

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Факультету автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування**

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«_____» _____ 2026 р.

**Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра**

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будувальних матеріалів і виробів»

зі спеціальності – 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Лінія виготовлення цементу сухим способом з модернізацією
кульового однокамерного млина

Студент IV к, групи ЛП-21

_____ **Шпак Олексій Леонідович**

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник проекту: _____ **доктор філософії, доцент Швачко Д.Г.**

(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ: д.т.н., проф. **Щербина В.Ю.**

ТЕХ. МАШ.: ст. викл. **Борщик С.О.**

ОХОРОНИ ПРАЦІ: ст. викл. **Ковтун А.І.**

РЕЦЕНЗЕНТ _____

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

Студент (-ка) _____

Київ 2026 рік

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультету автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту

Шпак Олексій Леонідович

1. З приказу на дипломного проектування, керівник проекту Швачко Денис Григорович доктор філософії, доцент, затверджені наказом по університету від «19.05» 2026 р.

№ 1817-С

2. Термін подання студентом проекту 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту

Задана продуктивність – 7 т/год, номінальний діаметр барабана – 2.1 м, номінальна довжина барабана – 1.5 м.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ. 1. Призначення та галузь застосування однокамерного кульового млина у технологічній лінії виробництва цементу сухим способом. 2. Технічна характеристика однокамерного кульового млина. 3. Опис конструкції, її основних частин та принципу дії. 4. Літературно-патентний огляд для вибору варіанту модернізації футерувальних плит барабана однокамерного кульового млина. 5. Розрахунки однокамерного кульового млина, які підтверджують його працездатність. 6. Охорона праці та навколишнього середовища. 7. Технологія машинобудування. Загальні висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу

1. Технологічна схема лінії виробництва цементу сухим способом. 2. Загальний вигляд однокамерного кульового млина з модернізацією барабана. 3. Креслення вузла немодернізованого барабана. 4. Креслення вузла модернізованого барабана. 5. Плакат по 3D-моделюванню базової і модернізованої конструкції барабана. 6. Плакат виконання числового розрахунку базової і модернізованої конструкції барабана.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
МОДЕРНІЗАЦІЇ	Щербина В.Ю., професор		
ТЕХ. МАШИНОБУД.	Борщик С.О., ст. викладач		
ОХОРОНА ПРАЦІ	Ковтун А.І., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання 27.05.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Призначення та галузь застосування однокамерного кульового млина у технологічній лінії виробництва цементу сухим способом.	27.05.26-28.05.26	
2	Технічна характеристика однокамерного кульового млина.	29.05.26-30.05.26	
3	Опис конструкції, її основних частин та принципу дії.	31.05.26-01.06.26	
4	Літературно-патентний огляд для вибору варіанту модернізації футерувальних плит барабана однокамерного кульового млина.	02.06.26-03.06.26	
5	Розрахунки однокамерного кульового млина, які підтверджують його працездатність.	04.06.26-05.06.26	
6	Охорона праці та навколишнього середовища	06.06.26-07.06.26	
7	Технологія машинобудування	08.06.26-11.06.26	
8	Оформлення пояснювальної записки та креслень	12.06.26-15.06.26	

Студент

Олексій ШПАК

Керівник проекту

Денис ШВАЧКО

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт на тему «Лінія виготовлення цементу сухим способом з модернізацією кульового однокамерного млина» містить 77 сторінок друкованого тексту, 34 рисунків, 4 таблиць та 32 використаних джерел.

Об'єктом дослідження є технологічний процес сухого помелу цементного клінкеру, а також безпосередньо конструкція однокамерного кульового млина.

Метою роботи є підвищення загальної ефективності подрібнення матеріалу та експлуатаційної надійності агрегату шляхом впровадження вдосконаленої конструкції футерувальних плит барабана.

У пояснювальній записці детально описано технічні характеристики, будову та принцип дії обладнання для сухого помелу. На основі аналізу існуючих патентних та літературних джерел обґрунтовано доцільність зміни стандартного профілю бронеплит на інноваційну конструкцію з діагональним виступом. За допомогою системи автоматизованого проєктування SOLIDWORKS було створено точні тривимірні моделі базового та модернізованого вузлів. Порівняльний числовий аналіз напружено-деформованого стану барабана виконано методом скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі Ansys. Крім того, у проєкті розроблено комплекс заходів з охорони праці та екологічної безпеки, спрямованих на мінімізацію впливу промислового пилу та шуму.

Практична цінність і новизна результатів полягають у розробці оновленого профілю футерувальної плити, що дозволяє оптимізувати траєкторію руху молотильних тіл, зменшити знос робочих поверхонь та оптимізувати енерговитрати підприємства.

Отримані результати рекомендовано до впровадження на підприємствах цементної промисловості при модернізації діючих технологічних ліній та проєктуванні нових млинів.

Ключові слова: ОДНОКАМЕРНИЙ КУЛЬОВИЙ МЛИН, СУХИЙ ПОМЕЛ, ЦЕМЕНТ, ФУТЕРУВАЛЬНА ПЛИТА, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ANSYS.

ABSTRACT

The diploma project titled "Dry Method Cement Production with Modernization of a Single-Chamber Ball Mill" consists of 77 pages of printed text, 34 figures, 4 tables, and a 32 of references.

The object of the study is the technological process of dry grinding of cement clinker, as well as the mechanical design of the single-chamber ball mill.

The purpose of the work is to increase the overall efficiency of material grinding and the operational reliability of the unit by implementing an improved design of the drum's lining plates.

The explanatory note details the technical characteristics, structure, and operating principles of the dry grinding equipment. Based on an analysis of existing patent and literature sources, the feasibility of changing the standard armor plate profile to an innovative design with a diagonal protrusion is justified. Accurate 3D models of the baseline and modernized assemblies were created using the SOLIDWORKS 2022 CAD system. A comparative numerical analysis of the stress-strain state of the drum was performed using the finite element method (FEM) in the Ansys software environment. Furthermore, the project outlines comprehensive occupational health and environmental safety measures aimed at minimizing the impact of industrial dust and noise.

The practical significance and novelty of the results lie in the development of an updated lining plate profile, which optimizes the trajectory of the grinding media, reduces the wear of working surfaces, and optimizes the energy consumption of the enterprise.

The obtained results are recommended for implementation at cement industry enterprises during the modernization of existing technological lines and the design of new mills.

Keywords: SINGLE-CHAMBER BALL MILL, DRY GRINDING, CEMENT, LINING PLATE, MODERNIZATION, FINITE ELEMENT METHOD, ANSYS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення та символи (Латинська абетка)

D — внутрішній діаметр барабана млина, м;

d_k — розрахунковий (середній) діаметр молольних тіл (куль), мм;

$d_{\max}$ — максимальний діаметр молольних тіл, мм;

E — модуль пружності (Юнга) матеріалу, МПа;

F — площа поперечного перерізу (або площа поверхні), m^2 ;

G_m (або m_m) — маса завантаження молольних тіл, т;

g — прискорення вільного падіння, m/s^2 ;

K, k — поправочні коефіцієнти (розмелюваності, форми тіл, ефективності тощо);

L — робоча довжина барабана млина, м;

$M_{кр}$ — крутний момент на валу привода, $N \cdot m$;

m — маса елементів конструкції (барабана, футеровки), кг;

N — споживана потужність на валу млина, кВт;

$N_{дв}$ — номінальна (встановлена) потужність електродвигуна, кВт;

n — робоча частота обертання барабана млина, $хв^{-1}$ (об/хв);

$n_{кр}$ — критична частота обертання барабана, $хв^{-1}$ (об/хв);

Q — продуктивність млина, т/год;

q — питомі витрати електроенергії на подрібнення, кВт·год/т;

R — внутрішній радіус барабана млина, м;

R_z — параметр шорсткості поверхні, мкм;

V — корисний (внутрішній) об'єм барабана млина, m^3 ;

v — лінійна (колова) швидкість обертання, м/с.

2 Умовні позначення та символи (Грецька абетка)

- α — кут відриву молольних тіл від стінки барабана, град;
- β — кут падіння (зустрічі) молольних тіл, град;
- γ — насипна маса (густина) подрібнюваного матеріалу, т/м³;
- η — загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу;
- μ — коефіцієнт тертя ковзання / коефіцієнт Пуассона матеріалу;
- ρ — густина матеріалу деталей, кг/м³;
- ρ_m — насипна густина молольних тіл, т/м³;
- σ — еквівалентні напруження (за Мізесом) у деталях, МПа;
- τ — дотичні напруження, МПа;
- ϕ — коефіцієнт заповнення барабана млина молольними тілами, %;
- ω — кутова швидкість обертання барабана, рад/с.

3 Аббревіатури та скорочення

- ДБН — державні будівельні норми;
- ДСТУ — державний стандарт України;
- ЗІЗ — засоби індивідуального захисту;
- ККД — коефіцієнт корисної дії;
- МСЕ — метод скінченних елементів (використовується для розрахунку в Ansys);
- НДС — напружено-деформований стан;
- ПБЕЕС — правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;
- ПЗВ — пристрій захисного відключення.

ЗМІСТ

ВСТУП

1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ	11
2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОДНОКАМЕРНОГО КУЛЬОВОГО МЛИНА.....	13
3. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ.....	14
3.1. Конструктивна схема млина з торцевими ґратами.....	14
3.2. Основні вузли: барабан, футеровка, ґрати, привод, опори, система аспірації.....	15
3.3. Принцип роботи та режими.....	17
4. ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ДЛЯ ВИБОРУ ВАРІАНТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ФУТЕРІВКИ...19	
4.1. Обґрунтування вибору варіанту модернізації футеровки	21
5. РОЗРАХУНКИ КУЛЬОВОГО ОДНОКАМЕРНОГО МЛИНА.....	24
5.1. Параметричні розрахунки	24
5.2. Розрахунки на міцність і жорсткість.....	35
5.3. 3D-моделювання немодернізованого барабану в системі SolidWorks	42
5.4. 3D-моделювання модернізованого барабану в системі SolidWorks.....	46
5.5. Розрахунки на міцність немодернізованого барабану за допомогою програмного комплексу ANSYS.....	48
5.6. Розрахунки на міцність немодернізованого барабану за допомогою програмного комплексу ANSYS.....	53
5.7. Виконання параметричного розрахунку за допомогою мови програмування C++.....	56
6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	58
6.1. Виявлення та аналіз небезпек та шкідливих умов при роботі з кульовим млином.....	58
6.2. Повітря робочої зони.....	59
6.3. Електробезпека.....	60
6.4. Безпека при роботі з рухомими та обертовими частинами.....	60
6.5. Шум.....	61
6.6. Вібрація.....	61
6.7. Промислове освітлення.....	62
6.8. Охорона навколишнього середовища.....	62

					ЛП21.143115.000-70ПЗ		
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата			
Розробив	Шпак О.Л.				Лінія виготовлення цементу сухим способом з модернізацією кульового однокамерного млина	Літ.	Арк.ш
Перевірив	Швачко Д.Г.						Арк.шів
							1
							2
Н. контр.					КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Затвердив	Сокольський О.Л.						

7. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДВАННЯ.....	64
7.1. Опис і призначення деталі.....	64
7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі.....	65
7.3 Вибір пристосування для обробки.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	78
ДОДАТКИ.....	80

					ЛП21.143115.000-70ПЗ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Цементна промисловість є однією з базових галузей світової економіки, оскільки попит на будівельні матеріали безперервно зростає через глобальні темпи урбанізації та будівництва. Водночас технологічний процес виробництва цементу залишається надзвичайно енергоємним, де найбільша частка витрат електроенергії (до 60%) припадає саме на стадію тонкого сухого помелу цементного клінкеру та добавок.

Головними проблемами при експлуатації існуючого помольного обладнання є недостатня енергоефективність, швидке абразивне та ударне зношування робочих органів (зокрема футерувальних плит барабана) та неоптимальна траєкторія руху молотильних тіл. Вирішення цих недоліків є пріоритетним завданням для сучасних цементних заводів, які прагнуть знизити собівартість кінцевої продукції, зменшити час простоїв на ремонт та підвищити загальну конкурентоспроможність.

У цьому контексті модернізація та глибока інженерна оптимізація однокамерних кульових млинів є критично важливим кроком. Завдяки своїй надійності, простоті обслуговування та високій продуктивності, кульові агрегати продовжують залишатися основним обладнанням ліній сухого помелу. Вдосконалення їхньої внутрішньої геометрії здатне стати вирішальним інструментом для інтенсифікації процесу подрібнення.

Метою даного дипломного проєкту є розробка ефективного варіанта модернізації футерувальних плит барабана однокамерного кульового млина (зокрема, проєктування плит із діагональним виступом) для максимізації ефективності помелу цементу [1, 2]. Для досягнення цієї мети передбачається виконання комплексу параметричних розрахунків, створення точної 3D-моделі агрегату в САПР SolidWorks та проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану модернізованого вузла за допомогою програмного комплексу Ansys.

Запропоновані конструктивні рішення та результати комп'ютерного моделювання можуть слугувати надійною науково-технічною базою для вдосконалення діючих технологічних ліній на цементних підприємствах. Впровадження такої модернізації сприятиме оптимізації кінематики молотильних тіл, подовженню міжремонтного періоду обладнання та вирішенню актуальних завдань енергозбереження у галузі.

1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

Розглянемо технологічну лінію виробництва цементу, яка включає етапи підготовки сировини, випалу та фінального помелу (рис. 1.1).

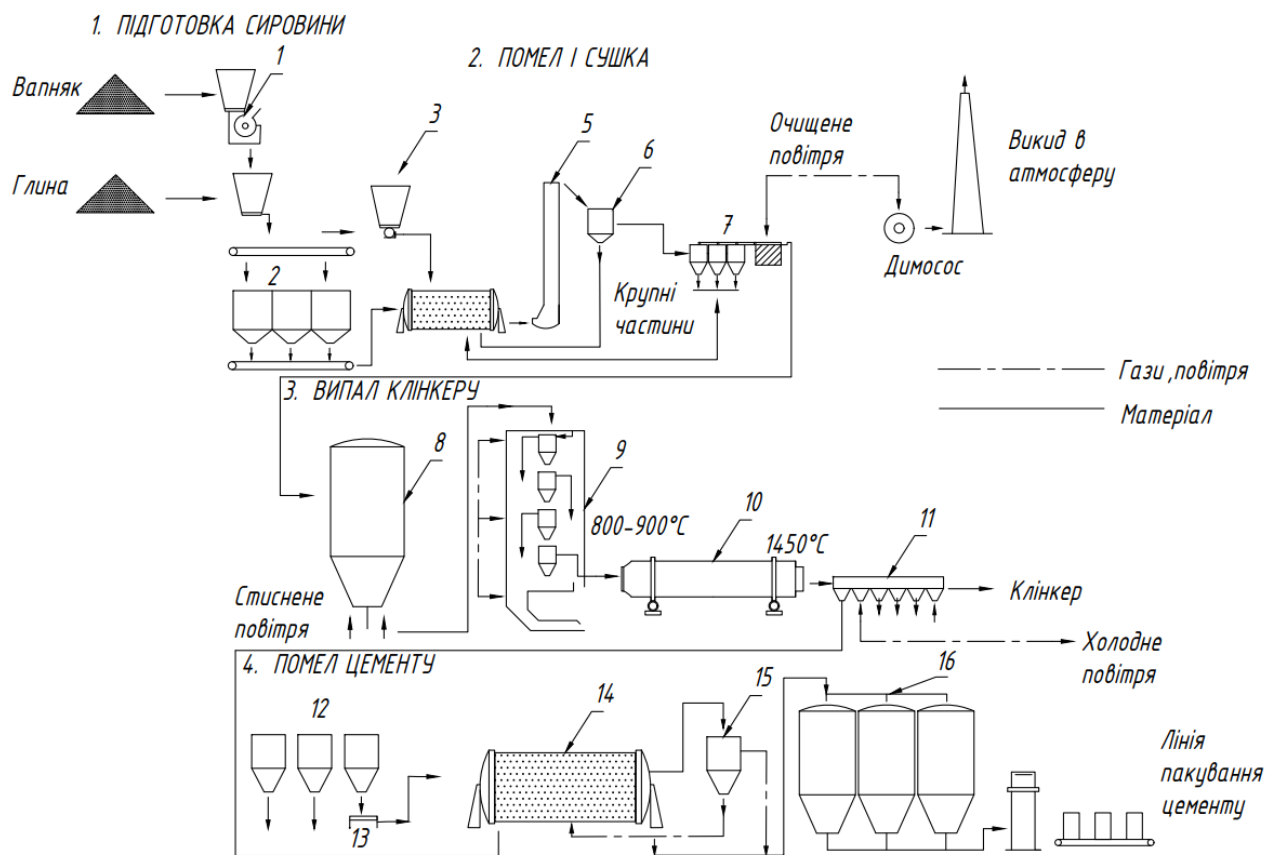


Рисунок 1.1 – Схема технологічної лінії виробництва цементу сухим способом:

- 1- Дробарки; 2 - Видаткові бункери сировини; 3 - Дозатори сировини; 4 - Однокамерний кульовий млин; 5 - Ковшовий елеватор; 6 - Повітряний сепаратор; 7 - Циклони та рукавні фільтри; 8 - Гомогенізаційний силос;
- 9 - Циклонний теплообмінник; 10 - Обертальна піч; 11 - Колосниковий холодильник; 12 - Бункери клінкеру, гіпсу та добавок; 13 - Дозатори матеріалів;
- 14 - Млин для цементу; 15 - Сепаратор; 16 - Силоси готового цементу;

Процес починається з підготовки вихідної сировини (вапняку та глини), яка подається у дробарки 1 для первинного здрібнення. Подрібнена сировина накопичується у видаткових бункерах сировини 2, звідки через дозатори 3 безперервно подається у заданих технологічних пропорціях. Далі суміш потрапляє в однокамерний кульовий млин 4. У цій машині відбувається інтенсивний спільний помел та сушка матеріалу під дією мелючих тіл. Здрібнена сировина піднімається ковшовим елеватором 5 та направляється у повітряний сепаратор 6, який відділяє крупні частини та повертає їх назад у млин для домолу. Готова дрібна фракція (сировинне борошно) разом із пилогазовим потоком проходить крізь циклони та рукавні фільтри 7, де вловлюється та виділяється з потоку, а очищене повітря виводиться назовні.

Зібране борошно надходить у гомогенізаційний силос 8, де за допомогою подачі стисненого повітря перемішується для отримання однорідного хімічного складу. Підготовлена суміш подається у циклонний теплообмінник 9, де попередньо нагрівається до температури 800-900°C відхідними газами з печі. Одразу після цього матеріал потрапляє в обертальну піч 10, де при температурі близько 1450°C відбувається процес випалу та утворюється клінкер. Для фіксації структури гарячий клінкер різко охолоджується холодним повітрям у колосниковому холодильнику 11.

Для етапу фінального виробництва цементу охолоджений клінкер, а також гіпс та інші добавки зберігаються у бункерах 12. Через дозатори матеріалів 13 вони у точних пропорціях подаються у млин для цементу 14, де відбувається остаточний тонкий помел. Після цього здрібнений матеріал проходить через сепаратор 15, який відбирає готовий цемент необхідної дисперсності (а крупні частинки повертає на домол). Після чого готові вироби потрапляють у силоси готового цементу 16 для подальшого складування та передачі на лінію пакування [3, 4].

2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОДНОКАМЕРНОГО КУЛЬОВОГО МЛИНА

Однокамерний кульовий млин сухого помелу призначений для тонкого подрібнення цементного клінкеру. Агрегат працює у безперервному режимі з торцевим розвантаженням матеріалу через грати. Основні технічні та експлуатаційні параметри спроектованого млина наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Технічна характеристика млина

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Матеріал	-	Цементний клінкер	-
Режим роботи	-	Сухий помел	-
Продуктивність млина	$Q_{завд}$	7	т/год
Початкова крупність матеріалу	$D_{поч.}$	20 (25)	мм
Залишок на ситі №008	$R_{(008)}$	12	%
Номінальний діаметр барабана	D_n	2,1	м
Номінальна довжина барабана	L_n	1,5	м
Маса молоткових тіл (кульового завантаження)	G_k	5,58	т
Робоча частота обертання барабану	$n_{роб.}$	24,6	об/хв
Номінальна потужність електродвигуна	$N_{дв}$	180	кВт

вінцевим колесом (10), яке жорстко закріплене між фланцем обичайки (1) та днищем (14). Така схема дозволяє передавати значний крутний момент, необхідний для обертання багатотонної конструкції млина. Вінцеве зубчасте колесо закрито кожухом (11).

Внутрішня порожнина барабана є робочою камерою, де відбувається процес подрібнення. Для захисту корпусу барабана від інтенсивного абразивного та ударного зношування вся його внутрішня поверхня викладається змінними броньованими (футерувальними) плитами. На схемі показані броньові плити торцевого днища (2) та броньові плити циліндричної обичайки (9).

Вихідний матеріал подається в млин через завантажувальний пристрій (6), встановлений на перехідному фланці (5), проходить через пустотілу завантажувальну цапфу та потрапляє у робочу камеру через конічну втулку (3). З протилежного, розвантажувального, торця барабана встановлена ключова деталь даної конструкції — торцеві ґрати (19). Вони утримують мелючі тіла та крупні фракції матеріалу всередині робочої камери і пропускають подрібнений матеріал, який досяг необхідної тонини.

Після проходження крізь ґрати (19) матеріал потрапляє у розвантажувальну камеру корпусу ґратів (17), оснащену радіальними ребрами-ліфтерами (18). При обертанні барабана ліфтери (18) піднімають подрібнений продукт і спрямовують його у розвантажувальну втулку (16), яка встановлена у вихідній пустотілій цапфі. Через неї матеріал видаляється з млина. Система підшипникових опор ковзання, що включає нижні вкладиші (4) та кришки підшипників (7, 15), забезпечує надійність обертання та підтримку всієї конструкції [5].

3.2 Основні вузли: барабан, футеровка, ґрати, привод, опори, система аспірації.

