергієнко, Г. А. Бялік // *Металл и литье Украины*. — 2011. — №2(213). — С. 5—7.

21. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии. Том 2: Формование и спекание [Текст] / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. — Москва : МИСИС, 2002. — 318 с.

22. Мельников О. Ю. Розробка методу знаходження раціональних параметрів гарячого ізостатичного пресування нових порошкових матеріалів на основі комп'ютерного моделювання процесу ущільнення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» [Електронний ресурс] / Мельников Олександр Юрійович. — Краматорськ, 2002. — 23 с. — Режим доступу: <http://referatu.net.ua/referats/7569/146578>. — Назва з екрану. — Дата перегляду: 10.04.21.

23. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование в металлокерамике [Текст] / Ю. Г. Дорофеев. — Москва : Металлургия, 1972. — 176 с.

24. Основы металлургии : в 2 т. [Текст] / Н. С. Грейвер, Д. Н. Клушин Д, И. А. Стригин, А. В. Троицкий. — Т. 1. — Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961. — 773 с.

25. Liming T. Effects of Temperature and Prassure of Hot Isostatic Pressing on the Grain Structure of Powder Metallurgy Superalloy [Text] / Liming Tan, Guoai He, Feng Liu, Yunping Li and Liang Jiang // *Materials*. — 2018. — № 11. — P. 328—338.

26. Нгуен Ныы Дам. Создание технологии получения порошковой стали марки 60X2H при использовании выпускаемых в Российской Федерации железных порошков : дис. ...канд. техн. наук : 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы» [Электронный ресурс] / Нгуен Ныы Дам. — Москва, 2020 — 119 с. — Режим доступа: https://misis.ru/files/15350/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%94%D0%B0%D0%BC.pdf. — Название с экрана. — Дата просмотра: 10.04.21.

27. Vocanegra-Bernal M. H. Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics [Text] / Vocanegra-Bernal M. H. // *Journal of Materials Science*. — 2004. — №39. — P. 6399 — 6420.

28. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок [Текст] / Ю. Г. Дорофеев. — Москва : «Металлургия», 1977. — 216 с.

29. Effect of Hot Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of Bulk Nanocrystalline Fe₃Al Materials Containing Manganese Element [Text] / Yu-feng Li, Pei-qing La, Yu-peng Wei [and etc.] // Journal of Iron and Steel Research. — 2011. — Vol. 18, Issue 3. — P. 65—71.

30. Effect of Hot Pressing Variables on the Microstructure, Relative Density and Hardness of Sterling Silver (Ag-Cu alloy) Powder Compacts [Text] / B. Henriques, D. Soares, J. C. Teixeira, F. S. Silva // Materials Research. — 2014. — № 17(3). — P. 664—671.

31. Хасанов О. Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий [Текст] : учеб. пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 212 с.

32. Еременко В. Н. Спекание в присутствии жидкой металлической фазы [Текст] / В. Н. Еременко, Ю. В. Найдич, И. А. Лавриненко. — Киев : Наукова думка, 1968. — 122 с.

33. Кинджери У. Д. Введение в керамику [Текст] / У. Д. Кинджери // П. П. Будникова, Д. Н. Полубояринова. — 2-е изд. — Москва : Стройиздат, 1967. — 499 с.

34. Пат. 61562 Україна, МПК В22F 3/16, С22С 33/02. Спосіб виготовлення кускового легованого скрапу із сталевих порошкових відходів [Електронний ресурс] / Сосновський Л. О., Власова О. В., Баглюк Г. А. — № u201015065; заявл. 14.12.2010 ; опуб. : 25.07.2011, Бюл. №14. — 4 с. — Режим доступу: <https://uapatents.com/4-61562-sposib-vigotovlennya-kuskovogo-legovanogo-skrapu-iz-stalevikh-poroshkovikh-vidkhodiv.html>. — Назва з екрану. — Дата перегляду 11.04.21.

35. Корытов М. С. Технология конструкционных материалов [Текст] : учебное пособие для студентов заочной формы обучения с применением дистанционных образовательных технологий / М. С. Корытов, В. В. Евстифеев. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. — 239 с.

36. Максименко О. П. Теорія процесів прокатного, трубного, ковальсько-штампувального та волочильного виробництв [Текст] : навчальний посібник для студентів металургійних спеціальностей вищих закладів / О. П. Максименко, С. М. Лясота, Р. Я. Романюк. — Дніпродзержинськ : Дніпродзержинський державний технічний університет, 2009. — 207 с.

37. Синельников В. А. Создание технологических основ производства бездефектной непрерывнолитой заготовки малых сечений стали ШХ15 для изготовления тел качения [Текст] : Тр. 7-го конгресса сталеплавыльщиков. — Москва : ОАО "Черметинформация", 2003. — С. 340—345.

