

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Інженерно-хімічний факультет
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 будівельних матеріалів і виробів»

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Кульовий млин з модернізацією футеровки

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-22 _____
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проекту:

_____Зав. каф., доцент, доктор технічних наук Сокольський О.Л.,
(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»

Інженерно-хімічний факультет

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

Білецький Кіріл Михайлович

1. Тема проекту «Кульовий млин з модернізацією футеровки», керівник проекту Сокольський О.Л., Зав. каф., доцент, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «19». 05 2026 р. № 1317-с

2. Термін подання студентом проекту 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту

Об'єкт розробки - футеровочний вузол барабана кульового млина. Параметри базової машини: двокамерний барабанний кульовий млин безперервної дії для сухого помелу вапняку, діаметр барабана - 2,4 м, довжина барабана - 4,8 м, кількість камер - 2, ступінь завантаження - 0,28, коефіцієнт заповнення матеріалом - 0,15, густина мелючих тіл - 7800 кг/м³, густина матеріалу - 1400 кг/м³, ККД приводу - 0,9, потужність електродвигуна - 306 кВт, питома продуктивність - 0,035 т/(кВт·год), мелючі тіла - сталеві кулі, футеровка - змінна.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ. 1. Призначення та галузь застосування кульового млина. 2. Технічна характеристика базової машини. 3. Опис базової конструкції, основних частин та принципу дії. 4. Літературний та патентний огляд. 5. Розрахунки. 6. Охорона праці. 7. Технологія машинобудування. Загальні висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу

1. Технологічна схема лінії помелу вапняку. 2. Кульовий млин з модернізацією футеровки. 3. Барабан млина. 4. Вставка-ліфтер. 5. Футеровочний вузол. 6. Нижня опорна пластина. 7. Основне тіло футеровки. 8. Півмуфта ведена. 9. Кришка підшипника. 10. Плакат 3-D моделі. 11. Плакат числового моделювання.

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		
ОХОРОНИ ПРАЦІ	Ковтун А.І., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання 15.04.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання, уточнення вихідних даних та теми дипломного проекту	13.04.2026–14.04.2026	
2	Написання вступу, визначення мети та актуальності модернізації	15.04.2026–16.04.2026	
3	Аналіз призначення, галузі застосування та технічної характеристики кульового млина	17.04.2026–18.04.2026	
4	Опис базової конструкції, основних вузлів та принципу дії кульового млина	19.04.2026–20.04.2026	
5	Виконання літературного та патентного огляду варіантів модернізації футеровки	21.04.2026–23.04.2026	
6	Обґрунтування вибору конструкції модернізованого футеровочного вузла	24.04.2026–25.04.2026	
7	Виконання параметричних та кінематичних розрахунків кульового млина	26.04.2026–28.04.2026	
8	Виконання розрахунків на міцність корпусу барабана та елементів кріплення футеровки	29.04.2026–03.05.2026	
9	Розроблення 3-D моделей барабана та модернізованої футеровки	04.05.2026–06.05.2026	
10	Проведення числового моделювання барабана з немодернізованою та модернізованою футеровкою	07.05.2026–09.05.2026	
11	Розроблення розділу охорони праці	10.05.2026–11.05.2026	
12	Розроблення розділу технології машинобудування	12.05.2026–13.05.2026	
13	Виконання та оформлення креслень і плакатів графічної частини	14.05.2026–15.05.2026	
14	Остаточне оформлення пояснювальної записки, висновків, переліку посилань і додатків	16.05.2026–17.05.2026	

Студент

Білецький К.М

Керівник проекту

Сокольський О.Л.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект на тему: «Кульовий млин з модернізацією футеровки». Виконавець - студент групи ЛП-22 Білецький К. М., керівник - Сокольський О. Л., завідувач кафедри, доцент, доктор технічних наук. Об'єкт розробки - футеровочний вузол барабана кульового млина.

Мета розробки - підвищення надійності роботи футеровочного вузла кульового млина та зменшення впливу експлуатаційних навантажень на корпус барабана. З цією метою проведено аналіз конструкції базової машини, розглянуто принцип її дії, виконано літературно-патентний огляд і обґрунтовано вибір напрямку модернізації. Запропонована модернізація передбачає удосконалення конструкції футеровки барабана з використанням складеного футеровочного елемента, до складу якого входять поліуретановий демпфувальний шар, сталева вставка-ліфтер і нижня опорна пластина.