Детальний аналіз ключових вузлів дозволяє обґрунтувати їх конструктивні особливості та принцип взаємодії в процесі роботи.

Барабан є зварною циліндричною обичайкою, посиленою торцевими кришками (днищами). До торцевих кришок приварені пустотілі цапфи, які є не лише опорами, але й каналами для завантаження та розвантаження матеріалу. Барабан виготовляється з високоміцної листової сталі та розраховується на значні статичні й динамічні навантаження від ваги завантаження, ударів куль та вібрацій (рис. 2.2).

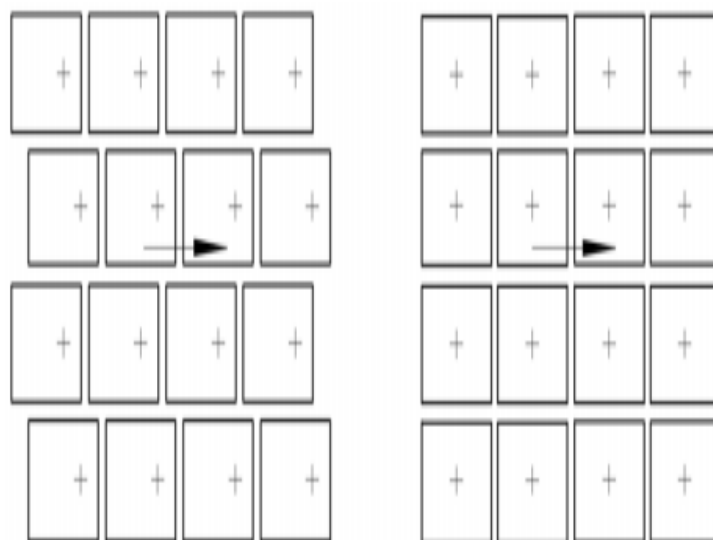


Рисунок 3.2. – Схема футерівки циліндричного млина.

Футеровка: є найбільш зношуваним елементом млина. На рис. 3.2 показана класична металева футеровка (зі зносостійкого чавуну або сталі). Плити футеровки часто мають профільовану, хвилясту або ребристу поверхню. Цей профіль необхідний для кращого зчеплення з кулями, запобігання проковзуванню завантаження та ефективної передачі енергії від барабана до молоткових тіл. Вибір матеріалу та форми бронеплит є ключовим інженерним рішенням, що залежить від абразивності матеріалу та необхідної траєкторії руху куль.

Ґрати та вузол розвантаження: Конструкція з торцевими ґратами забезпечує розвантаження «на прохід». Це дозволяє підтримувати нижчий рівень матеріалу в барабані, що інтенсифікує процес помелу та сприяє швидкому видаленню готового продукту. Самі ґрати є набірними плитами зі щілинами, розмір яких визначає максимальну крупність продукту на виході. Ліфтери у розвантажувальній камері працюють як елеватор, піднімаючи подрібнений матеріал до осі обертання розвантажувальної цапфи.

Привод: Схема з периферійним приводом через зубчасте вінцеве колесо є домінуючою для млинів даного типорозміру. Вінцевий привод дозволяє передавати значну потужність, оскільки крутний момент прикладається до максимального зовнішнього діаметра. Для млина $D = 2,1$ м класична схема (електродвигун – редуктор – пружна муфта – вінцеве колесо) є найбільш економічно та технічно обґрунтованою.

Опори: Опори цапф є критично важливими вузлами, що працюють в умовах екстремальних навантажень. Найчастіше використовуються підшипники ковзання з вкладишами, залитими антифрикційним матеріалом (бабітом). Для запобігання сухому

тертю та задирам під час пуску млина (до моменту формування масляного клина), такі опори обов'язково оснащуються системами гідростатичного змащування, які подають оливу під високим тиском, «піднімаючи» барабан ще до початку обертання.

Система аспірації (пилогазовідвід): Її наявність є обов'язковою для агрегатів сухого помелу. У процесі подрібнення виділяється значна кількість тепла та дрібнодисперсного пилю. Система виконує три головні функції: видаляє надлишкове тепло (запобігаючи перегріву), видаляє вологу та створює розрідження в корпусі млина, що унеможливорює неорганізовані викиди пилю в цех через ущільнення.

3.3 Принцип роботи та режими

Принцип роботи млина ґрунтується на перетворенні кінетичної та потенційної енергії молоткових тіл (куль) у роботу руйнування матеріалу. Матеріал безперервно подається через завантажувальну цапфу в робочу камеру, де змішується з кулями. При обертанні барабана футеровка захоплює кулі та матеріал, піднімаючи їх на певну висоту.

Розрізняють три основні режими руху молоткових тіл:

1. Каскадний режим (низькі швидкості): Кулі піднімаються на невелику висоту і плавно перекочуються по поверхні завантаження. Подрібнення відбувається переважно за рахунок стирання та роздавлювання. Режим характерний для отримання дуже тонкого продукту.

2. Водоспадний режим (середні швидкості): При збільшенні швидкості кулі піднімаються на значну висоту, відриваються від броне і летять по параболічних траєкторіях, падаючи на нижню частину завантаження. Подрібнення йде переважно за рахунок потужного удару. Це найефективніший режим для руйнування твердих шматків матеріалу.

3. Центрифугування (критична швидкість): При досягненні так званої «критичної» швидкості ($n_{кр.}$) відцентрова сила стає рівною або більшою за силу тяжіння. Кулі притискаються до футеровки, обертаючись разом із барабаном без падіння. Процес подрібнення повністю припиняється.

Робоча швидкість обертання $n_{\text{роб.}}$ є ключовим технологічним параметром, який виражають у частках від критичної швидкості (коефіцієнт ψ).

Для тонкого помелу (де потрібне стирання) обирають каскадний або змішаний режим $\psi = 0.65-0.75$.

Для грубого помелу (де потрібен удар) обирають водоспадний режим $\psi = 0.75-0.85$. Враховуючи високу міцність клінкеру, для даного проєкту найбільш доцільним є використання саме водоспадного режиму руху завантаження. Подрібнений матеріал, рухаючись уздовж барабана, поступово зменшується в розмірі. Досягнувши ґрат, дрібні фракції проходять крізь них і виводяться з млина, в той час як крупні фракції та молільні тіла залишаються в робочій камері для подальшої дезінтеграції.

4. ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ДЛЯ ВИБОРУ ВАРІАНТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ФУТЕРІВКИ

Для обґрунтування напрямку модернізації було проведено аналіз технічних рішень у галузі енергоефективного подрібнення. Основна увага приділялася патентам, що спрямовані на зміну профілю бронеплит для оптимізації траєкторії руху мелючих тіл [6].

В основу модернізації за патентом [7] поставлено задачу вдосконалення футерувальної плити шляхом пом'якшення ударних навантажень та зниження її маси. Поставлена задача вирішується тим, що робочий шар плити виконано з еластичного матеріалу (зносоустійкої гуми), який жорстко з'єднаний з металевою армувальною основою. Під час обертання барабана пружність гуми частково поглинає та рівномірно розподіляє кінетичну енергію від падіння молоткових тіл. Це зменшує загальну масу барабана, що знижує інерційні навантаження на привод млина. Однак для умов однокамерного млина сухого помелу цементу таке рішення є неприйнятним, оскільки температура гарячого клінкеру призведе до швидкої термічної деструкції гуми.

В основу рішення [8] покладено задачу оптимізації траєкторії руху молоткових тіл для інтенсифікації процесу подрібнення. Робоча поверхня підйомного виступу (ліфтера) виконана з криволінійним профілем, кут нахилу якого плавно змінюється по висоті. При обертанні барабана ліфтер захоплює кулі та, завдяки змінній кривизні поверхні, забезпечує їх точне скидання по розрахованій траєкторії безпосередньо в центр зони подрібнення. Це виключає прямий удар куль у зустрічну оголену броню. Проте виготовлення таких плит зі складним криволінійним профілем є технологічно важким, а тонка робоча кромка схильна до прискореного абразивного зношування.

В основу модернізації [9] поставлено задачу підвищення міцності футерувальної плити та усунення зон локального гідроабразивного зношування. Робоча поверхня виконана у вигляді послідовних асиметричних сходинок із застосуванням плавних радіусів переходу між ними. Східчаста поверхня створює надійний опір зсуву матеріалу, а плавні переходи перешкоджають застряганню дрібної фракції. Внаслідок відсутності гострих кутів суттєво знижується локальна концентрація напружень. Недоліком цієї конструкції є те, що вона вирішує проблему ковзання лише в радіальному напрямку, але жодним чином не сприяє осьовому просуванню матеріалу вздовж барабана.

Основу корисної моделі за патентом [10] поставлено задачу підвищення зчеплення мелючих тіл з внутрішньою поверхнею барабана для збільшення висоти їх підйому. Поставлена задача вирішується тим, що робоча поверхня футерувальної плити виконана з хвилястим профілем, де плавні гребені чергуються із западинами. Під час обертання барабана така форма забезпечує надійне захоплення молотьних куль, запобігаючи їх передчасному ковзанню по броні. Це дозволяє перевести режим роботи млина ближче до водоспадного, що є ефективним для грубого руйнування матеріалу. Однак, суттєвим недоліком є те, що в процесі експлуатації гребені порівняно швидко зношуються, профіль стає плоским, а у западинах часто відбувається напресування дрібних фракцій матеріалу, що зводить нанівець початкову геометричну перевагу.

В основу рішення [11] покладено задачу забезпечення поздовжнього сортування мелючих тіл по довжині млина відповідно до зміни крупності матеріалу. Робоча поверхня бронеплити виконана з похилим конічним профілем (зменшення товщини плити у напрямку розвантаження). Завдяки цьому при обертанні створюється кут нахилу, який змушує більші кулі зосереджуватися на початку зони подрібнення, а менші — переміщуватися до вихідної решітки. Це підвищує загальну енергоефективність процесу помелу. Проте виготовлення плит із такою асиметричною геометрією вимагає збільшеної початкової товщини металу на вході, що дещо зменшує корисний внутрішній об'єм барабана та збільшує загальну масу футеровки.

В основу модернізації за патентом [12] поставлено задачу максимального підвищення зносостійкості футерувальних плит при роботі в агресивних абразивних середовищах. Робоча поверхня бронеплити містить систему заглиблень (комірок), у яких під час роботи застряють молотьні кулі та частинки подрібнюваного клінкеру. Таким чином формується шар «самофутеровки», і подальший процес тертя відбувається переважно між мелючими тілами, а не по поверхні металу плити. Це в кілька разів подовжує термін служби броні. Недоліком цієї конструкції є значне збільшення пасивної маси млина через налиплий шар та застряглі кулі, а також зниження інтенсивності ударного впливу, що робить її менш ефективною для стадії тонкого помелу.

В основу патенту [13] покладено задачу усунення проковзування всього завантаження по гладкій броні на етапах захоплення матеріалу. Поставлена задача вирішується тим, що на робочій поверхні футерувальної плити виконані суцільні поздовжні виступи прямокутного або трапецієподібного перерізу. Вони діють як жорсткі

ліфтери, які гарантовано підіймають шихту на задану висоту для забезпечення інтенсивного ударного руйнування. Однак, наявність прямих кутів та різких перепадів висот призводить до високої концентрації механічних напружень. В результаті постійних ударів такі виступи схильні до сколів та тріщиноутворення.

В основу рішення [14] поставлено задачу стабілізації траєкторії падіння мелючих тіл при змінних режимах завантаження млина. Робоча поверхня плити має комбінований профіль, що складається з похилої ділянки ковзання та підйомного виступу з увігнутою робочою гранню. Така геометрія дозволяє частково групувати кулі перед їх відривом від броні, формуючи більш щільний потік мелючих тіл. Це збільшує ймовірність руйнування частинок матеріалу в зоні удару. Проте, як і в багатьох попередніх випадках, даний профіль забезпечує рух куль переважно в поперечному перерізі барабана і не має конструктивних елементів (наприклад, діагональних виступів), які б цілеспрямовано інтенсифікували осьове переміщення матеріалу від завантаження до вивантаження.

В основу модернізації за патентом [15] поставлено задачу підвищення загальної зносостійкості броні та надійності зчеплення її складових елементів у процесі інтенсивного подрібнення. Поставлена задача вирішується тим, що конструкцію еластичної гумової футеровки армовано спеціальними сталевими дискретними елементами із середньовуглецевої сталі, які додатково мають рифлену поверхню. Під час обертання барабана така комбінована структура дозволяє вдало поєднати високі амортизаційні властивості гумової матриці зі стійкістю сталевих вставок до прямого ударно-абразивного впливу молоткових тіл, тоді як рифлення гарантує високу адгезійну міцність з'єднання різних матеріалів. Проте, значним недоліком такої конструкції є висока технологічна складність та вартість виготовлення композитних металогумових плит. Крім того, наявність еластичної матриці накладає жорсткі обмеження на температурний режим експлуатації, що унеможлиблює застосування цієї броні при помелі гарячих матеріалів (наприклад, свіжого цементного клінкеру).

4.1 Обґрунтування вибору варіанту модернізації футеровки

Аналіз наведених патентних рішень свідчить, що кожна з існуючих конструкцій має певні експлуатаційні, технологічні або температурні обмеження. Враховуючи відсутність оптимального варіанту, що повністю задовольняв би вимоги сухого помелу

високоабразивного цементного клінкеру, було прийнято рішення розробити власну модернізовану конструкцію з безперервним напрямним профілем.

Запропоноване інноваційне рішення офіційно закріплене у Заявці на корисну модель «Футерувальна плита барабанного млина» (Діагональний Виступ), поданій 02.03.2026, реєстраційний № u 2026 01144 [16].

Вибір саме такого варіанту модернізації обґрунтовується необхідністю комплексного впливу на кінематику завантаження. Модернізація полягає у зміні геометричної конфігурації робочої поверхні футерувальної плити, де на внутрішній стінці барабана виконані виступи спеціального профілю. Ключовою конструктивною інновацією є те, що ці виступи розташовані діагонально (під певним розрахованим кутом до осі обертання млина), а не паралельно їй.

Для наочного представлення запропонованого технічного рішення на рисунку 4.1 зображено загальний вигляд модернізованої бронеплити.

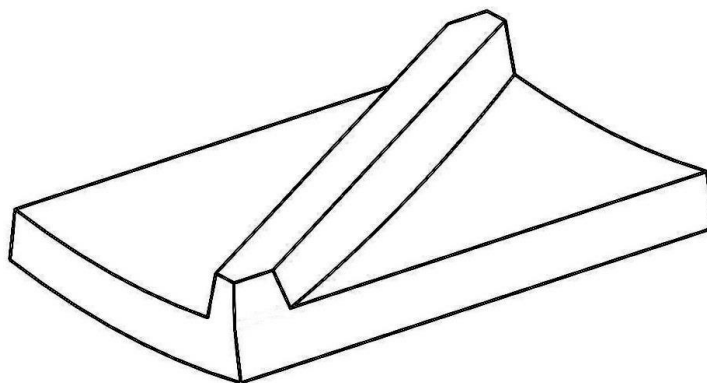


Рисунок 4.1 — Модернізована футерувальна плита з діагональним виступом

Як видно з рисунка, конструкція являє собою суцільнолиту металеву деталь, на робочій поверхні якої сформовано масивний діагональний ліфтер. Впровадження такого профілю дозволяє вирішити одразу кілька технологічних завдань:

1. Забезпечується оптимальний кут відриву мелючих тіл, що повністю виключає їх неефективне ковзання (проковзування) по броні цілим масивом.
2. Інтенсифікується потужний ударно-стиральний вплив на матеріал завдяки наданню кулям складної просторової (гвинтової) траєкторії польоту.
3. Робоча поверхня виступу має змінну висоту по всій довжині. Висота ліфтера поступово зменшується в напрямку розвантажувального отвору (діафрагми). Це цілеспрямовано сприяє правильному осьовому переміщенню

подрібненого матеріалу, запобігаючи його переподрібненню та застою у вхідній зоні млина.

4. Наявність стандартизованих кріпильних отворів (показаних на рис. 4.1) дозволяє монтувати плиту на внутрішню поверхню обичайки за допомогою існуючих болтових з'єднань, не вимагаючи внесення змін у базову металоконструкцію барабана.

Таким чином, використання футерувальних плит із діагональним виступом є найбільш обґрунтованим та ефективним рішенням для інтенсифікації процесу помелу цементу в рамках даного дипломного проєкту.

5 РОЗРАХУНКИ КУЛЬОВОГО ОДНОКАМЕРНОГО МЛИНА

5.1 Параметричні розрахунки.

Метою параметричних розрахунків є визначення основних режимів роботи млина, маси завантаження, продуктивності та потужності.

5.1.1 Вибір діаметра й довжини барабана за продуктивністю та крупністю.

У даному проєкті номінальні геометричні розміри млина задані. Тому завдання даного підрозділу зводиться не до вибору, а до визначення робочих (внутрішніх) розмірів барабана та їх обґрунтування.

Робочі розміри визначаються номінальними розмірами за вирахуванням товщини футерівки. Товщина футерівки $\delta_{\text{ф.}}$ є критичним параметром, що впливає на зносостійкість та корисний об'єм.

Для млинів діаметром близьких до 2 метрів, товщина металевих футерувальних плит обичайки приймається в діапазоні $\delta_{\text{ф.}}$ від 100-150мм. Приймаємо середнє значення $\delta_{\text{ф.}} = 120\text{мм}$.

Внутрішній діаметр барабану з урахуванням футерівки визначається за формулою:

$$D_{\text{з.ф.}} = D_n - 2 \cdot \delta_{\text{ф.}}, \text{ м} \quad (5.1)$$

$$D_{\text{з.ф.}} = 2.1 - 2 \cdot 0.12 = 1.86\text{м.}$$

Внутрішня довжина барабану з урахуванням футерівки визначається за формулою:

$$L = L_n - 2 \cdot \delta_{\text{ф.}}, \text{ м} \quad (5.2)$$

$$L = 1.5 - 2 \cdot 0.12 = 1.26\text{м.}$$

Робочий об'єм барабана, який буде заповнюватися молотильними тілами та матеріалом (V):

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L, \text{ м}^3 \quad (5.3)$$

$$V = \frac{3.14 \cdot 1.86^2}{4} \cdot 1.26 = 3.42 \text{ м}^3$$

Розрахований об'єм барабана є базовим для подальших розрахунків маси завантаження та продуктивності обладнання.

5.1.2 Ступінь заповнення барабана, градація діаметрів куль.

Ступінь заповнення барабана молотильними тілами φ є одним з найважливіших параметрів, що визначають продуктивність та енергоспоживання. Він показує, яка частина робочого об'єму V зайнята кулями.

- При низькому φ , зменшується кількість робочих циклів (ударів) на одиницю об'єму, що знижує продуктивність.
- При надто високому φ (напр. $\varphi > 0.45$), траєкторії падіння куль обмежуються, домінуючим стає режим стирання, а не удару, і різко зростає потужність приводу. Для млинів, що працюють у водоспадному режимі (як у нашому випадку), оптимальні значення φ лежать в діапазоні 0.3 - 0.4. Приймаємо коефіцієнт заповнення млина кулями $\varphi = 0.34$ (34%).

Маса кулькового завантаження G_k необхідна для завантаження млина:

$$G_k = V \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{куль}}, \text{ т} \quad (5.4)$$

$$G_k = 3.42 \cdot 0.34 \cdot 4.8 = 5.58 \text{ т}$$

де — $\rho_{\text{куль}} = 4.8 \text{ т/м}^3$ насипна густина сталевих куль,

Градація діаметрів куль: Для ефективного подрібнення матеріал повинен зустрічати кулі відповідного розміру: крупні кулі для руйнування крупних шматків (удар), дрібні — для моделювання (стирання). Тому завантаження млина завжди є сортовим (сумішшю куль різних діаметрів).

Максимальний діаметр куль $d_{\max}$. Розраховується за емпіричними формулами. Для розрахунку $d_{\max}$ використано формулу Рокка.

$$d_{\max} = K_m \cdot \sqrt{D_{\text{поч}}}, \text{ мм} \quad (5.5)$$

$$d_{\max} = 20 \cdot \sqrt{20} \approx 89.4 \text{ мм}$$

де – K_m – коефіцієнт що залежить від властивостей матеріалу (для матеріалів середньої твердості ($K_m = 20$)).

Приймаємо діаметр куль $d_{\max} = 90 \text{ мм}$.

Визначається тониною помелу

Для грубого помелу $d_{\min}$ зазвичай приймають 30-40 мм. Приймаємо $d_{\min} = 40 \text{ мм}$.

Загальну масу G_K потрібно розділити за фракціями. Для однокамерного млина, що працює на грубий помел, рекомендується наступний розподіл кулькового складу табл.5.1.

Таблиця 5.1. - Прийнятий сортовий склад кульового завантаження

Діаметр куль, мм	Частка від загальної маси, %	Маса фракції, т
90	30	$5.58 \cdot 0.30 = 1.67$
70	40	$5.58 \cdot 0.40 = 2.23$
50	30	$5.58 \cdot 0.30 = 1.67$
Разом	100	5.58

Такий розподіл забезпечує наявність важких куль (90 мм) для руйнування шматків $D_{\text{поч}} = 20 \text{ мм}$ та достатню кількість дрібніших куль для подальшого подрібнення.

5.1.3 Критична частота й робоча швидкість обертання.

Критична частота обертання $n_{кр.}$. Як зазначено в підрозділі 3.3., критична частота обертання – це швидкість при якій відцентрова сил у верхній точці барабану зрівнюється з силою тяжіння .