38. Спектор А. Г. Структура и свойства подшипниковых сталей [Текст] / А. Г. Спектор, Б. М. Зельбет, С. А. Киселева. — Москва : Metallurgy, 1980. — 264 с.
39. Разработка технологии нагрева шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ при условии РУП «БМЗ» с целью повышения качества [Текст] / В. И. Тимошпольский, В. А. Маточкин, В. А. Тищенко, Д. В. Ленартович // Литье и металлургия. — 2004. — №3 (31). — С. 125—130.
40. Прокатка металлических порошков [Текст] / Г. А. Виноградов, Ю. Н. Семенов, О. А. Катрус, В. П. Каташинский. — Москва : Изд-во «Металлургия», 1969. — 382 с.
41. Кокорин В. Н. Прессование деталей и заготовок с использованием механических смесей с различным фазовым состоянием [Текст] / В. Н. Кокорин. — Ульяновск : УлГТУ, 2009. — 51 с.
42. Zhan M. Modeling of Hot Forging [Text] / M. Zhan, Z. Sun, H. Yang // Material Science and Material Engineering. — 2014. — № 5. — P. 441—493.
43. McGeough J. A. Introduction to Casting, Semi-Solid Forming and Hot Metal Forging [Text] / J. A. McGeough // Material Science and Material Engineering. — 2014. — № 5. — P. 1—2.
44. Сігова В. І. Технологічні процеси зміцнення та АСУ ТП [Текст] : навч. посіб. / В. І. Сігова, Л. Ф. Руденко. — Суми : Вид-во СумДУ, 2008. — 197 с.
45. Горюшкін Н. І. Вплив технологічних параметрів гарячої ковки на структуру та властивості порошкових матеріалів Fe-C [Електронний ресурс] : [презентація PowerPoint] / Н. І. Горюшкін. — Київ, 2016. — 17 с. — Режим доступу: https://compnano.kpi.ua/pdf_files/fk31-zah/horus_pres.pdf. — Назва з екрану. — Дата перегляду 12.04.21.
46. Кокорин В. Н. Теория обработки металлов давлением (определение деформаций и напряжений при осадке) [Текст] : методические указания / В. Н. Кокорин, В. И. Филимонов. — Ульяновск : УлГТУ, 2004. — 25 с.
47. Структура и свойства материалов изготовленных из порошковых материалов после их пластической деформации / М. С. Егоров, Р. В. Егорова, А. В. Васильченко, Д. Д. Яровая // Наука в России : Перспективные исследования и разработки : I всероссийская научно-практическая конференция, 30 — 31 октября 2017 г., г. Ростов-на-Дону : сборник трудов конференции — Новосибирск : Общество с ограниченной ответственностью «Центр развития научного сотрудничества», 2017. — С. 13 — 137. — Режим доступа: :

https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30702390_59516427.pdf. —

Заголовок с экрана. — Дата просмотра : 15.04.21.

48. Вплив технологічних параметрів на процес вільної осадки порошкових матеріалів на основі заліза [Текст] / А. В. Мініцький, Л. О. Сосновський, П. І. Лобода, Ю. Й. Бесарабець // Наукові нотатки : Міжвузівський збірник. — 2019. — № 65. — С. 183—188.

49. Isothermal Upset Forming of AA5083 after Severe Plastic Deformation by ECAE [Text] / I. Puertas, C. J. Luis-Perez, D. Salcedo, J. Leon [and etc.] // Procedia CIRP. — 2013. — Vol. 12. — P. 288—293.

50. Фомин А. В. Исследование формоизменения заготовки, полученной винтовой прошивкой, для производства железнодорожных колес : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 «Обработка металлов давлением» [Электронный ресурс] / Алексей Викторович Фомин. — Москва, 2015. — 112 с. — Режим доступа : https://misis.ru/files/3082/FominAV_Disser.pdf. — Название с экрана. — Дата просмотра: 15.04.21.

51. Николенко Р. С. Повышение эффективности процессов штамповки сложнопрофильных плит ассиметричной осадкой радиусным инструментом : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 «Процесса и машины обработки давлением» [Электронный ресурс] / Роман Сергеевич Николенко. — Мариуполь, 2016. — 235 с. — Режим доступа : http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/vidguk/Dis.PDF. — Название с экрана. — Дата просмотра: 15.04.21.

52. Фук Д. В., Цеменко В. Н., Ганин С. В. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2015. — 3 (226). — С. 30—39.

53. Штерн М. Б. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ на основі порошків металів і кераміки при деформуванні та спіканні / М. Б. Штерн, В. Д. Рудь // Монографія. — Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2009. — 287 с.

54. Baglyuk G. A. Method of permeable elements for simulation of powder metals forming processes / G. A. Baglyuk // Machines. Technologies. Materials, 2019. — Vol. 13. — Issue 9. — P. 376—379.

55. Khoei A. R. Computational Plasticity in Powder Forming Processes / A. R. Khoei // Elsevier Science, 2005. — P. 449.

55. Строительные нормы и правила. Производительные здания [Текст] : СНиП 2.09.02-85. — Введён с 1998-09-07. — Москва : ГОССТРОЙ СССР, 1991. — 17 с.

56. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст] :

ГОСТ 12.1.005-88. — Введён с 1988-01-01. — Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. — 78 с.

57. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : ДСН 3.3.6.042-99. — Чинний з 1999-12-01. — Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. — 10 с.

58. Державні будівельні норми України. Природне і штучне освітлення [Текст] : ДБН В.2.5.-28-2006. — Чинний з 2006-05-15. — Київ : Мінбуд України, 2006. — 76 с.

59. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Текст] : ДСН 3.3.6.037-99. — Чинний з 1999-12-01. — Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. — 34 с.

60. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації [Текст] : ДСН 3.3.6.039-99. — Чинний з 1999-12-01. — Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. — 30 с.

61. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст] : ДБН В.1.1.-7-2002. — Чинний з 2002-12-03. — Київ — Держбуд України, 2003. — 42 с.