У роботі виконано параметричні, кінематичні та міцнісні розрахунки кульового млина. Проведено числове моделювання напружено-деформованого стану барабана з немодернізованою та модернізованою футеровкою, що дозволило оцінити вплив запропонованої конструкції на загальні переміщення, напруження та коефіцієнт запасу міцності. Розглянуто питання охорони праці та технології виготовлення деталей. Розроблено графічну частину проекту, що включає технологічну схему лінії, загальний вигляд млина, складальні креслення та креслення деталей.

Ключові слова: КУЛЬОВИЙ МЛИН, ФУТЕРОВКА, ФУТЕРОВОЧНИЙ ВУЗОЛ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, БАРАБАН, МЕЛЮЧІ ТІЛА, ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ABSTRACT

The diploma project is entitled “Ball Mill with Liner Modernization”. The project was carried out by K. M. Biletskyi, a student of group LP-22. The supervisor is O. L. Sokolskyi, Head of the Department, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences. The object of development is the lining unit of the ball mill drum.

The purpose of the project is to improve the reliability of the ball mill lining unit and reduce the effect of operational loads on the mill drum shell. For this purpose, the design of the base machine was analyzed, its operating principle was considered, a literature and patent review was carried out, and the direction of modernization was substantiated. The proposed modernization involves improving the design of the drum liner by using a composite lining element consisting of a polyurethane damping layer, a steel lifter insert, and a lower support plate.

The project includes parametric, kinematic, and strength calculations of the ball mill. Numerical modeling of the stress-strain state of the drum with non-modernized and modernized liners was performed, which made it possible to evaluate the effect of the proposed design on displacements, stresses, and the safety factor. Occupational safety issues and the manufacturing technology of the part were also considered. The graphical part of the project includes a process flow diagram, a general view of the mill, assembly drawings, and detail drawings.

Keywords: BALL MILL, LINER, LINING UNIT, MODERNIZATION, DRUM, GRINDING MEDIA, NUMERICAL MODELING.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

D - внутрішній діаметр барабана, м

$D_{\text{зовн}}$ - зовнішній діаметр барабана, м

$\delta_{\text{кор}}$ - товщина стінки корпусу барабана, м

L - довжина барабана, м

$L_{\text{оп}}$ - відстань між опорами барабана, м

$n_{\text{кр}}$ - критична частота обертання барабана, об/хв

n - робоча частота обертання барабана, об/хв

ω - кутова швидкість барабана, рад/с

v - колова швидкість внутрішньої поверхні барабана, м/с

φ - ступінь заповнення барабана мелючими тілами

ψ - коефіцієнт заповнення барабана матеріалом

η - коефіцієнт корисної дії привода

$V_{\text{б}}$ - робочий об'єм барабана, м³

$V_{\text{т}}$ - об'єм мелючих тіл у барабані, м³

$V_{\text{м}}$ - об'єм матеріалу в барабані, м³

$\rho_{\text{т}}$ - густина мелючих тіл, кг/м³

$\rho_{\text{м}}$ - густина матеріалу, кг/м³

$\rho_{\text{ст}}$ - густина сталі, кг/м³

$m_{\text{т}}$ - маса мелючих тіл, кг

$m_{\text{м}}$ - маса матеріалу, кг

$m_{\text{ф1}}$ - маса одного футеровочного елемента, кг

$m_{\text{кр}}$ - маса торцевих кришок, кг

$m_{\text{пер}}$ - маса міжкамерної перегородки, кг

$m_{\text{заг}}$ - повна маса барабана з футеровкою, кришками, перегородкою, мелючими тілами та матеріалом, кг

Σm - сумарна маса завантаження барабана, кг

g - прискорення вільного падіння, м/с²

$F_{\text{зав}}$ - сила ваги сумарного завантаження, Н

$F_{\text{розр}}$ - розрахункове навантаження на барабан, Н

F_{ϕ} - розрахункове навантаження на один футеровочний елемент, Н

F_{δ} - навантаження на один болт, Н

q - інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження, Н/м

R_A - реакція лівої опори, Н

R_B - реакція правої опори, Н

Q_x - поперечна сила в розрахунковому перерізі, Н

M_x - згинальний момент у розрахунковому перерізі, Н·м

$M_{\max}$ - максимальний згинальний момент, Н·м

T - крутний момент на валу барабана, Н·м

$[\sigma]$ - допустиме напруження матеріалу, МПа

$N_{\text{дв}}$ - потужність електродвигуна, кВт

N_{δ} - корисна потужність на барабані, кВт

$N_{\text{уд}}$ - питома потужність на завантаження, кВт/т

$Q_{\text{пр}}$ - розрахункова продуктивність млина, т/год

$q_{\text{п}}$ - питома продуктивність млина, т/(кВт·год)