Умова рівноваги:

$$F_{ц} = m \cdot g \cdot \omega_{кр}^2 \cdot \frac{D_{з.ф.}}{2}, H \quad (5.6)$$

де – $\omega_{кр.}$ критична кутова швидкість. рад/с;

$D_{з.ф.}$ – робочий діаметр млина, м;

g – прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 .

$$\omega_{кр.} = \sqrt{\frac{2g}{D_{з.ф.}}}, \text{ рад/с} \quad (5.7)$$

Переходячи від кутової швидкості рад/с до частоти обертання об/хв за формулою:

$$\omega_{кр.} = \frac{2\pi n}{60}, \text{ рад/с} \quad (5.8)$$

$$n_{кр.} = \frac{60\omega_{кр.}}{2\pi} = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2g}{D_{з.ф.}}} = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2g}{D_{з.ф.}}}, \text{ об/хв} \quad (5.9)$$

$$n_{кр.} = \frac{42.3}{\sqrt{D_{з.ф.}}}, \text{ об/хв} \quad (5.10)$$

Розрахуємо критичну частоту обертання для млина з $D_{з.ф.} = 1.86 \text{ м}$

$$n_{кр.} = \frac{42.3}{\sqrt{1.86}} = 31.01 \text{ об/хв}$$

Робоча швидкість обертання $n_{раб.}$

Вибір робочої швидкості обертання є ключовим технологічним рішенням.

$$n_{\text{раб.}} = \varphi \cdot n_{\text{кр.}}, \text{об/хв} \quad (5.11)$$

Як було детально обґрунтовано в підрозділах 1.2. та 2.3. конструкції млина ($L_n / D_n = 0.17$) та технічні вимоги (грубий помел $R_{008} = 12\%$) вимагають реалізації водоспадного режиму (максимізації удару).

Цей режим досягається при високих значеннях коефіцієнту ψ . Приймаємо $\psi = 0,8$ (80% від критичної), що забезпечує високу висоту підйому куль та їх інтенсивного падіння.

$$n_{\text{раб.}} = 0.8 \cdot 31.08 = 24.8 \text{об/хв}$$

Приймаємо найближче стандартне значення або залишаємо розрахункове.

Відповідно робоча кутова швидкість:

$$\omega_{\text{роб}} = \frac{2\pi n_{\text{роб}}}{60}, \text{рад/с} \quad (5.12)$$

$$\omega_{\text{роб}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 24.8}{60} = 2.597 \text{ рад/с}$$

5.1.4 Розрахунок продуктивності млина (т/год).

У цьому підрозділі виконується перевірочний розрахунок продуктивності. Завдання полягає в тому, щоб, використовуючи стандартні інженерні методики, оцінити теоретичну продуктивність $Q_{\text{роз.}}$ млина з розрахованими параметрами і порівняти їх з заданою продуктивністю $Q_{\text{зад}} = 7 \text{т/год}$.

Для забезпечення "глибокого аналізу", виконаємо розрахунок за двома різними методиками.

Методика 1. Емпірична формула (на основі якої буде виконаний розрахунок). Існує ряд емпіричних формул, що пов'язують продуктивність з геометричними та режимними параметрами.

Одна з поширених форм (наведена в для трубного млина, але адаптована) має вигляд:

$$Q_{\text{розр}} = K_q \cdot V \cdot D_{\text{з.ф.}}^{0,5} \cdot \psi \cdot K_{\text{подр.}}, \text{т/год} \quad (5.13)$$

$$Q_{\text{розр}} = 1 \cdot 3.426 \cdot 1.86^{0,5} \cdot 0.8 \cdot 0.9 = 4.54 \text{т/год}$$

де - K_q загальний коефіцієнт продуктивності (залежить від типу млина, град, тощо) $K_q = 0.8-1.2$;

V робочий об'єм млина $V = 3.426 \text{м}^3$;

$\rho_{\text{мат.}}$ насипна густина матеріалу $\rho_{\text{мат.}} = 1.35 \text{т/м}^3$

$D_{\text{з.ф.}}$ робочий діаметр $D_{\text{з.ф.}} = 1.86 \text{м}$

ψ коефіцієнт робочої швидкості $\psi = 0.8$

$K_{\text{подр.}}$ Коефіцієнт, що враховує подрібнюваність матеріалу на тону помелу. Для клінкеру та $R_{008} = 12\%$ $K_{\text{подр.}} = 0.9$.

Методика 2. Енергетичний підхід (на основі потужності) є більш фізично обґрунтованим методом, що пов'язує продуктивність з потужністю, яка витрачається безпосередньо на подрібнення.

$$Q = \frac{N_{\text{подр}}}{W_{\text{пит}}}, \text{кВт} \quad (5.14)$$

$$Q = \frac{10.1}{15.8} = 0.64 \text{кВт}$$

$N_{\text{подр.}}$ корисна потужність, що йде на подрібнення (кВт);

$W_{\text{пит.}}$ Питома енергоємність подрібнення (кВт год/т).

Питома енергоємність $W_{\text{пит.}}$ Визначається за третім законом подрібнення (закон Бонда):

$$W_{\text{пит}} = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{D_{\text{кін}}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{\text{поч}}}} \right), \text{кВт} \quad (5.15)$$

$$W_{\text{пит}} = 13.5 \left(\frac{10}{\sqrt{D_{\text{кі}}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{\text{поч}}}} \right) = 15.8 \text{кВт}$$

$W_{\text{пит}}$ - питома робота подрібнення;

W_i - індекс роботи Бонда. Для цементного клінкеру $W_i = 13.5$ кВт год/т;

$D_{\text{кін}}$ — кінцевий розмір частинок $D_{\text{кін}} = 70 \mu\text{м}$;

$D_{\text{поч}}$ — початковий розмір частинок (80% прохід) $D_{\text{поч}} = 20000 \mu\text{м}$ (при $D_{\text{max}} = 25 \text{мм}$).

Корисна потужність $N_{\text{подр.}}$. Буде розрахований в наступному підрозділі 3.1.5.

$N_{\text{вал}}$ яка включає $N_{\text{подр.}}$ та втрати на тертя. За формулою, що враховує вагу куль:

$$N_{\text{вал}} \approx G_k \cdot D \cdot n_{\text{роб.}}, \text{ кВт} \quad (5.16)$$

K_N (дуже спрощено). Це груба оцінка, повний розрахунок у підрозділі 3.5.1

$$N_{\text{вал}} \approx (5.58 \cdot 9.81) \cdot 1.86 \cdot \left(\frac{24.8}{60}\right) \cdot 0.3 \approx 12.6 \text{ кВт}$$

Приймаємо, що корисна потужність $N_{\text{подр.}}$ складає приблизно 80% від $N_{\text{вал.}}$ решта – тертя завантаження.

$$N_{\text{подр}} \approx 12.6 \cdot 0.8 = 10.1 \text{ кВт}$$

Продуктивність:

$$Q_{\text{розр.}} = 10.1/15.2 = 0.66 \text{ т/год}$$

Повний розрахунок потужності у підрозділі 5.5.1 дасть більш точні значення, але порядок величин зрозумілий.

Аналіз збіжності: отримані значення демонструють величезну розбіжність між різними методами розрахунків. По першому методу $Q_{\text{розр.}} = 4.54 \text{ т/год.}$ по другому методу $Q_{\text{розр.}} = 0.66 \text{ т/год.}$ Обидва розрахункові значення є суттєво нижчими за задане $Q_{\text{завд.}} = 7 \text{ т/год.}$

Висновок (аналіз розбіжностей):

1. Невідповідність геометрії: Розрахунки показують, що млин з такими малими розмірами ($D_{з.ф.} = 1.86$ м, $L = 1.26$ м) фізично не здатен забезпечити продуктивність 7 т/год при помелі клінкеру до $R_{008}=12\%$.
2. Проблема Методики 1: Емпіричні формули є дуже узагальненими і можуть давати похибку до 50-100% при застосуванні поза межами їх калібрування.
3. Проблема Методики 2: Енергетичний підхід є більш точним, але його результат (0.66 т/год) вказує на те, що задані в таблиці 1.1 параметри ($Q=7$, $D=2.1$, $L=1.5$) є взаємно неузгодженими.

Рішення: Для подальшого виконання курсового проєкту, приймається допущення, що млин повинен забезпечити $Q = 7$ т/год, але його розрахункова потужність (розділі 5.1.5.) та міцність (у розділі 5.2.) будуть розраховані, виходячи з цієї заданої продуктивності, а не з геометрії. Геометричні параметри (D_N , L_N) будуть використані для кінематичних розрахунків (швидкості) та розрахунків мас.

5.1.5 Потужність приводу та ККД привідної системи

Розрахунок потужності приводу є ключовим для вибору електродвигуна та проєктування передавального механізму. Потужність, що споживається млином, витрачається на підйом молотильних тіл, підйом матеріалу, тертя між ними та тертя в опорах (цапфах).

Розрахунок потужності на валу млина $N_{вал.}$: використовуємо більш точну методику, що враховує рух завантаження, загальний крутний момент M_K на валу млина складається з моменту, моменту обертання куль $M_K^{куль}$ та $M_K^{мат.}$.

$$M_K = (G_k + G_m)R_{ц} \sin \beta, Н \cdot м \quad (5.17)$$

де - G_k – вага кульового завантаження $G_k = 5.58T = 54740H$

G_m – вага матеріалу в млині.

Об'єм матеріалу V_m приймається пропорційним об'єму куль з коефіцієнтом заповнення між кульового простору $k_m = 0.4$.

$$V_m = (V \cdot \varphi) \cdot k_m, \text{м}^3 \quad (5.18)$$

$$V_m = (3.426 \cdot 0.34) \cdot 0.4 \approx 0.466 \text{м}^3$$

$$G_m = V_m \cdot g, \text{Н} \quad (5.19)$$

$$G_m = 0.466 \cdot 1.35 \cdot 9.81 \approx 6.17 \text{кН} = 6170 \text{Н}$$

$R_{\text{ц}}$ – радіус центру ваги завантаження. Для водоспадного режиму ($\psi=0.8$)

$$R_{\text{ц}} \approx 0.35 \cdot D, \text{м} \quad (5.20)$$

$$R_{\text{ц}} = 0.35 \cdot 1.86 = 0.651 \text{м}$$

β – кут підйому завантаження. Для $\psi=0.8$, $\beta \approx 30^\circ$.

Тепер розрахуємо потужність на валу млина $N_{\text{вал}}$ з урахуванням втрат на тертя в цапфових підшипниках (ККД підшипників $\eta_{\text{підш.}} \approx 0.95$ для підшипників ковзання при гідростатичному змушуванні).

$$N_{\text{вал}} = \frac{M_k \omega_{\text{роб}}}{\eta_{\text{підш}}}, \text{кВт} \quad (5.21)$$

де $\omega_{\text{роб.}} = 2.597 \text{рад/с}$.

$$N_{\text{вал}} = \frac{19826 \cdot 2.597}{0.95} = 54226 \text{Вт} = 52.4 \text{кВт}$$

Альтернативний розрахунок (потужність для $Q = 7 \text{т/год}$), якщо використовувати енергетичну методику у зворотному порядку:

$$N_{\text{подр}} = Q_{\text{завд}} \cdot W_{\text{пит}}, \text{кВт} \quad (5.22)$$

$$N_{\text{подр}} = 7 \cdot 15.2 = 106.4 \text{кВт}$$

Загальна потужність на валу, враховуючи ККД процесу (втрати на тертя куль $\eta_{\text{проц.}} \approx 0.8$)

$$N_{\text{вал}} = \frac{N_{\text{подр}}}{\eta_{\text{проц}} \cdot \eta_{\text{підш}}}, \text{кВт} \quad (5.23)$$

$$N_{\text{вал}} = \frac{106.4}{0.8 \cdot 0.65} = 140 \text{ кВт}$$

Висновок по потужності: Розрахунок, базований на геометрії млина ($N_{\text{вал}} = 54.2 \text{ кВт}$), кардинально розходиться з розрахунком, базованим на заданій продуктивності ($N_{\text{вал}} = 140 \text{ кВт}$). і підтверджує висновок з підрозділу 5.1.4. про неузгодженість вихідних даних. Для подальшого проєктування приймаємо потужність, необхідну для досягнення заданої продуктивності, оскільки технологічні вимоги є пріоритетними. Приймаємо розрахункову потужність на валу млина: $N_{\text{вал}} = 140 \text{ кВт}$.

ККД – циліндричного редуктора (двоступінчастого) $\eta_{\text{ред.}} \approx 0.96$;

ККД відкритого зубчастого вінця $\eta_{\text{ред.}} \approx 0.95$ (враховуючи умови змащення;

ККД – пружинних муфт (дві шт.) $\eta_{\text{ред.}} \approx 0.98$;

Потужність електродвигуна $N_{\text{дв.}}$ необхідна потужність електродвигуна з урахуванням втрат у приводі та коефіцієнту запасу $K_z = 1.15$ (для пускових навантажень).

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{вал}} \cdot K_z}{\eta_{\text{прив}}}, \text{ кВт} \quad (5.24)$$

$$N_{\text{дв}} = \frac{140 \cdot 1.15}{0.894} = 179.9 \text{ кВт}$$

За стандартним рядом потужностей, асинхронний або синхронний електродвигун найближчої більшої потужності $N_{\text{ном}} = 180 \text{ кВт}$ (або 200 кВт , залежно від серії).

5.1.6 Гідравлічні втрати на торцевих ґратах. Розвантажувальній спіралі.

Для млинів сухого помелу цей розрахунок зводиться до визначення аеродинамічного опору тракту пилогазовідводу (аспірації), ключовим елементом якого є торцеві ґрати.

Потік повітря, що відсмоктується системою аспірації (для видалення тепла та пилу), повинен пройти через шар матеріалу та отвори ґрат.

Площа живого перетину ґрад $F_{\text{ж.}}$. Ґрати встановлені на торці $D = 1.86 \text{ м}$, але їхня площа обмежена розвантажувальними отворами цапфи (напр. $D_{\text{цапфи}} \approx 0.5 \text{ м}$).

Площа кільця ґрат:

$$F_{\text{ґрат}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{\text{цапф}}^2), \text{ м} \quad (5.25)$$

$$F_{\text{ґрат}} = \frac{3.14}{4} (1.86^2 - 0.5^2) = 2.52 \text{ м}$$

Коефіцієнт живого перетину (відношення площі отворів до загальної площі) $\mu \approx 0.15-0.2$.

$$F_{\text{ж}} = F_{\text{ґрат}} \cdot \mu, \text{ м} \quad (5.26)$$

$$F_{\text{ж}} = 2.52 \cdot 0.15 = 0.387 \text{ м}$$

Швидкість потоку в отворах ($V_{\text{пов.}}$)

Для аспірації та запобігання виходу пилу, швидкість повітря у вільному перерізі млина $V_{\text{асп}} \approx 0.5-1.0 \text{ м/с}$.

Продуктивність системи аспірації:

$$L_{\text{асп}} = v_{\text{асп}} \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (5.27)$$

$$L_{\text{асп}} = 0.7 \cdot \frac{3.14 \cdot 1.86^2}{4} = \frac{1.9 \text{ м}^3}{\text{с}} = 6840 \text{ м}^3/\text{год}$$

Швидкість потоку безпосередньо в отворах ґрат:

$$v_{\text{ж}} = \frac{L_{\text{асп}}}{F_{\text{ж}}}, \text{ м/с} \quad (5.28)$$

$$v_{\text{ж}} = \frac{1.90}{0.378} = 5.03 \text{ м/с}$$

Аеродинамічний опір ΔP

Втрати тиску ΔP розраховуються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho_{\text{пов}} \cdot v_{\text{ж}}^2}{2}, \text{ Па} \quad (5.29)$$

де $\zeta 2.5 - 3.0$ – коефіцієнт місцевого опору:

$\rho_{\text{пов.}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря.

$$\Delta P = 3,0 \frac{1,2 \cdot 5,03^2}{2} = 45,5 \text{ Па}$$

5.2 Розрахунки на міцність і жорсткість

5.2.1 Товщина обичайки барабана (статичні/ударні навантаження)

Корпус барабана є найбільш відповідальним несучим елементом. Розраховуємо його на міцність при згині, розглядаючи барабан як товстостінну балку, що вільно лежить на двох опорах (цапфах).

Навантаження (Повна вага млина): $G_{\text{ба}}$

Вага барабана (обичайки та днищ) $G_{\text{бар}}$: Приймаємо товщину обичайки $\delta_{\text{об.}} = 30 \text{ мм}$, товщину днищ $\delta_{\text{дн.}} = 50 \text{ мм}$. Густина сталі $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$.

$$G_{\text{об}} = (\pi D_n \delta_{\text{об}} L_n) \rho g, \text{ Н} \quad (5.30)$$

$$G_{\text{об}} = (3,14 \cdot 2,1 \cdot 0,03 \cdot 1,5) \cdot 7850 \cdot 9,81 \approx 22800 \text{ Н}$$

$$G_{\text{дн}} = 2 \cdot \left(\frac{\pi D_n^2}{4} \right) \delta_{\text{дн}} \rho g, \text{ Н} \quad (5.31)$$

$$G_{\text{дн}} = 2 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 2,1^2}{4} \right) \cdot 0,05 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 26700 \text{ Н}$$

$$G_{\{\text{бар}\}} = G_{\text{об}} + G_{\text{дн}}, \text{ Н} \quad (5.32)$$

$$G_{\text{бар}} = 22800 + 26700 = 49500 \text{ Н}$$

Вага футерівки $G_{\text{фут.}}$. Приймаємо $\delta_{\text{ф}} 120 \text{ мм}$, $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$.

$$G_{\text{фут.об.}} = (\pi DL)\delta_{\text{ф}}\rho g, \text{ Н} \quad (5.33)$$

$$G_{\text{фут.об.}} = (3.14 \cdot 1.86 \cdot 1.26) \cdot 0.12 \cdot 7850 \cdot 9.81 = 68000 \text{ Н}$$

Вага торцевої футерівки розраховується аналогічно і становить $G_{\text{фут.тор.}} = 30000 \text{ Н}$.
 $G_{\text{фут.}} = 98000 \text{ Н}$

Вага завантаження (кулі + матеріал)

$$G_{\text{зав}} = G_k + G_m, \text{ Н} \quad (5.34)$$

$$G_{\text{зав}} = 54740 + 6170 = 60910 \text{ Н}$$

Вага вінцевого колеса:

$$G_{\text{вінця}} = (\pi d_2 b_w \delta_{\text{обідб}}) \rho g, \text{ Н} \quad (5.35)$$

$$G_{\text{вінця}} = (3.14 \cdot 2.16 \cdot 0.315 \cdot 0.1) \cdot 7850 \cdot 9.81 \approx 16400 \text{ Н}$$

Сумарне розподілення навантажень

$$G_{\text{сумар}} = G_{\text{бар}} + G_{\text{фут}} + G_{\text{зав}} + G_{\text{вінця}}, \text{ Н} \quad (5.36)$$

$$G_{\text{сумар}} = 49500 + 98000 + 60910 + 16400 = 224810 \text{ Н}$$

$$q = \frac{G_{\text{сум}}}{L_n}, \text{ Н/м} \quad (5.37)$$

$$q = \frac{224810}{1.5} = 149870 \text{ Н/м}$$

Розрахунок на міцність

Максимальний згинальний момент у центрі барабана:

$$M_{зг.мах} = \frac{q \cdot L_n^2}{8}, \text{ Н} \quad (5.38)$$

$$M_{зг.мах} = \frac{149870 \cdot 1.5^2}{8} = 42150 \text{ Н}$$

Момент опору кільцевого перерізу обичайки:

$$W_{зк} = \frac{\pi(D_n^4(D_n - 2\delta_{об})^4)}{32D_n}, \text{ м}^3 \quad (5.39)$$

$$W_{зк} = \frac{3.14(2.1^4 - (2.1 - 2 \cdot 0.03)^4)}{32 \cdot 2.1} = 0.0746 \text{ м}^3$$

Напруження згину в обичайці:

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг.мах}}{W_{зк}}, \text{ МПа} \quad (5.40)$$

$$\sigma_{зг} = \frac{42150}{0.0746} = 565000 \text{ Па} = 0.565 \text{ МПа}$$

Розрахункове напруження $\sigma_{зг}$ 0,565 є вкрай низьким у порівнянні з допустимим для сталі (напр. $[\sigma] \approx 160 \text{ МПа}$ [17]. Це означає, що товщина обичайки $\delta_{об} = 30 \text{ мм}$ визначається не статистичною міцністю на згин, а технологічними вимогами (жорсткість, зварюваність) та опором ударним навантаженням від куль (локальна міцність). Розрахунок підтверджує, що обрана товщина має більше ніж 100-кратний запас міцності по згину.

5.2.2 Міцність цапф/корпусів опор і контактна витривалість

Цапфи працюють на згин та зріз від реакцій опор. Підшипники ковзання, в яких вони обертаються, розраховуються за критерієм PV (тиск / час/швидкість).

Навантаження на опору (цапфу).

Реакція опори R дорівнює половині повної ваги млина:

$$R = \frac{G_{\text{сумар}}}{2}, \text{ Н} \quad (5.41)$$

$$R = \frac{224810}{2} = 112405 \text{ Н}$$

Розрахунок цапф на міцність.

Приймаємо діаметр цапф $D_{\text{ц}}$:

$$D_{\text{ц}} = 0.25 \cdot D_n, \text{ м} \quad (5.42)$$

$$D_{\text{ц}} = 0.25 \cdot 2.1 = 0.525 \text{ м}$$

Довжина цапфи $l_{\text{ц}} \approx D_{\text{ц}} = 0.525 \text{ м}$.

Цапфа працює, як консоль, затиснена у днищі:

$$M_{\text{зг.цапфи}} = R \left(\frac{L_{\text{ц}}}{2} \right), \text{ Н/м} \quad (5.43)$$

$$M_{\text{зг.цапфи}} = R 112405 \cdot \left(\frac{0.525}{2} \right) = 29500 \text{ Н/м}$$

$$W_{\text{зг.цапфи}} = \frac{\pi D_{\text{ц}}^3}{32}, \text{ м}^3 \quad (5.44)$$

$$W_{\text{зг.цапфи}} = \frac{3.14 \cdot 0.525^3}{32} = 0.0142 \text{ м}^3$$

$$\sigma_{\text{зг.цапфи}} = \frac{M_{\text{зг.цапфи}}}{W_{\text{зг.цапфи}}}, \text{ МПа} \quad (5.45)$$

$$\sigma_{\text{зг.цапфи}} = \frac{29500}{0.0142} = 2.08 \text{ МПа}$$

Напруження також є дуже низьким, що підтверджує, що габарити цапф визначаються не міцністю, а вимогами жорсткості та прохідним перерізом.

Розрахунок підшипника на контактну витривалість (за PV).

Це ключовий перевірочний розрахунок для підшипника ковзання.

Питомий тиск P :

$$P = \frac{R}{D_{\text{ц}} \cdot L_{\text{ц}}}, \text{ МПа} \quad (5.46)$$

$$P = \frac{112405}{0.525 \cdot 0.525} = 407800 \text{ Па} = 0.41 \text{ МПа}$$

Колова швидкість V :

$$V = \frac{\pi D_{\text{ц}} n_{\text{роб.факт.}}}{60}, \text{ м/с} \quad (5.47)$$

$$V = \frac{3.14 \cdot 0.525 \cdot 24.625}{60} = 0.677 \text{ м/с}$$

Фактор PV

$$PV = P \cdot V, \text{ МПа} \quad (5.48)$$

$$PV = 0.41 \cdot 0.677 = 0.278 \text{ МПа}$$

Аналіз допустиме значення PV для підшипників, що працюють у режимі рідинного змазування з (бабітовими вкладишами), становить $PV = 2.5-3.5 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$. Отримане значення $PV = 0.278 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$ є значно нижчим за допустиме. Це свідчить про високу надійність та довговічність опорного вузла за умов стабільної роботи системи змащування.

5.2.3 Болтові з'єднання футерівки та ґрат

Це розрахунок на опір. Болти, що кріплять футерувальні плити до обичайки, працюють одночасно на розтяг (від відцентрової сили) та на зріз (від ваги плити).

Навантаження на один болт: Приймаємо плиту футерівки розміром 0.5×0.5 м, $\delta_{\phi} = 0.12$ м.

$$G_{\text{плити}} = (0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.12) \cdot 7850 \cdot 9.81 = 2310 \text{ Н}$$

Навантаження зрізу на 1 болт:

$$F_{\text{зрізу}} = \frac{G_{\text{плити}}}{4}, \text{ Н} \quad (5.49)$$

$$F_{\text{зрізу}} = \frac{2310}{4} = 578 \text{ Н}$$

Відцентрова сила, що діє на плиту (у верхній точці):

$$F_{\text{ц}} = m_{\text{плити}} \cdot \omega_{\text{роб}}^2 \cdot R_{\text{фут.}}, \text{ Н} \quad (5.50)$$

$$F_{\text{ц}} = 235.5 \cdot 6.74 \cdot 0.99 = 1570 \text{ Н}$$

$$m_{\text{плити}} = \frac{2310}{9.81} = 235.5 \text{ кг}$$

$$\omega_{\text{роб}}^2 = 2.597^2 = 6.74$$

$$R_{\text{фут.}} = \frac{1.86}{2} + \frac{0.12}{2} = 0.99 \text{ м}$$

Перевірка болта на міцність: Приймаємо болт М20 (діаметр $d = 20$ мм, площа перерізу $A = 314 \text{ мм}^2$).

Напруження зрізу:

$$\tau_{зр} = \frac{F_{зрізу}}{A}, \text{МПа} \quad (5.51)$$

$$\tau_{зр} = \frac{578}{314 \cdot 10^{-6}} = 1.84 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{розр}^2 + 3 \cdot \tau^2}, \text{МПа} \quad (5.52)$$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{1.25^2 + 3 \cdot 1.84^2} = 3.42 \text{ МПа}$$

Висновок: Напруження від статичних та відцентрових сил є мізерно малими. Справжні навантаження на болти футерівки створюється ударними силами від падіння куль (90мм). Ударна сила $F_{уд}$ може в 10-20 разів перевищувати статичні навантаження. Навіть при 20-кратному збільшенні $\sigma_{екв} \approx 68 \text{ МПа}$, що є допустимим для болтів з матеріалу 8.8 ($[\sigma] \approx 640 \text{ МПа}$). Це підтверджує, що болти руйнуються не від розрахункового навантаження, а від втоми та само відкручування внаслідок вібрацій.

5.2.4 Прогин привідного валу, жорсткість опор

Цей розрахунок уточнює (підрозділ 5.2.3.), фокусуючись на жорсткості валу привідної шестерні. Недостатня жорсткість (великий прогин) призводить до неправильного зачеплення у вінцевій передачі та її катастрофічного зносу.

Дані:

Вал $d = 130 \text{ мм}$

Відстань між опорами $L_B = 500 \text{ мм}$;

Згинаюча сила (сумарна)

$$F_{зг} = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} = 64000 \text{ Н}, \quad (5.53)$$

Матеріал: Сталь 45, модуль пружності $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ МПа}$

Момент інерції перерізу:

$$I_x = \frac{\pi d^4}{64}, \text{ м}^4 \quad (5.54)$$

$$I_x = \frac{3.14 \cdot 0.13^4}{64} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

Розрахунок прогину.

Максимальний прогин валу (як балки на двох опорах з силою посередині):

$$f_{max} = \frac{F_{\{зг\}} \cdot L_B^3}{48 \cdot E \cdot I_x}, \text{ мм} \quad (5.55)$$

$$f_{max} = \frac{64000 \cdot 0.3^3}{48 \cdot 2.1 \cdot 10^{11} \cdot 1.4 \cdot 10^{-5}} = 5.67 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.057 \text{ мм}$$

Допустимий прогин валів [f] для забезпечення коректної роботи зубчастих передач становить $[f] \leq 0.0003$.

$$L_B = f \cdot L_B, \text{ мм} \quad (5.56)$$

$$L_B = 0.003 \cdot 500 = 0.15 \text{ мм}$$

Висновок: Розрахунковий прогин $f_{max} = 0.057 \text{ мм}$ є значно меншим за допустимий [f] = 0.15 мм. Умова жорсткості валу привідної шестерні виконується достатнім запасом.

5.3 3D-моделювання немодернізованого барабану в системі SolidWorks

Процес проектування 3D-моделі однокамерного кульового млина виконується в системі автоматизованого проектування «SolidWorks 2024» [18]. Перед початком варто відзначити, що комп'ютерна модель даного агрегату буде спрощена відносно робочих креслень. Це пов'язано з тим, що детальне моделювання всіх шпонкових з'єднань, фасок та дрібних кріпильних елементів створюватиме штучні концентратори напружень і

надмірно ускладнить сітку, що заважатиме отриманню коректних результатів під час міцнісних розрахунків.

Моделювання розпочинається зі створення деталі «Барабан». Для цього створюється новий ескіз («Sketch») та застосовується операція обертання базової бобишки «Revolved boss/base» (рис. 5.1).

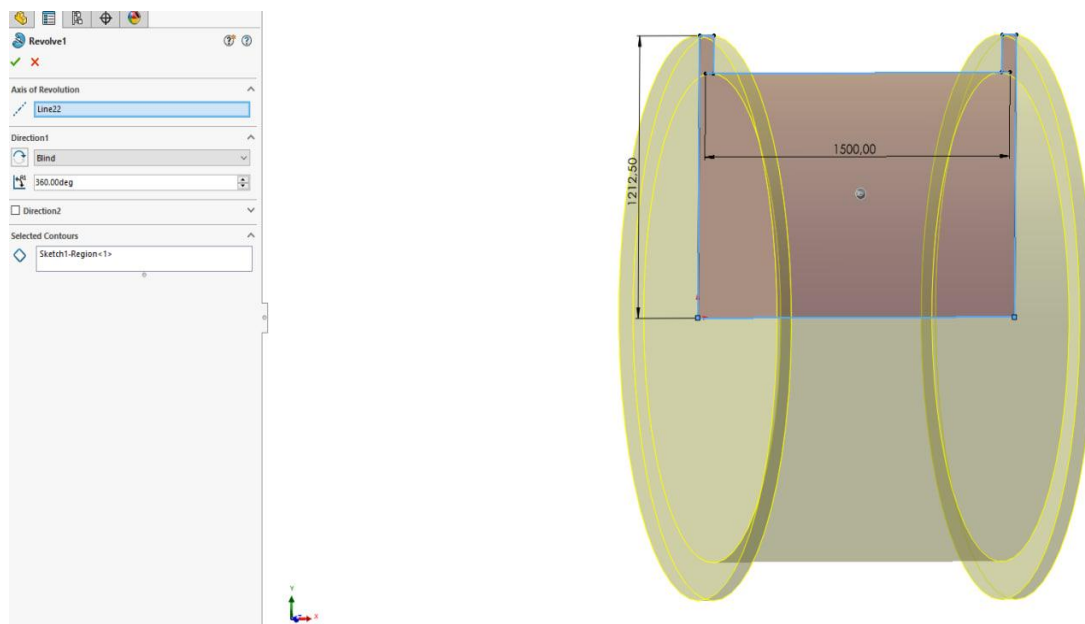


Рисунок 5.1 – Операція «Revolved boss/base»

Наступним етапом є вирізання отвору внутрішніх стінок барабану за допомогою команди витягнутого вирізу «Cut-Extrude» (рис. 5.2).

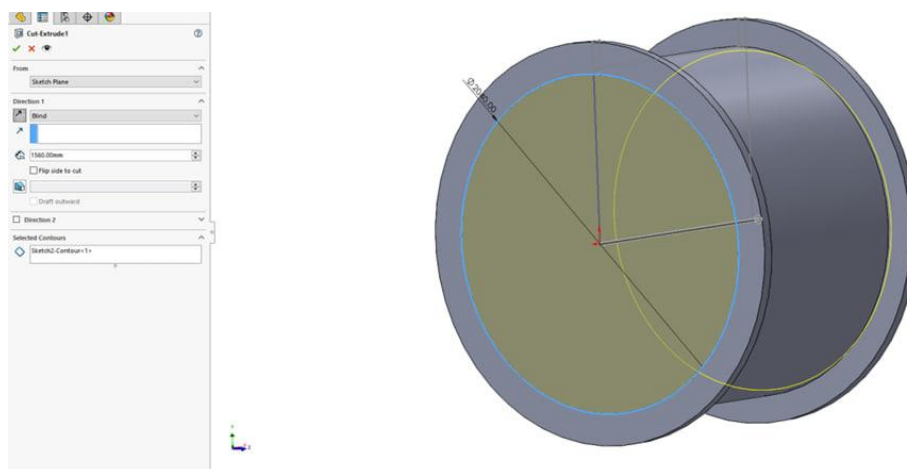


Рисунок 5.2 – Операція «Cut-Extrude»

Далі формуються отвори під кріпильні болти (рис. 5.3).

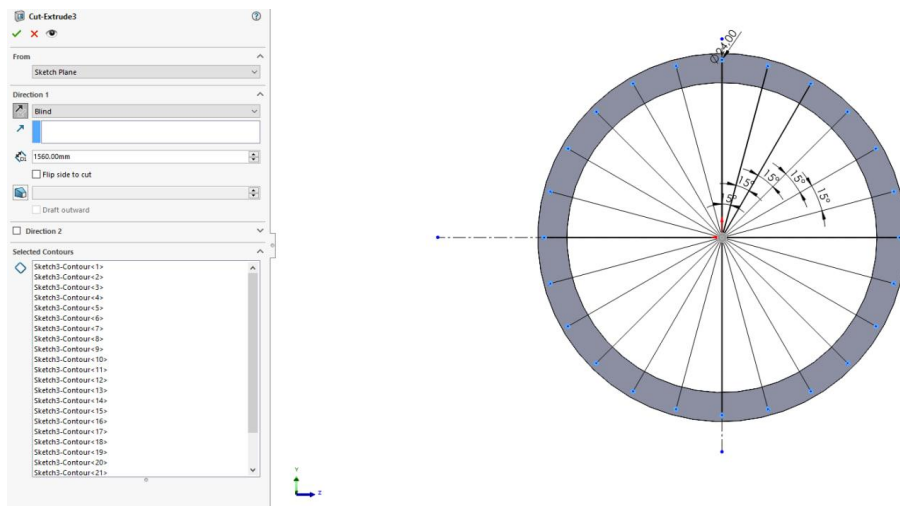


Рисунок 5.3 – Формування отворів під кріпильні болти

Для створення деталі «Зубчасте колесо» було використано бібліотеку стандартних виробів «Toolbox», після чого виконано отвори під кріпильні болти за допомогою команди «Cut-Extrude» (рис. 5.4).

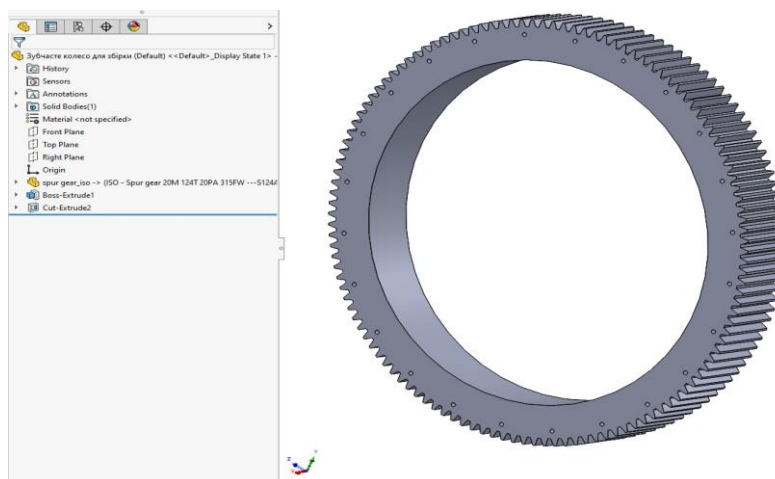


Рисунок 5.4 – Деталь «Зубчасте колесо» з отворами

При створенні деталі «Завантажувальна частина» формується новий ескіз («Sketch»), який обертається за допомогою команди «Revolved boss/base» (рис.5.5).

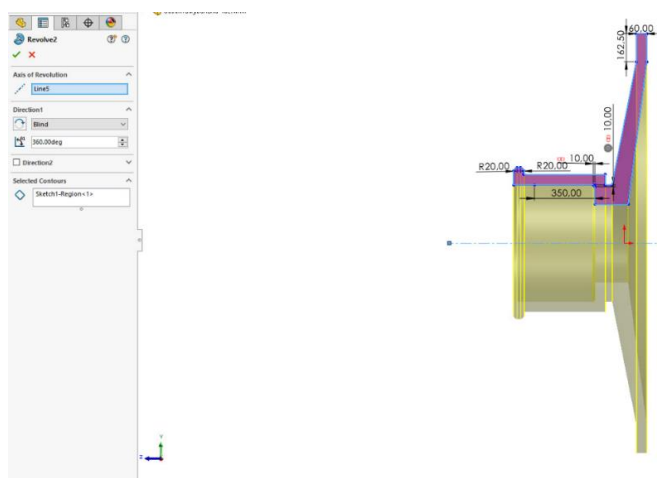


Рисунок 5.5 – Створення завантажувальної частини (операція «Revolved boss/base»)

Отвори під кріпильні болти виконуються аналогічно за допомогою операції «Cut-Extrude» (рис. 5.6).

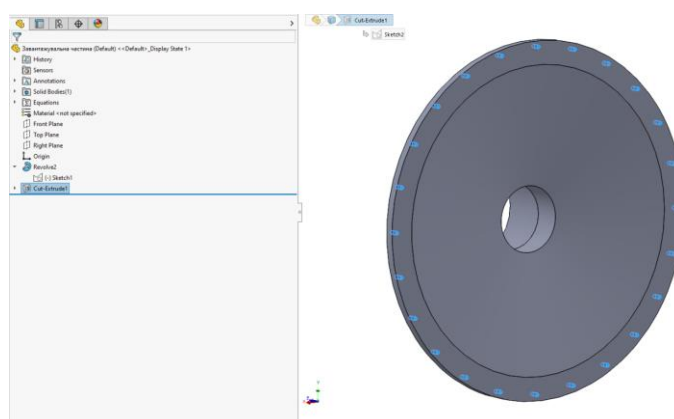


Рисунок 5.6 – Створення отворів у завантажувальній частині

З метою спрощення розрахункової моделі та прискорення процесу проектування, побудова барабанного валу базувалася на принципах часткової конструктивної симетрії. Після створення топології завантажувальної цапфи, деталь «Розвантажувальна частина» була сформована за допомогою операцій копіювання вихідної геометрії. Такий підхід виключає дублювання роботи та забезпечує оптимальну цілісність моделі для коректної генерації скінченно-елементної сітки.

Наступним кроком є створення деталі «Футерівка». Для цього створюється новий ескіз («Sketch») та за допомогою команди витягування базової бобишки «Extruded boss/base» задається довжина 500 мм (рис. 5.7).

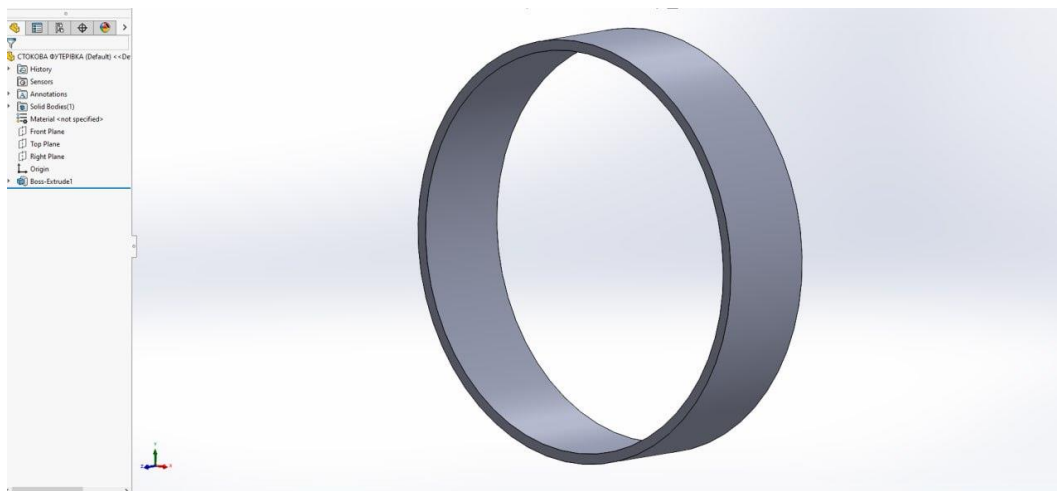


Рисунок 5.7 – Операція «Extruded boss»

5.4 3D-моделювання модернізованого барабану в системі SolidWorks

Під час 3D-моделювання модернізованого вузла в САПР SOLIDWORKS за базову основу було взято геометрію стандартної (стокової) футерувальної плити. Для формування інноваційного діагонального профілю на її робочій поверхні було створено новий двовимірний ескіз (Sketch) (рис. 5.8). Подальше тиражування та рівномірний розподіл створеного діагонального виступу по всій внутрішній циліндричній поверхні барабану здійснювалося за допомогою інструменту кругового масиву (Circular Pattern) (рис. 5.9).

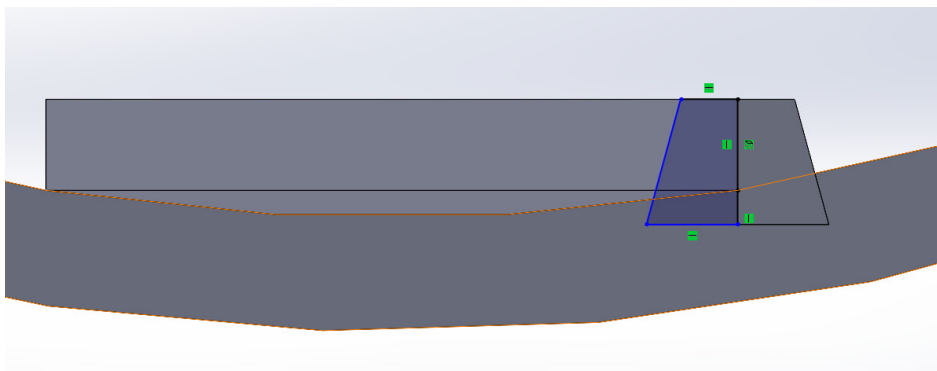


Рисунок 5.8 – Створення нового ескізу «Sketch»

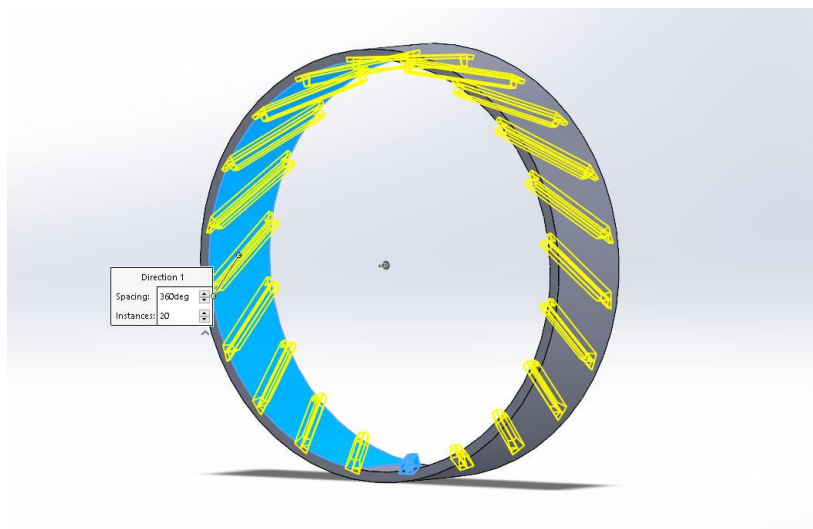


Рисунок 5.9 – Операція «Circular Pattern»

Після виконання всіх етапів проектування та складання утворюються фінальні 3D-моделі стокового та модернізованого однокамерного кульового млина (рис. 5.10, 5.11.).