$E_{\text{пит}}$ - питома витрата енергії на помел, кВт·год/т

$t_{\text{пер}}$ - орієнтовний час перебування матеріалу в барабані, хв

I - момент інерції поперечного перерізу барабана, м⁴

W - момент опору поперечного перерізу барабана, м³

J_p - полярний момент інерції поперечного перерізу барабана, м⁴

$\sigma_{\text{зг}}$ - нормальне напруження від згину, МПа

τ - дотичне напруження від кручення, МПа

$\sigma_{\text{екв}}$ - еквівалентне напруження, МПа

n_3 - коефіцієнт запасу міцності

d_{δ} - діаметр болта, мм

z_{δ} - кількість болтів кріплення одного футеровочного елемента

z_{ϕ} - кількість футеровочних елементів

$\delta_{\text{кр}}$ - товщина торцевої кришки, м

$\delta_{\text{пер}}$ - товщина міжкамерної перегородки, м

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Призначення та галузь застосування кульового млина.....	10
2 Технічна характеристика базової машини.....	12
3 Опис базової конструкції, основних частин та принципу дії.....	13
4 Літературний та патентний огляд.....	16
4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації футеровки кульового млина.....	16
4.2 Обґрунтування вибору модернізації футеровки.....	20
5 Розрахунки.....	23
5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки.....	23
5.2 Розрахунки на міцність.....	29
5.3 Числове моделювання.....	45
6 Охорона праці.....	70
6.1 Виявлення та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	70
6.2 Повітря робочої зони.....	71
6.3 Електробезпека.....	72
6.4 Безпека при роботі з рухомими та обертовими частинами, шум і вібрація.....	73
6.5 Пожежна безпека.....	74
6.6 Висновки до розділу.....	75
7 Технологія машинобудування.....	77
7.1 Опис і призначення деталі.....	77
7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі.....	78
7.3 Призначення пристосування.....	86
Загальні висновки.....	87
Перелік посилань.....	89
Додатки.....	91

					ЛП22.013116.01-70ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Білецький К.М.			Кульовий млин з модернізацією футеровки		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Сокольський О.Л.						8	88
							КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. контр.									
Затвердив		Сокольський О.Л.							

ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві значне місце займають процеси механічної обробки твердих матеріалів, зокрема їх дроблення, подрібнення та класифікація. Якість виконання цих процесів впливає на подальшу переробку сировини, стабільність роботи технологічної лінії та властивості готового продукту [1].

Одним із поширених видів обладнання для тонкого подрібнення є барабанні кульові млини. Під час їх роботи внутрішні елементи барабана постійно контактують з матеріалом і мелючими тілами, тому зазнають значних ударних та абразивних навантажень.

Футеровка барабана кульового млина є одним із найбільш навантажених елементів машини. Вона захищає корпус від зношування, сприймає навантаження від мелючих тіл і матеріалу, а також впливає на умови роботи внутрішнього об'єму млина. У процесі експлуатації футеровка поступово зношується, що призводить до простоїв обладнання, необхідності ремонту та збільшення витрат на обслуговування.

Тому модернізація футеровочного вузла є актуальним напрямом підвищення надійності кульового млина. Зміна конструкції футеровки дозволяє підвищити ресурс роботи деталей, зменшити вплив експлуатаційних навантажень на корпус барабана та спростити заміну зношуваних елементів.

Метою даного дипломного проекту є модернізація футеровки кульового млина для підвищення надійності роботи футеровочного вузла та зменшення впливу експлуатаційних навантажень на елементи барабана.

Для досягнення поставленої мети розглянуто призначення та конструкцію кульового млина, виконано літературно-патентний огляд, обґрунтовано вибір модернізації, проведено необхідні розрахунки та розроблено графічну частину проекту.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ КУЛЬОВОГО МЛИНА

Барабанні кульові млини використовують у випадках, коли необхідно отримати продукт із достатньо високою тонкістю помелу та рівномірним гранулометричним складом. Подрібнення матеріалу в таких млинах здійснюється за рахунок дії мелючих тіл, які розміщуються всередині обертового барабана. Як мелючі тіла найчастіше використовують сталеві кулі різного діаметра.