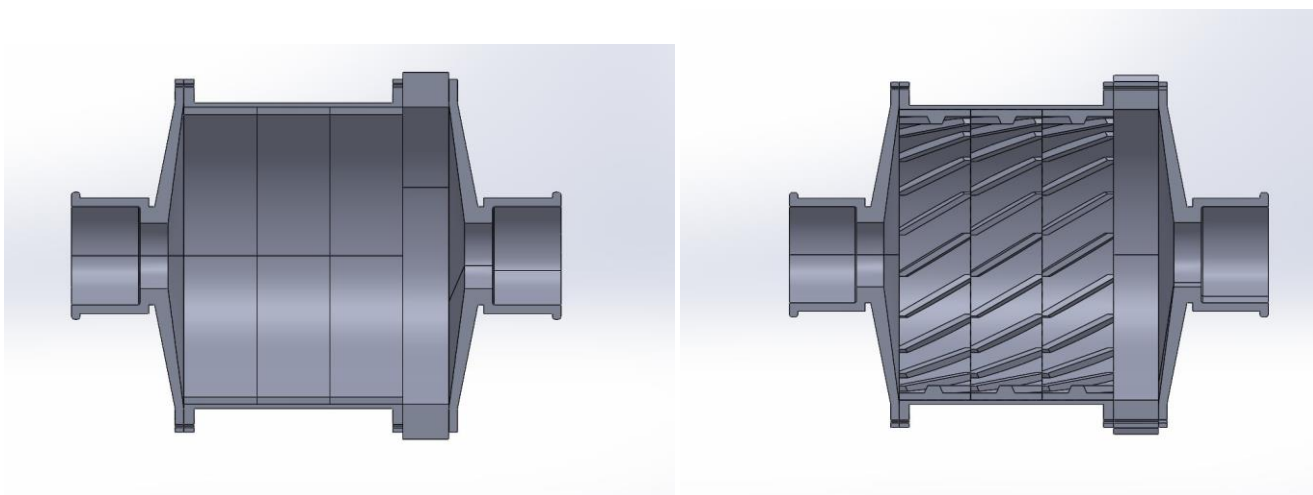


Рисунок 5.10, 5.11 – Збірний стоковий та модернізований кульовий млин у розрізі

5.5 Розрахунки на міцність немодернізованого барабану за допомогою програмного комплексу ANSYS

Для виконання необхідних розрахунків нашої 3D-моделі базової деталі використовуємо програмне забезпечення ANSYS 2019 R2 [19].

Для початку нам потрібно обрати необхідні модулі. В нашому випадку це буде Static Structural (рис5.12)



Рисунок 5.12 – Середовище виконання розрахунків

Також потрібно перед початком задати характеристики матеріалу конструкції (рис. 5.13), Футерівка – сталь 110Г13Л ДСТУ 8781:2018 [20], Барабан – сталь 09Г2С ДСТУ 8541:2015 [21], Завантажувальна та Розвантажувальна частина – сталь Л35 ДСТУ 8781:2018, Зубчасте колесо – ХЛ40 ДСТУ 8781:2018.

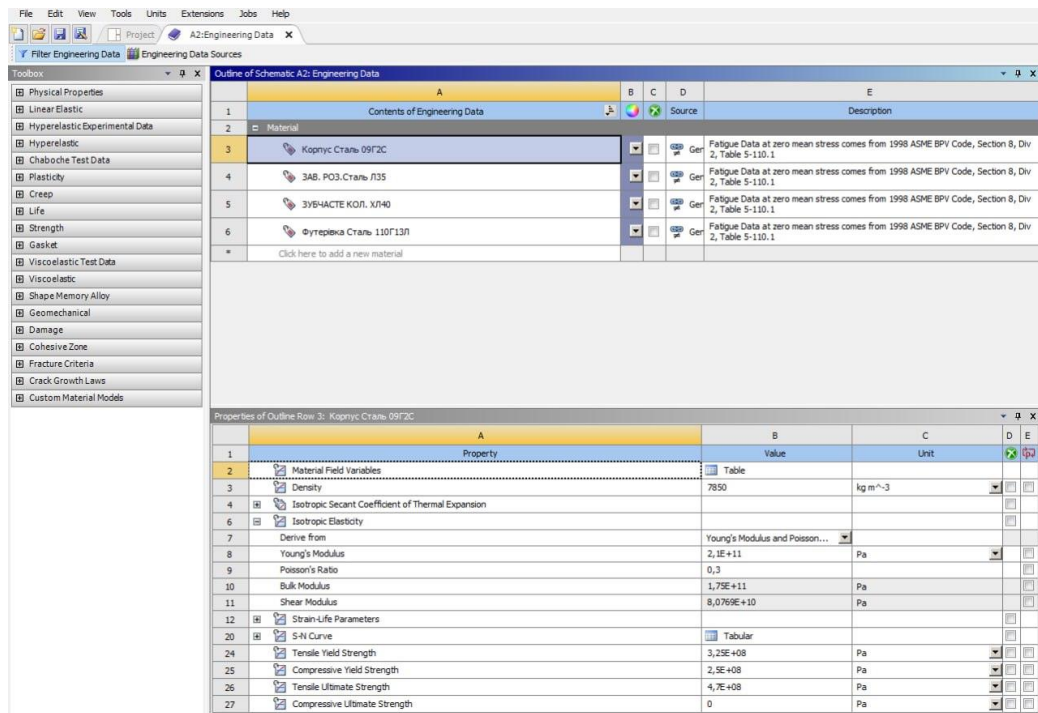


Рисунок 5.13 – Середовище задання характеристик матеріалів конструкції

Переходимо в пункт «Geometry», далі ми імпортуємо створену нами раніше 3D-модель, потім за допомогою команди «Symmetry» створюємо розріз, для зручності подальших розрахунків (рис. 5.14).

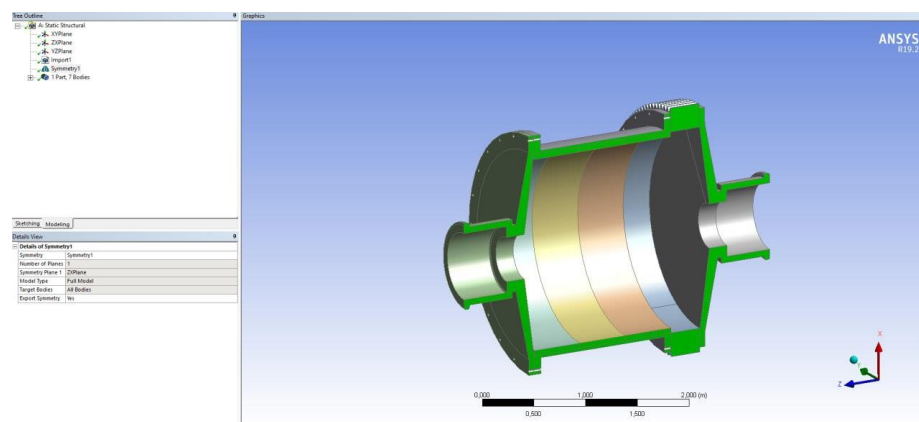


Рисунок 5.14 – Середовище створення геометрії, виконання розрізу

Після цього об'єднуємо всі деталі в одне ціле, для максимальної швидкості розрахунку конструкції використовуємо стандартну сітку в пункті «Model», перевагою якої є висока швидкість рахування конструкції, та саме основне – це те, що після цього значення сітки і дрібніше – значення результатів суттєво не змінюються.

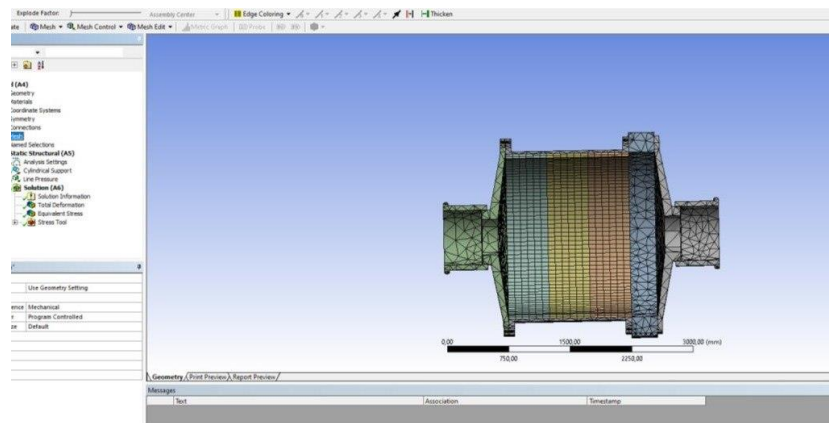


Рисунок 5.15 - Вигляд стандартної сітки

Маючи дані з таблиці (5.1) розраховуємо навантаження на мм, спочатку знаходимо силу F за формулою

$$F = m \cdot g,$$

$$F = 5580 \cdot 9,81 / 2 = 54739 \text{ N}$$

Тепер поділимо отриману силу на довжину футерівки, яка складає 1500мм, щоб отримати лінійне навантаження (q).

$$q = \frac{54739}{1500} = 36,49 \text{ N/мм}$$

Навантаження задається по осі X » (рис. 5.16).

Наступним кроком задаємо лінійне навантаження «Line pressure» (рис. 5.16).

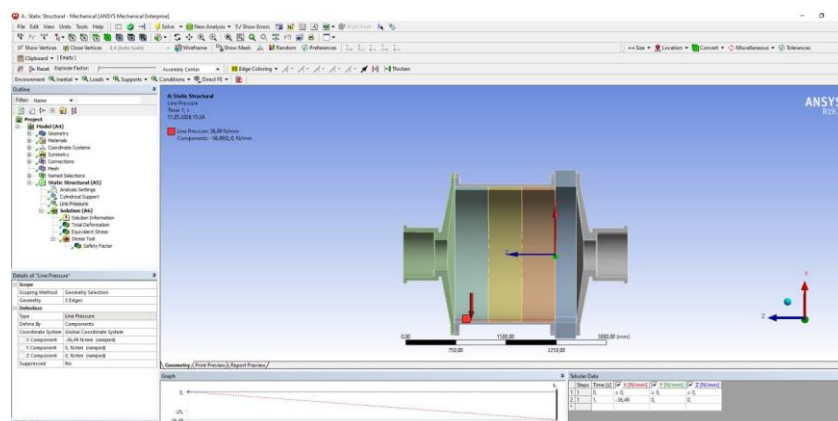


Рисунок 5.16 - «Line pressure» Лінійне навантаження.

Також треба зробити закріплення барабану, його виконуємо через інструмент «Cylindrical Support», який накладається на циліндричні поверхні опорних частин (рис. 5.17.).

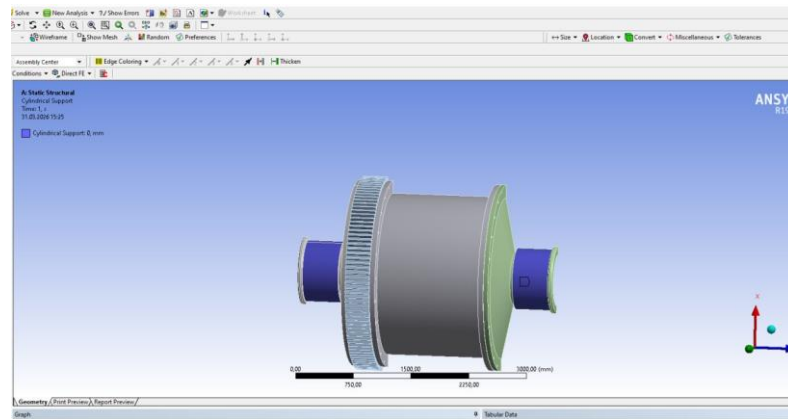


Рисунок 5.17 - «Cylindrical Support» Циліндричне закріплення.

Також треба додати вагу самого барабану, для цього додаємо гравітацію «Standart Earth Gravity» (рис. 5.18).

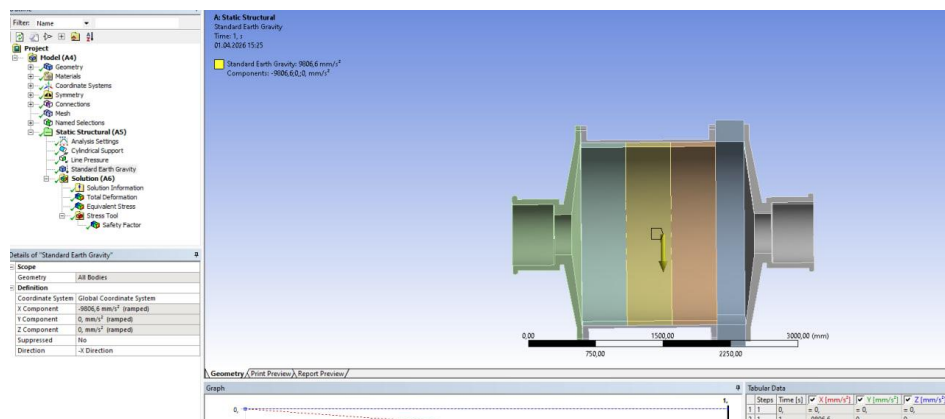


Рисунок 5.18 – «Standart Earth Gravity» Сила Тяжіння Землі

Отримуємо результат «Загальні Переміщення» (рис. 5.19.).

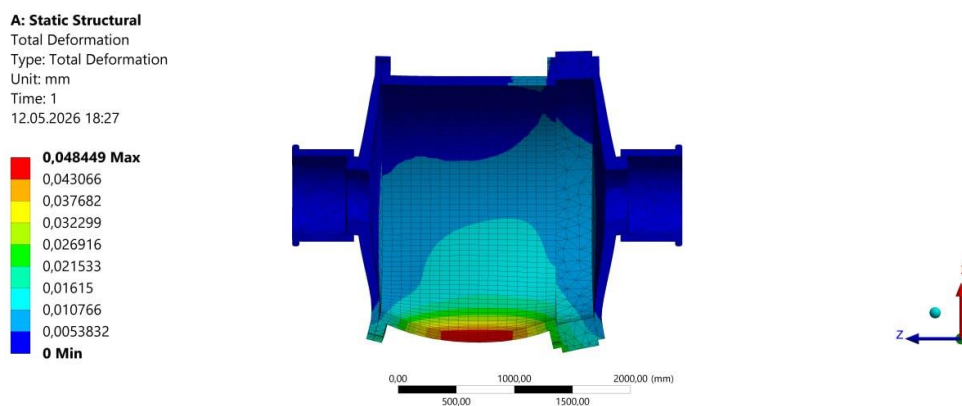


Рисунок 5.19 – «Загальні Переміщення»

Отримуємо результат «Еквівалентних напружень» (рис. 5.20).

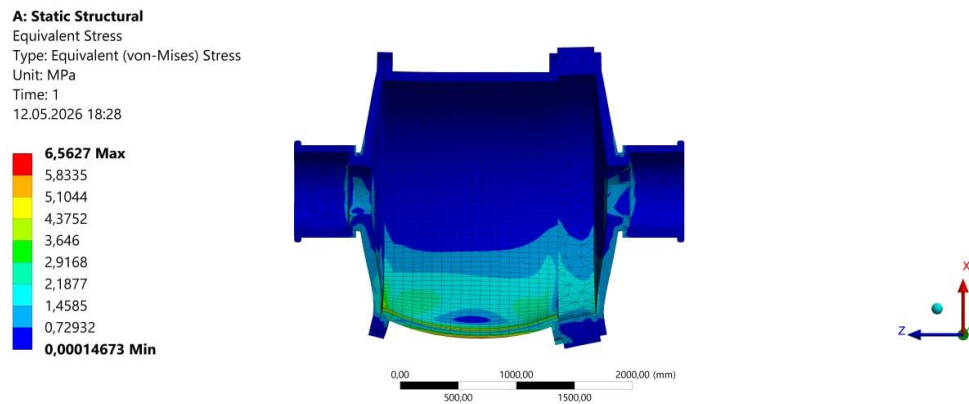


Рисунок 5.20 – «Еквівалентних напружень»

Отримуємо результат «Запасу Міцності» (рис. 5.21).

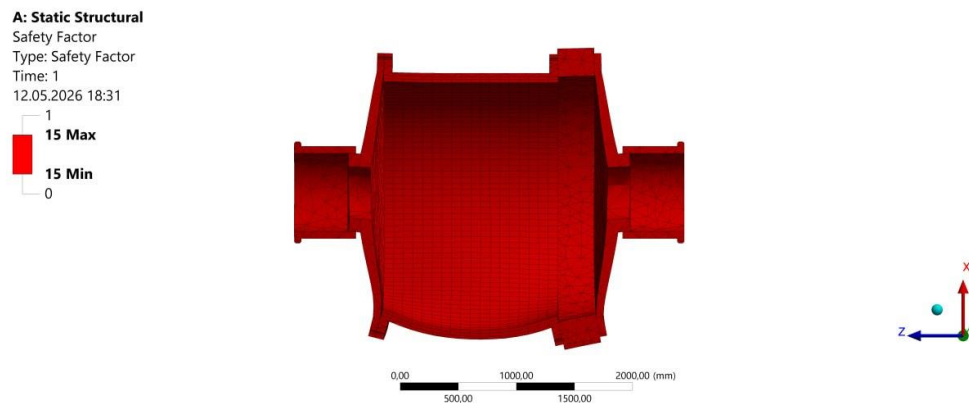


Рисунок 5.21 – «Запас Міцності»

Отримані дані свідчать про те, що базова конструкція здатна витримувати задані експлуатаційні навантаження, проте має певний резерв для оптимізації. Визначені параметри напружено-деформованого стану є еталонними та будуть використані для подальшого порівняльного аналізу з модернізованим варіантом барабана для обґрунтування доцільності запропонованих конструктивних змін.

5.6 Розрахунки на міцність модернізованого барабану за допомогою програмного комплексу ANSYS

Для розрахунку модернізованого ролика копіюємо оригінальний проект та замінюємо геометрію на 3Д-модель модернізованого барабану (рис. 5.22).

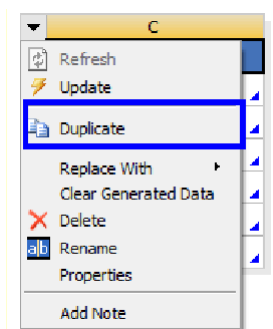


Рисунок 5.22 – Створення дублікату проекту

Наступним етапом є перевірка міцності запропонованої модернізованої конструкції. Щоб результати порівняння з базовим варіантом були достовірними, ми зберігаємо параметри прикладених силових факторів та властивості обраного матеріалу без змін. Процедура налаштування розрахункової моделі дублює попередню, за винятком зміни нових конструктивних елементів (рис. 5.23).

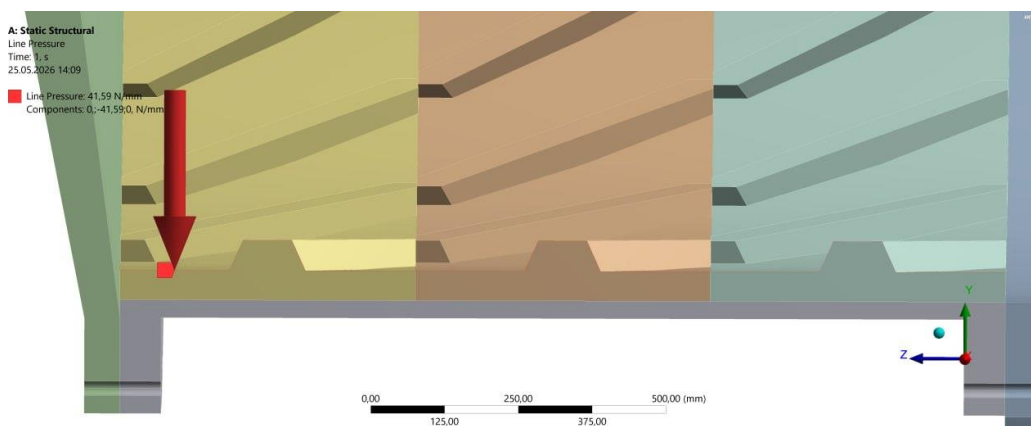


Рисунок 5.23 – «Line pressure» Оновлене лінійне навантаження

У результаті виконання заданого алгоритму обчислень отримуємо фінальні дані щодо модернізованого барабану (рис. 5.24, 5.25, 5.26).

Отримуємо результат «Загальні Переміщення» (рис. 5.24.).

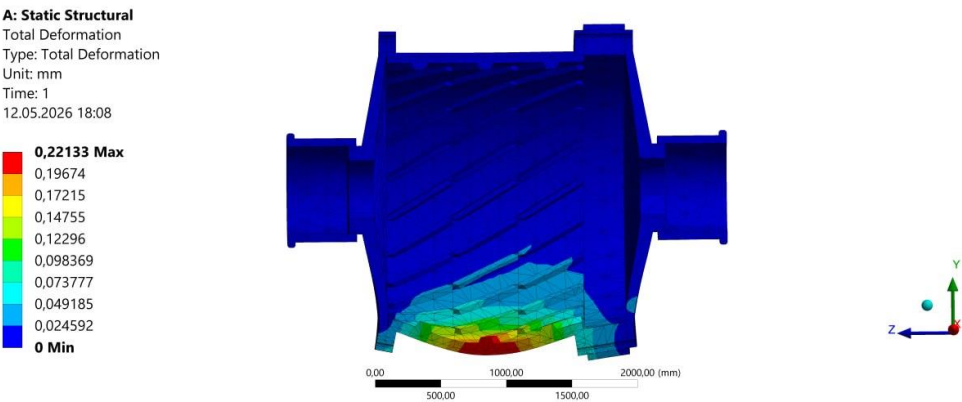


Рисунок 5.24 – «Загальні Переміщення»

Отримуємо результат «Еквівалентних напружень» (рис. 5.25).

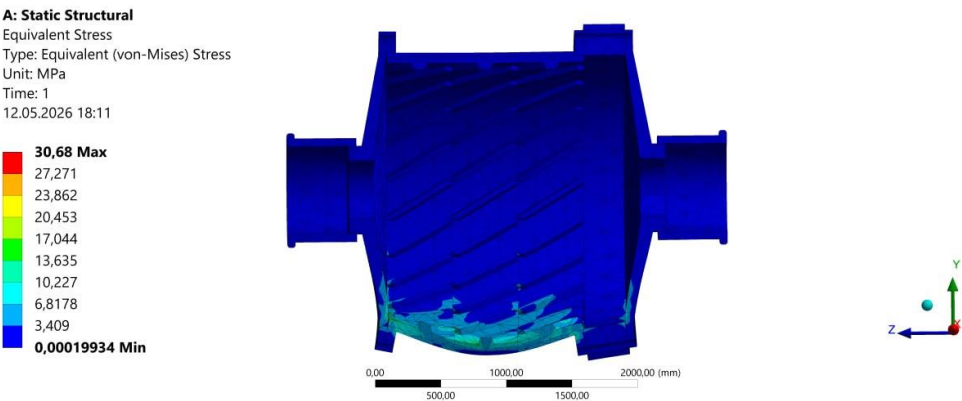


Рисунок 5.25 – «Еквівалентних напружень»

Отримуємо результат «Запасу Міцності» (рис. 5.26).

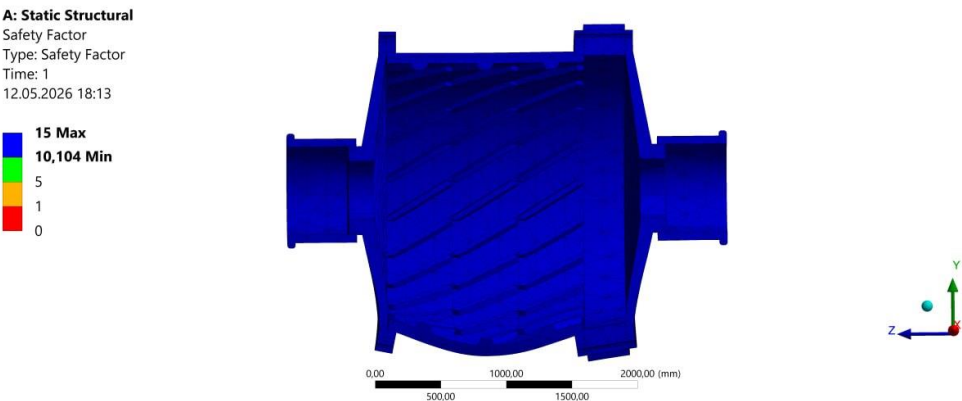


Рисунок 5.26 – «Запас Міцності»

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ

У результаті проведеного комп'ютерного моделювання встановлено, що впровадження діагонального виступу призвело до очікуваної зміни масо-габаритних та міцнісних показників агрегату. Маса модернізованої конструкції збільшилася з 5580 кг до 6360 кг (+13,98 %) за рахунок додаткового об'єму матеріалу, необхідного для формування суцільного напрямного профілю. Аналіз напружено-деформованого стану показав зростання максимальної загальної деформації з 0,048 мм до 0,221 мм (+356,83 %), а також збільшення пікових еквівалентних напружень (за Мізесом) з 6,56 МПа до 30,68 МПа (+367,49 %). Відповідно, мінімальний коефіцієнт запасу міцності знизився з 15 до 10,10 (–32,64 %).

Отримані показники та різке зростання напружень пояснюються зміною геометрії робочої поверхні та перерозподілом силових факторів безпосередньо на нові виступаючі елементи футеровки (рис. 5.23). Варто зазначити, що цей стрибок має виключно локальний характер. З огляду на специфіку прикладання навантаження інструментом Line Pressure у програмному середовищі ANSYS, додаткові грані та кути оновленого профілю спрацювали як штучні концентратори, прийнявши на себе пікові значення напружень. Водночас на основному несучому тілі металевого барабана жодних критичних змін чи небезпечних деформацій не зафіксовано.

Незважаючи на зниження мінімального коефіцієнта запасу міцності до 10,10, цей показник залишається більш ніж достатнім (із десятикратним запасом) для безпечної та надійної експлуатації обладнання. Таким чином, запропонована модернізація футерувальних плит повністю витримує задані робочі навантаження, дозволяючи інтенсифікувати процес подрібнення клінкеру без ризику руйнування чи виникнення пластичних деформацій у конструкції однокамерного млина.

5.7 Виконання параметричного розрахунку за допомогою мови програмування C++

Сучасне проектування промислового обладнання вимагає високої точності та швидкості обробки масивів технічних даних. Виконання параметричного розрахунку за допомогою об'єктно-орієнтованої мови програмування C++ [22] дозволяє автоматизувати складні обчислення та мінімізувати ймовірність математичних помилок під час визначення ключових експлуатаційних характеристик.

Розробка власного розрахункового алгоритму, реалізованого, наприклад, у середовищі Visual Studio, дає змогу оперативно виконувати багаторазовий перерахунок критичних параметрів машин (зокрема, критичної частоти обертання чи кінематичних навантажень) у разі зміни вихідних масових або габаритних показників. Такий програмний підхід значно прискорює пошук оптимальних конструктивних рішень та підвищує загальну ефективність проектування механізму.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунків

№	Вхідні дані	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Номінальний внутрішній діаметр барабана	D	$N = 3.05 \text{ кВт}$	м
2	Номінальна довжина барабана	L	$n_b = 107 \text{ об/хв}$	м
3	Робоча частота обертання барабана	$n_{\text{роб.}}$	$i = 6.54$	об/хв
4	Коефіцієнт заповнення млина молотильними тілами	φ	-	-
5	Насипна густина молотильних тіл (сталевих куль)	ρ_m	-	т/м ³

Результати розрахунків за допомогою мови програмування C++ (рис. 5.27)

```
=====
      РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОДНОКАМЕРНОГО МЛИНА
=====
1. Внутрішній діаметр барабана (D): 2.10 м
2. Довжина барабана (L):           1.50 м
-----
[Результат формули 1]
Критична частота обертання (n_kr): 29.19 об/хв
Фактична робоча частота (n_rob):  24.60 об/хв
Відносний коефіцієнт швидкості (psi): 0.84
    -> Режим: ВОДОСПАДНИЙ (оптимально для клінкеру)
-----
[Результат формули 2]
Корисний об'єм барабана (V):       5.20 м^3
-----
[Результат формули 3]
Маса молольних тіл (G_k):         5.57 т
=====
[Execution Finished]
```

Рисунок 5.27 – «Результати обчислень»

На (рис. 5.27) представлено результати генерації коду із виведенням обчислених параметрів безпосередньо у вікно консолі. Сформовані програмою дані чітко фіксують оптимізовану масу молольних тіл (5,57 т) та відносний коефіцієнт швидкості (0,84), що відповідає заданому технологічному режиму.

ВИСНОВКИ

З метою автоматизації проектних обчислень було виконано параметричний розрахунок базових характеристик однокамерного кульового млина за допомогою мови програмування C++ у середовищі розробки Visual Studio. Розроблений програмний алгоритм забезпечує швидкий та точний розв'язок математичних залежностей із виведенням результатів безпосередньо у консоль, що наочно продемонстровано вище. Збіг отриманих машинних даних із попередніми етапами проектування повністю підтверджує правильність визначених технологічних параметрів (зокрема, маси молольного завантаження) та доводить коректність обраного водоспадного режиму роботи агрегату.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Відповідно до положень статті 21 Закону України «Про охорону праці» [23], будь-які виробничі приміщення, технологічні лінії, машини та механізми, що проектуються, виготовляються або реконструюються, повинні повністю відповідати чинним нормативно-правовим актам з питань охорони праці. Враховуючи специфіку дипломного проєкту «Виготовлення цементу сухим способом з модернізацією кульового однокамерного млина», ключовим завданням є створення максимально безпечних та гігієнічних умов для персоналу цементного заводу. Для ефективного запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням, ідентифікація шкідливих виробничих факторів має здійснюватися ще на етапі конструкторської розробки обладнання.

Процес помелу цементного клінкеру сухим способом відбувається у просторому виробничому цеху, обладнаному потужними системами аспірації, оскільки сухий метод характеризується інтенсивним пилоутворенням. Зона обслуговування млина оснащена комбінованою системою освітлення, а також струмонепровідним покриттям підлоги для захисту від ураження електричним струмом. Загальна площа виробничого приміщення (дільниці помелу) для даної технологічної лінії становить 1008 м² (із габаритними розмірами у плані 24×42 м), а його повний будівельний об'єм складає 18144 м³ при висоті цеху 18 м, що повністю забезпечує необхідний повітряний куб для працюючої зміни та дозволяє раціонально розмістити великогабаритний агрегат.

6.1 Виявлення та аналіз небезпек та шкідливих умов при роботі з кульовим млином

Проектований кульовий млин для сухого помелу цементу є великогабаритним промисловим агрегатом. Модернізація однокамерного млина має на меті не лише підвищення продуктивності, а й оптимізацію енергозатрат. Оскільки обладнання інтегрується в загальну електромережу цементного заводу, воно вимагає суворого дотримання стандартів електробезпеки [24].

Безперервна експлуатація кульового барабана супроводжується генерацією інтенсивних акустичних та вібраційних коливань, що є фактором ризику розвитку вібраційної хвороби або приглухуватості у робітників. Крім того, сухий помел клінкеру з добавками (гіпс, шлак) призводить до утворення дрібнодисперсного цементного пилу, що

несе загрозу для дихальної системи (ризик силікозу). Також значну небезпеку становлять відкриті обертові елементи приводу агрегату.

Таким чином, під час експлуатації модернізованого млина присутні такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- забруднення повітря робочої зони цементним пилом та підвищена температура;
- небезпека ураження електричним струмом;
- ризик травмування рухомими деталями механізмів;
- високий рівень промислового шуму;
- вібраційне навантаження;
- недостатність освітлення робочих зон.

6.2 Повітря робочої зони

Специфіка сухого способу виробництва полягає в тому, що матеріали, які надходять на помел (особливо клінкер після випалу), можуть мати підвищену температуру. Завдяки теплоізоляції корпусу млина та системі вентиляції, температура зовнішніх поверхонь обладнання не повинна перевищувати 45 °С. Нормативні показники мікроклімату на робочих місцях регламентуються санітарними нормами [25]. Факторні параметри температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 — Оптимальні параметри мікроклімату робочої зони

Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний та перехідний	17 – 22	40 – 60	0,2 – 0,3
Теплий	22 – 27	40 – 60	0,2 – 0,5

Робота машиніста млина класифікується як фізична праця середньої важкості (категорія ІІа). Рівень енерговитрат організму для даної категорії виконуваних робіт становить точне значення 210 Вт (що відповідає 180 ккал/год). Підтримка зазначених

параметрів забезпечується комбінованою системою припливно-витяжної вентиляції. Для локалізації та видалення цементного пилу безпосередньо біля вузлів завантаження/вивантаження застосовується місцева аспірація (рукавні фільтри та циклони), що дозволяє знизити концентрацію пилу до безпечних нормативних значень (менше ніж 6 мг/м^3).

6.3 Електробезпека

Враховуючи те, що привод кульового млина оснащений високовольтним синхронним електродвигуном великої потужності, питання електробезпеки є критичним. Згідно з вимогами Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС) [26], усі металеві неструмопровідні частини млина (станина, кожухи, корпуси двигунів) підлягають обов'язковому захисному заземленню.

Електропроводка прокладається у спеціальних захисних металорукавах або лотках, що унеможлиблює її механічне пошкодження. Оперативний персонал забезпечується діелектричними засобами захисту (килимки біля пультів керування, діелектричні боти та рукавички). Електрообладнання регулярно проходить випробування опору ізоляції. На випадок позаштатних ситуацій лінія оснащена системами автоматичного відключення живлення (ПЗВ).

6.4 Безпека при роботі з рухомими та обертовими частинами

Однокамерний кульовий млин містить масивні обертові деталі: безпосередньо барабан, вінцеву шестерню, муфти, вали та приводний редуктор. З метою запобігання потраплянню одягу чи кінцівок працівників у рухомі механізми, всі передачі закрито суцільними або сітчастими захисними огороженнями.

Конструкція огорожень виконана таким чином, що їх зняття неможливе без використання спеціального інструменту. Знімна та відкидна захисна арматура оснащена кінцевими вимикачами, які блокують запуск електродвигуна при відкритому кожусі. Відповідно до вимог безпеки, всі захисні екрани та небезпечні зони фарбуються у сигнальний жовтий колір, а поруч розміщуються знаки безпеки. На пультах керування і безпосередньо біля агрегату змонтовані червоні кнопки аварійної зупинки.

6.5 Шум

Процес подрібнення цементного клінкеру сталевими кулями генерує високий рівень шуму. На робочих місцях поблизу млина звуковий тиск може сягати 95–105 дБА, тоді як санітарна норма (ДСН 3.3.6.037-99) для таких приміщень становить 80 дБА [27].

Оскільки повністю усунути шум від ударів молоткових тіл неможливо, застосовується комплексний підхід:

1. Технічний: використання гумових або композитних прокладок під бронеплити (футеровку), встановлення шумопоглинальних кожухів навколо приводу.
2. Організаційний: облаштування звукоізованої kabini спостереження для машиніста млина.
3. Індивідуальний: обов'язкове використання сертифікованих засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху. Для захисту машиніста передбачено постійне використання протишумових навушників моделі 3М Peltor Optime II (H520A) або вітчизняного аналога Dnipro-M Ultra із високим коефіцієнтом зниження шуму (SNR 31–32 дБ), що дозволяє знизити акустичне навантаження до нормативного рівня. У разі комбінованого захисту чи короткочасних обходів лінії допускається застосування протишумових вкладишів (берушів) моделі 3М 1100.

6.6 Вібрація

Експлуатація масивного барабана, що обертається з несиметричним завантаженням матеріалом та кулями, створює значні динамічні навантаження. Джерелами вібрації виступають головні підшипникові опори, редуктор та двигун. Перевищення допустимих норм вібрації може призвести до руйнування будівельних конструкцій та погіршення самопочуття персоналу.

Для гасіння вібраційних коливань фундаменти млина та приводу відокремлюють від фундаменту самої будівлі цеху віброізоляційними швами. Усі робочі площадки та сходи виготовляються з вібропоглинальними накладками. Обладнання регулярно проходить вібродіагностику, яка дозволяє виявити дисбаланс ротора або знос підшипників на ранніх стадіях.

6.7 Промислове освітлення

Якісне освітлення є необхідною умовою для безпечного контролю за помелом цементу. Згідно з вимогами ДБН В.2.5-28:2018, у цеху застосовано систему комбінованого освітлення [28]. Природне світло надходить через віконні прорізи та світлові аераційні ліхтарі в даху.

Враховуючи запиленість середовища, для штучного освітлення встановлено піло- та вологозахищені світлодіодні (LED) світильники загального освітлення. Для локальної підсвітки вузлів (підшипників, редуктора) застосовуються місцеві світильники на безпечній напрузі 24 В. Обов'язково передбачено мережу аварійного (евакуаційного) освітлення, яка живиться від незалежного джерела на випадок знеструмлення цеху.

6.8 Охорона навколишнього середовища

Експлуатація однокамерного кульового млина для виробництва цементу сухим способом супроводжується негативним впливом на довкілля, основними видами якого є інтенсивні викиди тонкодисперсного цементного пилу в атмосферне повітря, акустичне забруднення, а також утворення твердих металевих відходів і відпрацьованих мастильних матеріалів під час технічного обслуговування. Загальні вимоги у сфері охорони довкілля встановлює Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

Для зниження викидів цементного пилу в атмосферу я рекомендую використовувати комплексну систему аспірації млина, яка включає апарати попереднього грубого очищення (циклони) та рукавні фільтри з імпульсним регенеративним продуванням. Ефективність очищення запиленого повітря сучасними рукавними фільтрами становить не менше 99,9 %. Вловлений пил герметичними трактами повністю повертається у виробничий процес, що робить технологію безвідходною в частині сировини. Дотримання гранично допустимих викидів забезпечується відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» [29].

Для запобігання забрудненню ґрунту та раціонального поводження з відходами я рекомендую зношені металеві деталі (відпрацьовані молотильні тіла та футерувальні плити барабана млина, зокрема плити з діагональним виступом) складувати на спеціально обладнаному майданчику з твердим покриттям для подальшої передачі на переплавлення

як металобрухт. Відпрацьовані мастильні матеріали з підшипникових вузлів та редуктора привода я рекомендую збирати в герметичну марковану тару та передавати спеціалізованим підприємствам на утилізацію або регенерацію відповідно до Закону України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX [30].

Я зробив висновок, що впровадження зазначених природоохоронних заходів забезпечує мінімізацію негативного впливу роботи ділянки помелу на атмосферне повітря та ґрунт і повністю відповідає вимогам чинного природоохоронного законодавства.

Висновок до розділу

Аналіз умов праці при експлуатації модернізованого однокамерного кульового млина сухого помелу цементу свідчить про наявність низки небезпечних факторів. Запроєктовані рішення щодо електробезпеки, освітлення, віброізоляції та захисту від рухомих частин повністю відповідають чинним нормам.

Однак, враховуючи специфіку агрегату, повністю нівелювати вплив шуму та пилу інженерними методами складно. Тому рекомендується суворий контроль за використанням персоналом засобів індивідуального захисту: сучасних промислових респіраторів (наприклад, класу FFP3) для захисту дихальних шляхів та протишумових навушників зі ступенем приглушення не менше 30 дБ.

7. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Опис і призначення деталі

Напівмуфта є відповідальним елементом приводу барабанного млина. Її головна функція полягає у надійному з'єднанні вала електродвигуна з редуктором для передачі крутного моменту. Геометрія деталі та її основні конструктивні розміри наведені на ескізі (рис. 7.1).

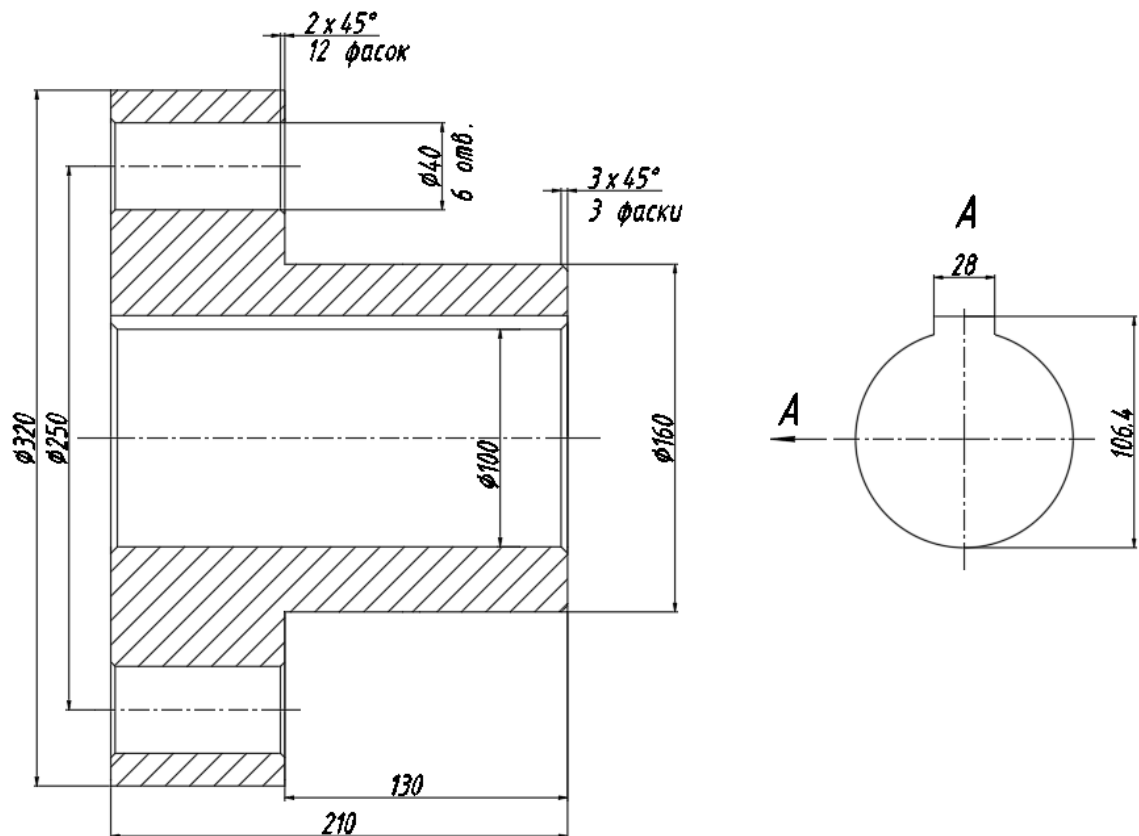


Рисунок 7.1 – Ескіз напівмуфти

Матеріал деталі — сірий чавун СЧ 15 ГОСТ 1412-85. Геометрія вихідної заготовки (рис. 7.2) відрізняється високою технологічністю: вона має базові форми без складних конструктивних переходів. Усі припуски, залишені на заготовці, а також можливі похибки поверхні, будуть повністю усунені на наступних етапах механічної обробки шляхом зняття стружки [31].

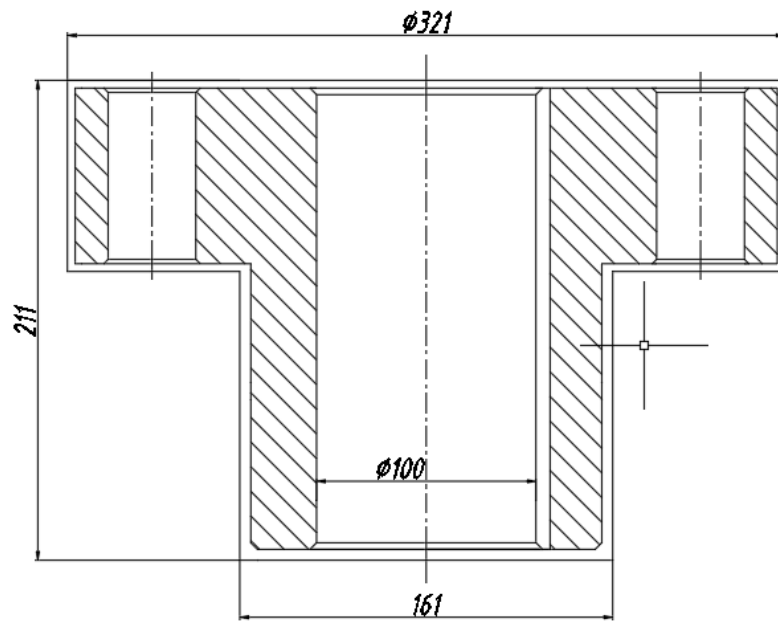


Рисунок 7.2 – Заготовка напівмуфти

7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі

Розроблений технологічний процес виготовлення напівмуфти складається з токарних, протяжних та свердлильних операцій. Детально описаний у МК, ОК, КЕ [32].

[illegible]

Дубл.														
Взамін.														
Підпис									Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата	

Розробив	Шпак О.Л			КПІ ім. Ігоря Сікорського										
Перевірів	Борщик С.О.													
Н. контр.				НАПІВМУФТА								Н		005

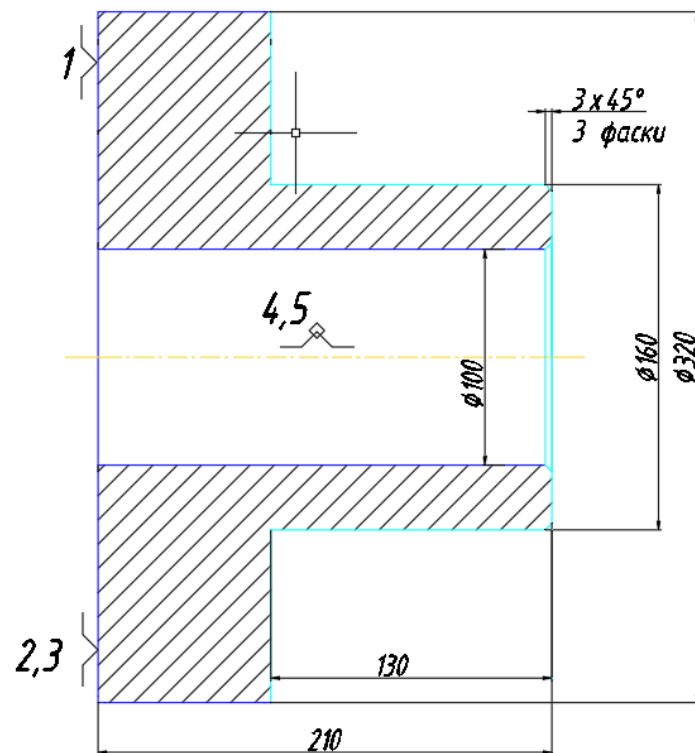
				Назва операції		Матеріал						
				Розмітка		СЧ 15 ГОСТ 1412-85						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ		Коод	
					кг							
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми				
				Токарно-гвинторізний верстат 16К20								
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР				
				Емульсія								

Р		Інструмент	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1. Точити Ø 160 начорно;	Різець прохідний	Ø160	130	2,5	1	0,5	137	100
T02	2. Точити Ø 160 начисто;	Різець прохідний	Ø160	130	0,5	1	0,25	178	130
O03	3. Підрізати торці;	Різець підрізний	Ø320	160	2,0	2	0,4	120	100
O04	4. Зняти фаски 3x45°.	Різець фасковий	Ø320	3	-	1	0,3	178	130
T05									
T06									
P07									
O08									
O09									
O10									
OK	Обробка різанням								

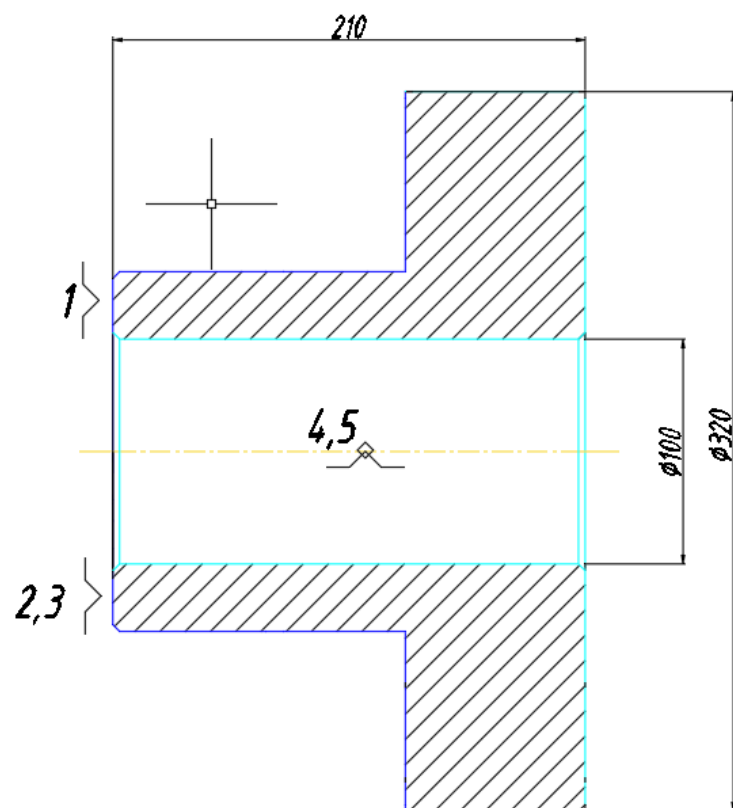
Взамін.														
Підпис									Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата	
Розробив	Шпак О.Л.						КПІ ім. Ігоря Сікорського							
Перевірів	Борщук С.О.													
Н. контр.							НАПІВМУФТА			Н			015	
				Назва операції				Матеріал						
				Розмітка				СЧ 15 ГОСТ 1412-85						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри			МЗ		Коод		
					кг									
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
				Горизонтально-протяжний верстат 7Б56										
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
								Емульсія						
Р				Інструмент		D або B		L	t	i	s	n	v	
P01	1.Протягнути шпонковий паз b=28					b=28		140	-	1	0,06	-	4	
T02														
O03														
O04														
T05														
T06														
P07														
O08														
O09														
O10														
OK	Обробка різанням													

Взамін.														
Підпис								Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата		
Розробив	Шпак О.Л						КПІ ім. Ігоря Сікорського							
Перевірів	Борщик С.О.													
НАПІВМУФТА											Н		020	
Н. контр.														
				Назва операції				Матеріал						
				Розмітка				СЧ 15 ГОСТ 1412-85						
				Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ		Коод			
					кг									
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
				Вертикально-свердильний верстат 2Н125										
				То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
				Емульсія										
P	Інструмент			D або B	L	t	i	s	n	v				
P01	1. Свердлити 6 отв. Ø 40;			Свердло Ø 39	Ø 39	80	7,5	6	0,25	398	20			
T02	2. Розвернути ботв. начорно;			Розвертка Ø 39,8	Ø 39,8	80	0,4	6	0,4	159	8			
O03	3. Розвернути ботв. Ø 40 начисто ;			Розвертка Ø 40	Ø 40	80	0,2	6	0,4	119	6			
O04	4. Зняти фаски 2x45°(12шт.).			Зенківка 90°	Ø 40	2	-	6	0,2	300	-			
T05														
T06														
P07														
O08														
O09														
O10														
OK	Обробка різанням													

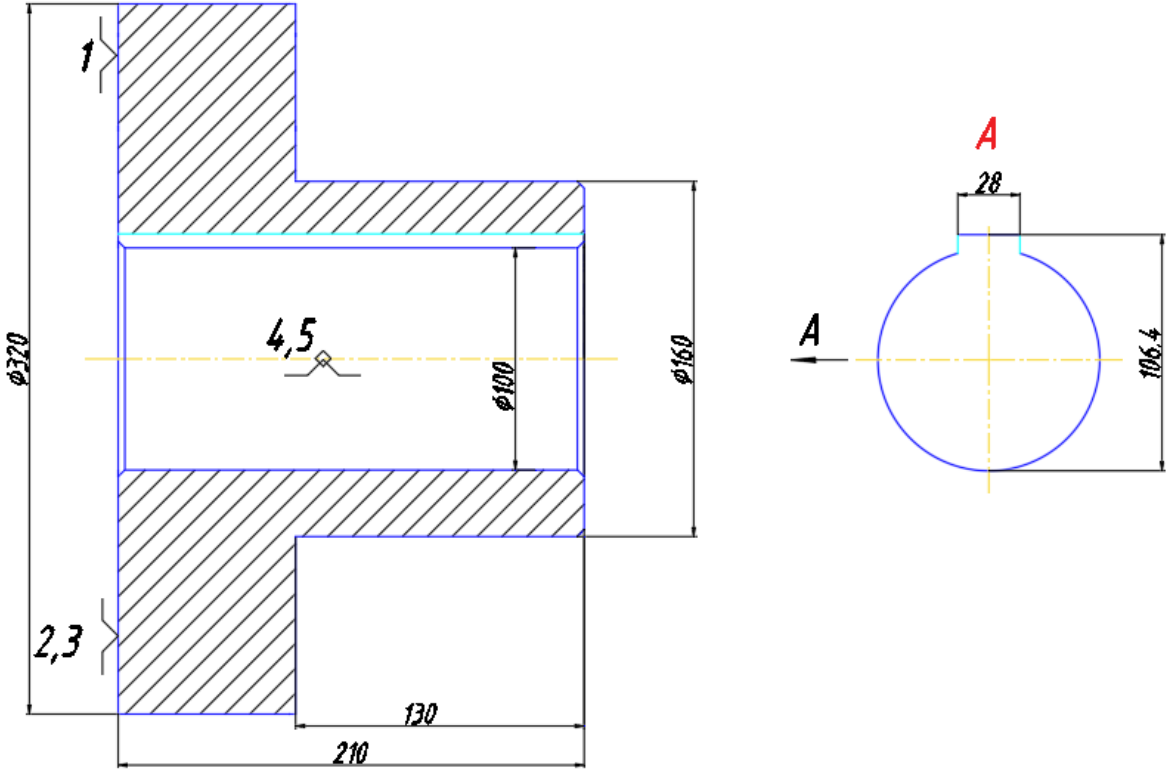
Дубл.																				
Взамін.																				
Підпис										Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата						
Розробив	Шпак О.Л					КПІ ім. Ігоря Сікорського														
Перевірів	Борщик С.О.																			
						НАПІВМУФТА												Н		005
Н. контр.																				



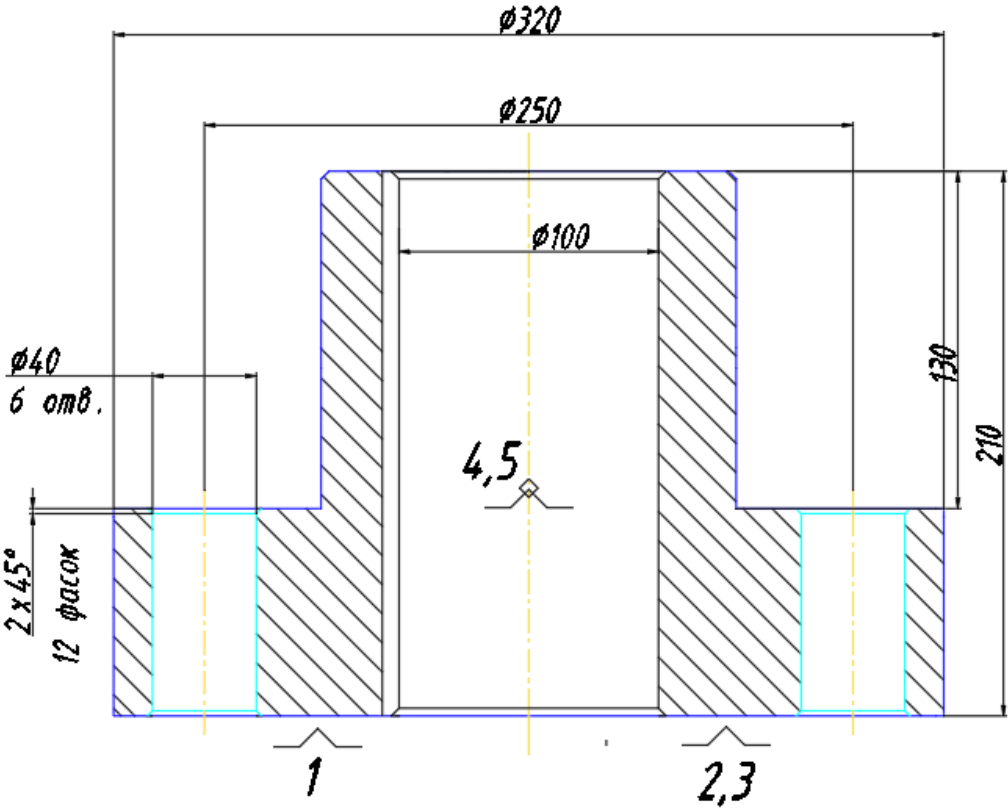
Дубл.														
Взамін.														
Підпис										Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата
Розробив	Шпак О.Л					КПІ ім. Ігоря Сікорського								
Перевірів	Борщик С.О.													
Н. контр.						НАПІВМУФТА						Н		010



Дубл.															
Взамін.															
Підпис										Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата	
Розробив	Шпак О.Л					КПІ ім. Ігоря Сікорського									
Перевірів	Борщик С.О.														
Н. контр.								НАПІВМУФТА					Н		015



Дубл.														
Взамін.														
Підпис										Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата
Розробив	Шпак О.Л					КПІ ім. Ігоря Сікорського								
Перевірів	Борщик С.О.													
Н. контр.						НАПІВМУФТА						Н		020



7.3 Вибір пристосування для обробки деталі

Для забезпечення високої точності позиціонування під час виконання свердлильної операції використовується спеціальне технологічне оснащення — кондуктор (рис. 7.3).

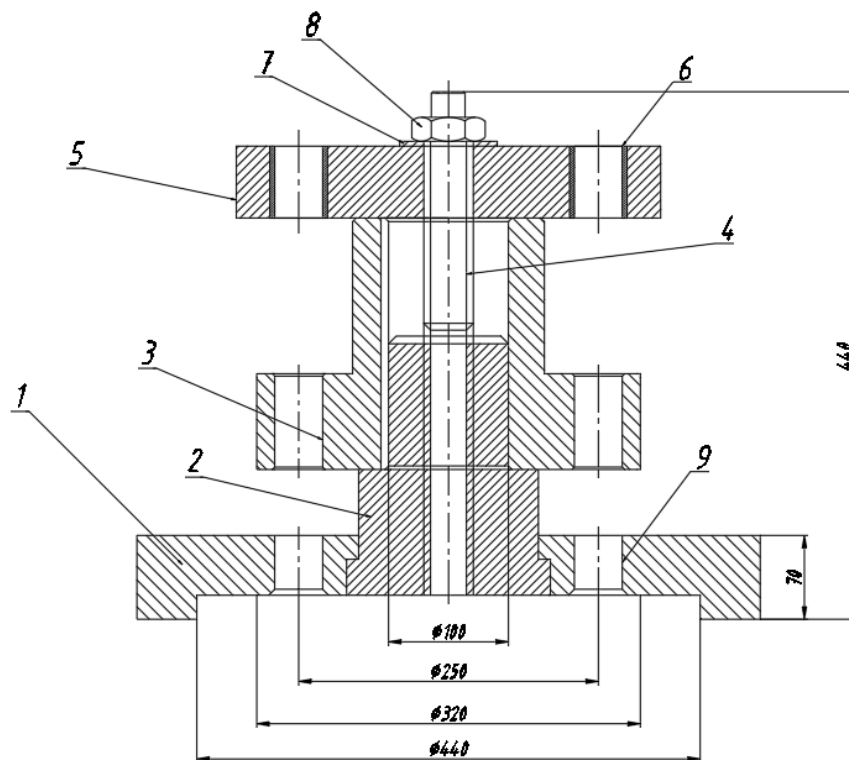


Рисунок 7.3 – Кондуктор

Кондуктор виконує роль направляючого пристрою. Напівмуфта встановлюється у кондуктор, після чого вся збірка жорстко фіксується на робочому столі свердлильного верстата. Різальний інструмент (свердло) направляється через спеціальні втулки кондуктора, що виключає його зміщення та гарантує точне дотримання координат отворів згідно з кресленням.

Оброблювана деталь 3 встановлена на базі пальця 2, який змонтований за допомогою болтів 9 на станині 1. Плита кондуктора 5, обладнана направляючими втулками 6, закріплена на шпильці 4. Надійна фіксація деталі та плити кондуктора здійснюється затисочною гайкою 8, під яку попередньо підкладається шайба 7.

ВИСНОВКИ

У межах даного дипломного проєкту було виконано комплексне проєктування та технічне обґрунтування лінії виготовлення цементу сухим способом, з акцентом на модернізацію кульового однокамерного млина як ключового агрегату для якісного подрібнення сировини та клінкеру.

На першому етапі розглянуто функціональне призначення барабанних млинів у цементній промисловості, їхні конструктивні переваги та жорсткі вимоги до експлуатаційних характеристик. Визначено, що млин має забезпечувати необхідну тоніну помелу, безперервність технологічного процесу, високу стійкість робочих органів до інтенсивного абразивного зношування та загальну енергоефективність системи.

Проведено аналіз і визначено технічні характеристики кульового млина, включаючи розрахунок об'єму барабана, параметри завантаження молотильними тілами та кінематичну схему приводу. Детально підібрано електродвигун та описано конструкцію основних елементів. Запропонована схема дозволяє гарантувати стабільність помелу матеріалів на відповідальних етапах виробничого процесу.

На основі патентного аналізу сучасних технічних рішень обґрунтовано вибір варіанту модернізації робочого простору млина. У межах роботи була використана заявка на корисну модель «Футерувальна плита барабанного млина» від 02.03.2026 (реєстраційний № u 2026 (01144)). Впровадження такого профілю футерівки дозволяє оптимізувати траєкторію падіння молотильних тіл, підвищити кінетичну енергію удару, знизити знос броне плит та суттєво збільшити міжремонтний інтервал обладнання.

Виконано параметричні розрахунки та перевірку на міцність, які дозволили оцінити напружено-деформований стан модернізованого барабана. Розрахунки підтвердили надійність конструкції: після модернізації та впровадження нових плит вага барабана склала 6040 кг (порівняно з базовою вагою 5580 кг), при цьому розрахунковий запас міцності (Safety Factor) становить 10.10. Це повністю задовольняє найсуворіші експлуатаційні вимоги важкого машинобудування.

Для твердотілого моделювання вузлів млина та нової футерувальної плити було використано CAD-середовище SOLIDWORKS. Візуалізація у 3D дала змогу оцінити технологічність збирання та виключити просторові колізії. Порівняльні розрахунки еквівалентних напружень у CAE-системі ANSYS Workbench (модуль Mechanical)

підтвердили значне покращення міцнісних характеристик оновленої конструкції порівняно зі стоковим варіантом.

Програмна реалізація розрахунків засобами мови C++ (у середовищі Visual Studio) забезпечила точне обчислення критичної частоти обертання млина та інших параметричних даних. Автоматизація цих обчислень дозволяє швидко адаптувати проєктні параметри під змінні умови завантаження виробничої лінії.

У розділі з охорони праці визначено основні виробничі ризики під час експлуатації кульового млина: високий рівень шуму, інтенсивна вібрація, пилоутворення та небезпека ураження електричним струмом. Розроблено комплекс заходів для їх мінімізації: встановлення шумопоглинаючих кожухів, систем аспірації та надійних блокувань. Усі рішення повністю відповідають нормативним документам ДСТУ.

Окрему увагу приділено технології машинобудування, зокрема розроблено технологічний процес виготовлення напівмуфти приводу млина з матеріалу сірий чавун СЧ 15 ГОСТ 1412-85. На основі рішень, опрацьованих під час проходження переддипломної практики складено маршрутні (МК) та операційні карти (ОК) і карти ескізів (КЕ). Запроєктовано токарні, протяжні та свердлильні операції з використанням спеціального кондуктора, що гарантує високу точність отворів та надійне з'єднання електродвигуна з редуктором в умовах постійних динамічних навантажень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І. О. Машини та апарати хімічних і полімерних виробництв : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 412 с. Електронний архів КПІ. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
2. Бойко В. І. Технологія виробництва в'язучих речовин та цементу : конспект лекцій. Рівне : НУВГП, 2023. 190 с.
3. Сиваченко Л. А. Обладнання підприємств будівельних матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2018. 320 с.
4. Классен В. К. Технологія портландцементу : навчальний посібник. Харків : ХПІ, 2019. 256 с.
5. Чернілевський Д. В. Деталі машин : проєктування та розрахунок. Київ : Техніка, 2019. 450 с.
6. Ковальчук О. В. Вплив форми футерівки на зносостійкість та напружено-деформований стан бронеплит млинів // Промислове будівництво. 2024. № 4. С. 18–24.
7. Щербина, В. Ю., Кочерга, А. Ю. (2025). Дослідження руху частинок матеріалу в трубних обертових апаратах (укр.). Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (4), 43–50. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2025.348813>
8. Патент на винахід № 112343 (Заявка а201409626).
9. Патент на корисну модель № 108858 (Заявка u201606203).
10. Патент на корисну модель № 141883 (Заявка u201911411).
11. Патент на корисну модель № №58012 (Заявка u201010901).
12. Патент на корисну модель № 56541 (Заявка u201014589).
13. Патент на корисну модель № 110973 (Заявка u201604273).
14. Патент на корисну модель № 95268 (Заявка u201409627).
15. Патент на корисну модель № 16247 (Заявка u200605599).
16. Патент на корисну модель № 154731 (Заявка u202301451).
17. Заявка на корисну модель "Футерувальна плита барабанного млина" (Діагональний Виступ), поданій 02.03.2026, реєстраційний № u 2026 (01144).
18. Писаренко Г. С. Опір матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 656 с.

19. Алямовський А. А. SolidWorks 2024. Комп'ютерне моделювання в інженерній практиці. Київ : ДМК Прес, 2024. 512 с.
20. Басов К. А. Проектування та розрахунок конструкцій в ANSYS 2019 R2. Київ : Техніка, 2020. 410 с. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.
21. ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 24 с.
22. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.
23. Прата С. Мова програмування C++. Лекції та вправи. Київ : Діалектика, 2021. 1120 с.
24. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.
25. НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.
26. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
27. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
28. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
29. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Введено в дію 28.02.2019.
30. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ.
31. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-ІХ.
32. Технологія машинобудування : навчальний посібник / П. П. Мельничук, А. І. Боровик, П. А. Лінчевський, Ю. В. Петраков. Житомир : ЖДТУ, 2005. 882 с.
33. Малафеев Ю. М. Технологічні основи машинобудування : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 201 с. Електронний архів КПІ.
URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42827>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

№ п.п.	Предмет пошуку	Країна видачі, номер документу	Сутність заявленого технологічного рішення і ціль його створення
1	2	3	4
1	Футерувальна плита з еластичним шаром	UA, Патент на винахід № 112343 (Заявка а201409626)	Рішення пропонує плиту з робочим шаром із зносостійкої гуми на металевій основі для пом'якшення ударів і зниження ваги. Недолік: матеріал непридатний для сухого помелу через швидку термічну деструкцію еластичного шару від гарячого клінкеру.
2	Плита з криволінійним профілем ліфтера	UA, Патент на корисну модель № 108858 (Заявка u201606203)	Профіль ліфтера має змінну кривизну, що скеровує кулі точно в центр зони помелу, уникаючи прямого удару по броні. Недолік: технологічно складна у виготовленні форма, а тонка робоча кромка схильна до швидкого абразивного зношування.
3	Східчаста футерувальна плита	UA, Патент на корисну модель № 141883 (Заявка u201911411)	Поверхня утворена асиметричними сходинками з плавними радіусами для запобігання зсуву матеріалу та зниження концентрації напружень. Недолік: така конструкція жодним чином не сприяє осьовому просуванню шихти вздовж барабана.
4	Плита з хвилястим профілем	UA, Патент на корисну модель № 58012 (Заявка u201010901)	Хвилястий рельєф покращує зчеплення куль із бронею, наближаючи роботу млина до ефективного водоспадного режиму. Недолік: порівняно швидке стирання гребенів та забивання западин дрібною фракцією матеріалу.
5	Конічна футерувальна плита	UA, Патент на корисну модель № 56541 (Заявка u201014589)	Броня має похилий конічний профіль для поздовжнього сортування куль (більші залишаються на вході, менші зміщуються до виходу). Недолік: збільшена початкова товщина плити зменшує корисний об'єм барабана і підвищує його масу.

6	Плита із системою комірок	UA, Патент на корисну модель № 110973 (Заявка u201604273)	На поверхні розміщено заглиблення, де застрягають кулі та клінкер. Це створює зносостійкий шар «самофутеровки». Недолік: значне збільшення пасивної ваги млина та низька ефективність для етапу тонкого помелу.
7	Плита з поздовжніми виступами	UA, Патент на корисну модель № 95268 (Заявка u201409627)	Суцільні прямокутні або трапецієподібні ліфтери усувають проковзування масиву, гарантовано підіймаючи шихту. Недолік: прямі кути створюють високу концентрацію напружень, що неминуче призводить до сколів і тріщин від постійних ударів.
8	Плита з комбінованим профілем	UA, Патент на корисну модель № 16247 (Заявка u200605599)	Поєднання похилої ділянки та увігнутого виступу дозволяє формувати щільний потік мелючих тіл для стабілізації траєкторії їх падіння. Недолік: відсутність елементів для цілеспрямованої інтенсифікації осевого переміщення подрібненого матеріалу.
9	Комбінована металогумова футеровка	UA, Патент на корисну модель № 154731 (Заявка u202301451)	Гумова матриця армована рифленими сталевими елементами, поєднуючи амортизацію та високу стійкість до абразивного стирання. Недолік: висока вартість виготовлення та жорсткі температурні обмеження, що унеможлиблює помел гарячого клінкеру.
10	Футерувальна плита з діагональним виступом	UA, Заявка на корисну модель № u 2026 01144 (подана 02.03.2026)	Суцільнолита плита з масивним діагональним ліфтером змінної висоти. Рішення забезпечує оптимальний відрив куль без проковзування, створює просторову гвинтову траєкторію для потужного ударного впливу та цілеспрямовано просуває матеріал до вивантаження.

ДОДАТОК Б

```

#include <iostream>
#include <cmath>
#include <iomanip>

using namespace std;

int main() {
    // =====
    // ВИХІДНІ ДАНІ З ТВОГО КУРСОВОГО ПРОЄКТУ
    // =====
    double D = 2.1;      // Номінальний діаметр барабана, м
    double L = 1.5;      // Номінальна довжина барабана, м
    double n_rob = 24.6;  // Робоча частота обертання, об/хв
    double phi = 0.233;   // Коефіцієнт заповнення млина кулями (приблизно 23.3%)
    double rho_m = 4.6;   // Насипна густина сталевих куль, т/м^3
    const double PI = 3.1415926535;

    // =====
    // ФОРМУЛА 1: Розрахунок критичної швидкості
    // =====
    double n_kr = 42.3 / sqrt(D);
    double psi = n_rob / n_kr; // Перевірка режиму (пси)

    // =====
    // ФОРМУЛА 2: Розрахунок корисного об'єму
    // =====
    double V = (PI * pow(D, 2) / 4.0) * L;

    // =====
    // ФОРМУЛА 3: Розрахунок маси молоткових тіл
    // =====
    double G_k = V * phi * rho_m;

    // =====
    // ВИВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ У КОНСОЛЬ
    // =====
    cout << "===== " << endl;
    cout << " РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОДНОКАМЕРНОГО МЛИНА " << endl;
    cout << "===== " << endl;

    cout << fixed << setprecision(2); // Встановлюємо 2 знаки після коми

    cout << "1. Внутрішній діаметр барабана (D): " << D << " м" << endl;
    cout << "2. Довжина барабана (L): " << L << " м" << endl;
    cout << "-----" << endl;

    cout << "[Результат формули 1]" << endl;

```

```

cout << "Критична частота обертання (n_kr): " << n_kr << " об/хв" << endl;
cout << "Фактична робоча частота (n_rob): " << n_rob << " об/хв" << endl;
cout << "Відносний коефіцієнт швидкості (psi): " << psi << endl;

if (psi >= 0.75 && psi <= 0.85) {
    cout << " -> Режим: ВОДОСПАДНИЙ (оптимально для клінкеру)" << endl;
}
cout << "-----" << endl;

cout << "[Результат формули 2]" << endl;
cout << "Корисний об'єм барабана (V): " << V << " м^3" << endl;
cout << "-----" << endl;

cout << "[Результат формули 3]" << endl;
cout << "Маса молольних тіл (G_k): " << G_k << " т" << endl;
cout << "===== " << endl;

return 0;
}

```

ДОДАТОК В

Удосконалення футерівки однокамерного млина

Шпак О.Л, студ., Гунчар Д.О., студ., Мікульонок І.О., д.т.н., проф., Швачко Д. Г., PhD, доц.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано футерувальну плиту барабанного млина, яка має форму прямокутника в плані та оснащена поздовжнім виступом на її робочій поверхні, розташованим на діагоналі плити. Це технічне рішення забезпечує неперервність сукупності поздовжніх виступів футерівки млина з утворенням неперервних гвинтоподібних виступів на внутрішній поверхні барабана, що знижує ймовірність пошкодження кінцевих ділянок поздовжнього виступу під час роботи млина, а також забезпечує надійне транспортування подрібненого матеріалу в напрямку місця розвантаження готового продукту, що знижує енергоємність процесу подрібнення. Проведені порівняльні розрахунки базової та модернізованої плит, які підтверджують ефективність запропонованої конструкції.

Ключові слова: кульовий млин, футерувальна плита, модернізація, поздовжній виступ, напружено-деформований стан.

Вступ. Кульові млини широко застосовуються для подрібнення матеріалів у хімічній промисловості та промисловості будівельних матеріалів. Основним захисним елементом барабана від зношування, який також формує траєкторію руху подрібнювального матеріалу, є футерівка барабана [1–5].

Найближчою до запропонованого технічного рішення є футерувальна плита барабанного млина, що має форму прямокутника в плані та оснащена поздовжнім виступом на її робочій поверхні, при цьому кінці поздовжнього виступу розташовані на коротких сторонах плити (пат. № RU2632893C1).

Виклад основного матеріалу. В основу запропонованого технічного рішення поставлено завдання вдосконалити футерувальну плиту барабанного млина, в якій нове конструктивне виконання забезпечує неперервність сукупності поздовжніх виступів футерівки барабанного млина з утворенням неперервних гвинтоподібних виступів на внутрішній поверхні барабанного млина, що істотно знижує ймовірність пошкодження кінцевих (торцевих) ділянок поздовжнього виступу під час роботи млина, а також забезпечує надійне транспортування подрібненого матеріалу в напрямку місця розвантаження готового продукту, що знижує енергоємність процесу подрібнення.

Поставлену задачу вирішують тим, що в шнеку преса, у футерувальній плиті барабанного млина, що має форму прямокутника в плані та оснащена поздовжнім виступом на її робочій поверхні, згідно з запропонованим технічним рішенням новим є те, що поздовжній виступ розташовано на діагоналі плити. У переважних прикладах виконання плити вона її виконано у вигляді паралелепіпеда або сектора прямого кільцевого кругового циліндра, а поздовжній виступ виконано хвилястим.

Футерувальна плита працює так (рис. 1). Після закріплення сукупності футерувальних плит на внутрішній поверхні барабана їхні поздовжні виступи утворюють неперервні гвинтоподібні виступи на внутрішній поверхні барабана, що істотно знижує ймовірність пошкодження кінцевих (торцевих) ділянок поздовжнього виступу плити під час роботи млина.

Під час обертання барабана поздовжні виступи поліпшують умови подрібнення, підвищують ліфтерну (підймальну) здатність футерівки, а також забезпечують надійне транспортування подрібненого матеріалу в напрямку місця розвантаження барабанного млина, що знижує енергоємність процесу подрібнення. Також щільне прилягання кінцевих (торцевих) ділянок сусідніх поздовжніх виступів істотно знижує ймовірність їх пошкодження під час роботи млина.

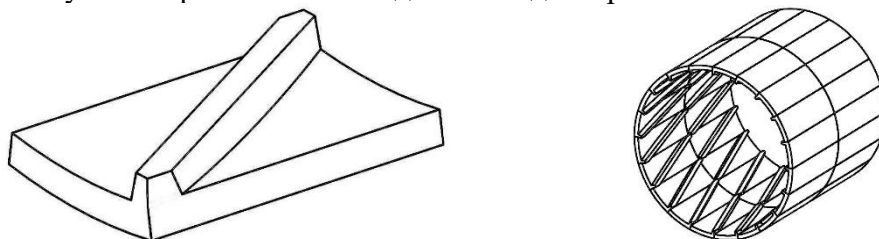


Рисунок 1 – Футерувальна плита барабанного млина (заявка № u 2026 01144)

Для оцінювання працездатності модернізації було виконано статичний розрахунок базової та модернізованої моделей футерувальної плити. Порівняння проводили за такими показниками: маса

плити, максимальні загальна деформація й направлена деформація, максимальні еквівалентні напруження за Мізесом і мінімальний коефіцієнт запасу міцності (рис. 2, 3; табл.).

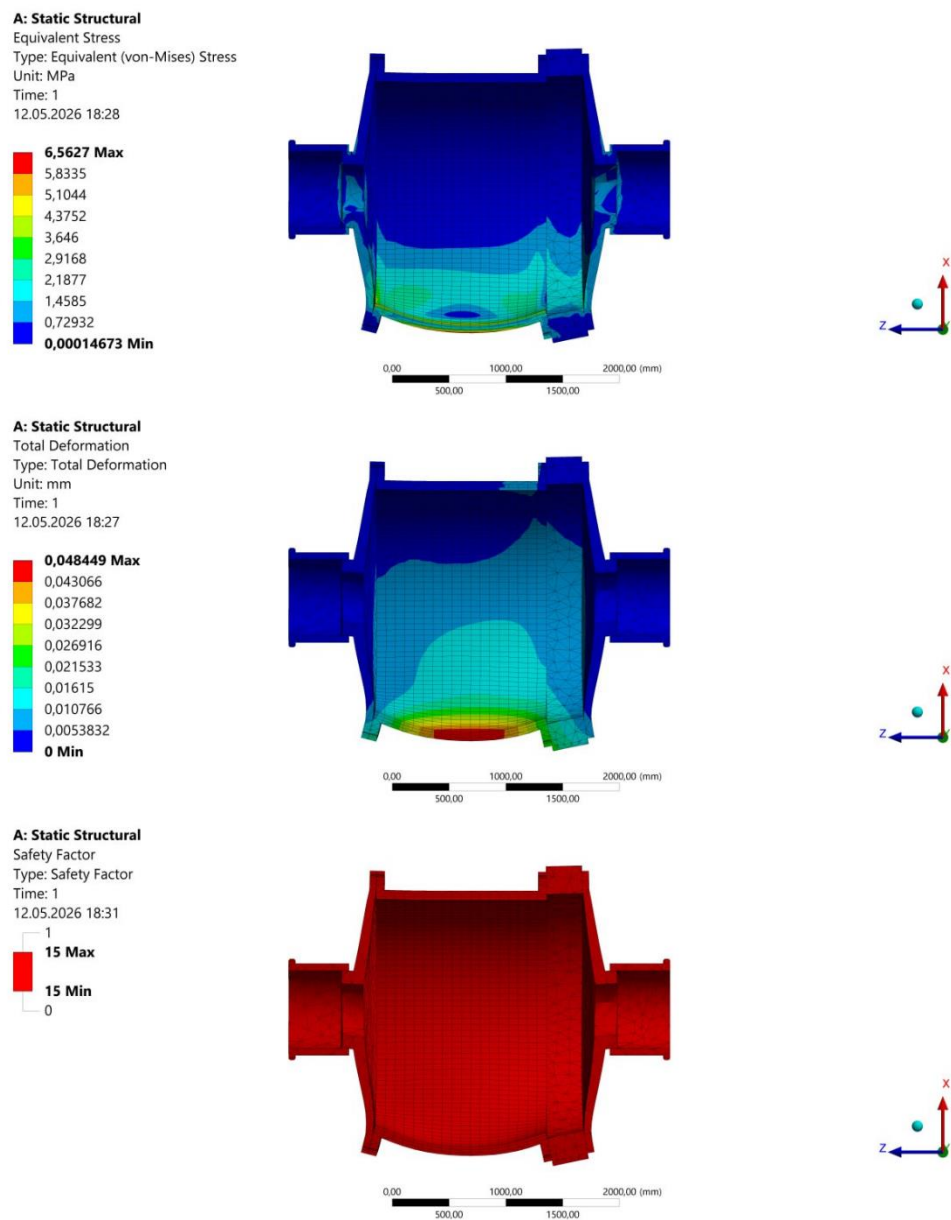
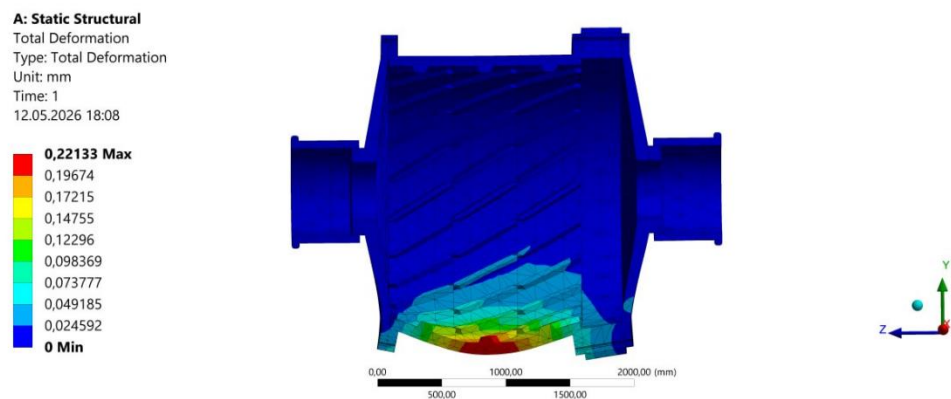


Рисунок 2 – Результати статичного розрахунку базової моделі плити



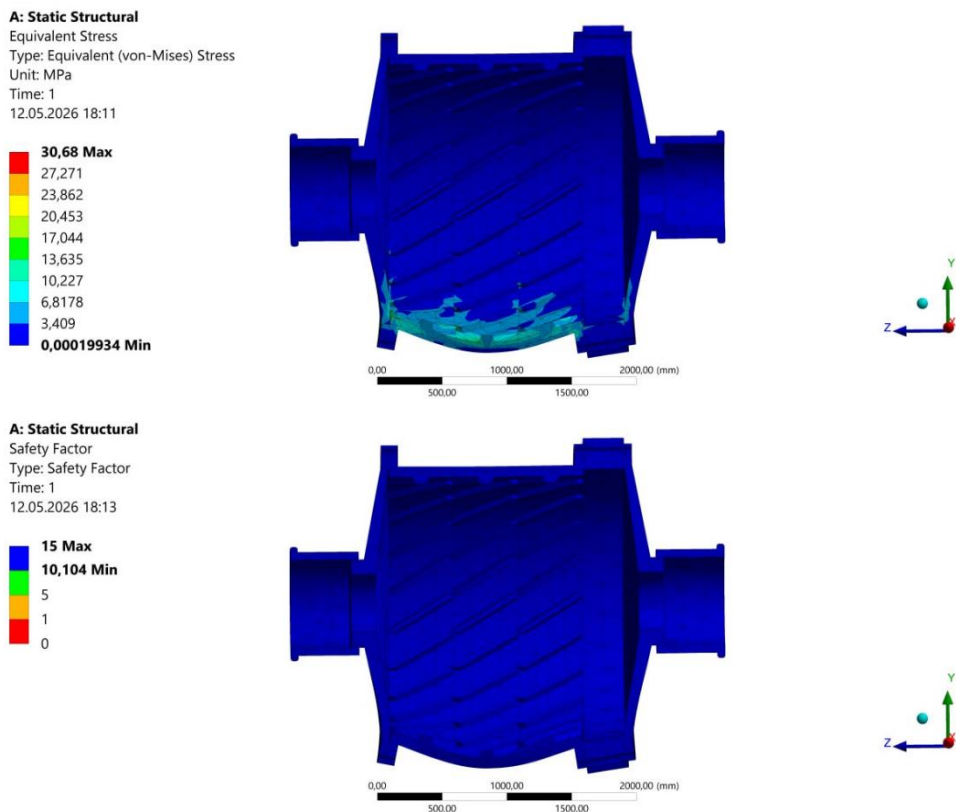


Рисунок 3 – Результати статичного розрахунку модернізованої моделі плити.

Таблиця 4 – Порівняння результатів статичного розрахунку базової й модернізованої моделей плити

Результат розрахунку	Базова модель	Модернізована модель	Зміна, %
Загальна маса моделі, кг	5580	6040	+8.24
Максимальна загальна деформація, мм	0.048	0.221	+356.83
Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа	6.56	30.68	+367.49
Мінімальний коефіцієнт запасу міцності	15.0	10.10	–32.64

За результатами порівняння встановлено, що маса модернізованої моделі збільшилася з 5580 кг до 6360 кг (+13,98 %), що зумовлено додаванням об'єму матеріалу для формування безперервного профілю. Максимальна загальна деформація конструкції збільшилася з 0,048 мм до 0,221 мм (+356,83 %), що пояснюється зміною геометрії та перерозподілом навантаження безпосередньо на нові виступаючі елементи. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом зросли з 6,56 МПа до 30,68 МПа (+367,49 %), а мінімальний коефіцієнт запасу міцності зменшився з 15 до 10,10 (–32,64 %).

Цей різкий скачок напружень має локальний характер: через специфіку роботи інструменту Line Pressure в ANSYS (рис. 5), додаткові грані та кути оновленого профілю футерівки виступають штучними концентраторами, приймаючи на себе пікові значення напружень, тоді як на основному тілі барабана критичних змін не відбувається.

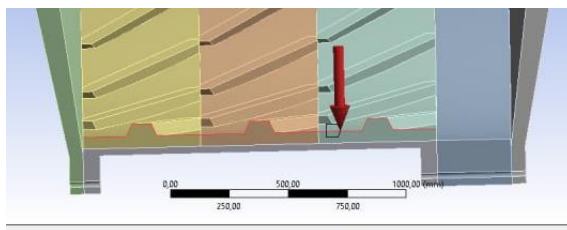


Рисунок 5 - інструмент Line Pressure в ANSYS

Висновок. Пропоноване технічне рішення, яке є нескладним у виготовленні та зручним в експлуатації, підвищить ефективність і надійність роботи барабанного млина. Це особливо актуально для України, яка понад чотири роки потерпає від повномасштабної російської агресії, в результаті якої обсяг будівельних відходів і відходів руйнувань, які потребують перероблення, внаслідок систематичних руйнувань критичної та житлової інфраструктури постійно зростає [6, 7].

Перелік посилань

1. Мікульонюк І.О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
2. Мікульонюк І.О. Механічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів. 5-те вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 102 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74513>
3. Mikulionok I.O. Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, № 9–10. P. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021>
4. Мікульонюк І.О., Карвацький А.Я., Лелека С.В., Іваненко О.І. Подрібнювальні тіла барабанних млинів і дробарок (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 2(21). С. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260339>
5. Müller A., Martins I. Recycling of Building Materials: Generation - Processing - Utilization. Wiesbaden : Springer Vieweg Wiesbaden, 2022. 356 p. DOI: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-34609-6>
6. Bonifazi G., Grosso C., Palmieri R., Serranti S. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2025. Vol. 53. Article 101032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101032>
7. Мікульонюк І.О., Швачко Д.Г. Подрібнювачі будівельних відходів (Класифікація та огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2026. № 1(25). С. 9–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2026.354343>

ДОДАТОК Г