У технологічних лініях кульовий млин може працювати як окрема машина або входити до складу помельного комплексу разом із живильниками, транспортерами, сепараторами, циклонами, фільтрами та іншим допоміжним обладнанням. У даному проекті млин розглядається як складова технологічної лінії подрібнення матеріалу, яка передбачає подавання вихідної сировини до млина, її подрібнення в барабані, транспортування подрібненого продукту, сепарацію матеріалу за крупністю та очищення повітря від пилу. Схему такої технологічної лінії наведено на рисунку 1.1 [2].

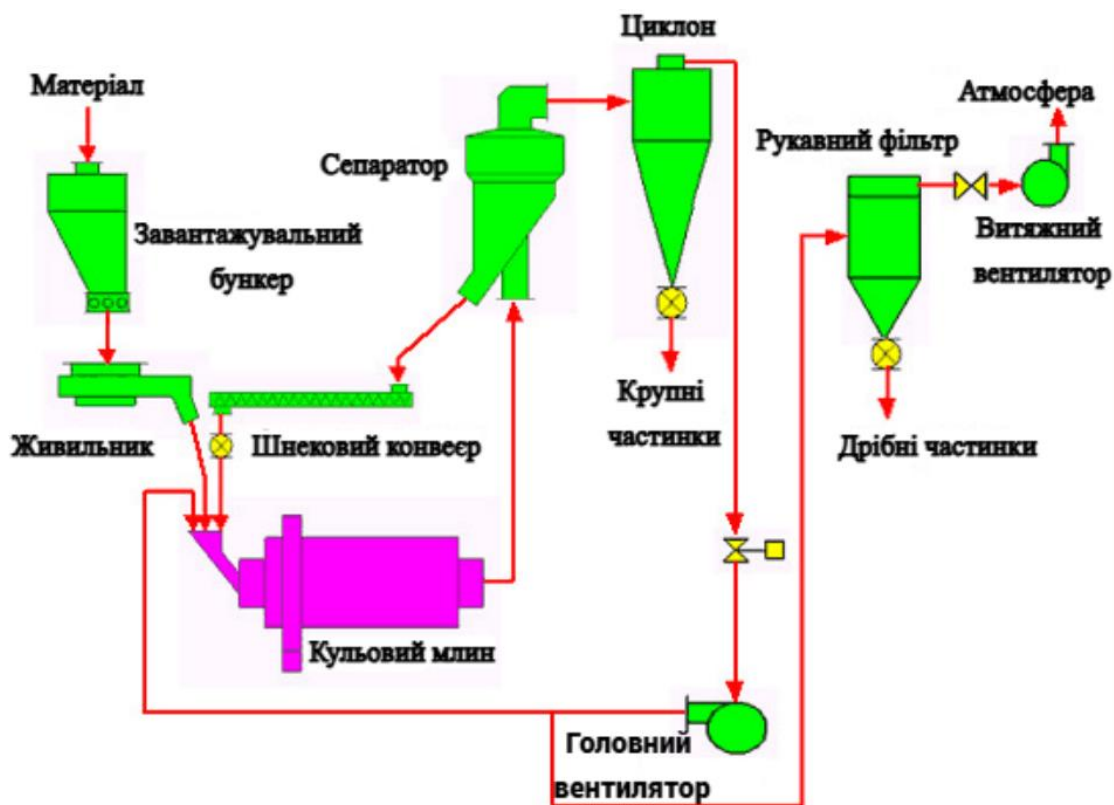


Рисунок 1.1 – Технологічна схема помельної лінії з кульовим млином

Після виходу з млина подрібнений матеріал надходить до сепаратора, де розділяється на готову тонку фракцію та грубішу фракцію, яка може повертатися на домелювання. Такий замкнений цикл дозволяє підвищити якість готового продукту та стабільність процесу подрібнення.

Кульові млини відрізняються за конструктивним виконанням, способом завантаження і розвантаження матеріалу, кількістю камер та способом відділення готового продукту. У промисловості застосовують однокамерні й багатокамерні барабанні млини безперервної дії. У багатокамерних млинах барабан поділяється міжкамерними перегородками на окремі камери, що дозволяє здійснювати послідовний помел від грубішого до тоншого. Також застосовуються ситові барабанні млини, у яких розділення матеріалу за крупністю здійснюється за допомогою сита [3].

Приклади схем кульових млинів наведено на рисунку 1.2.

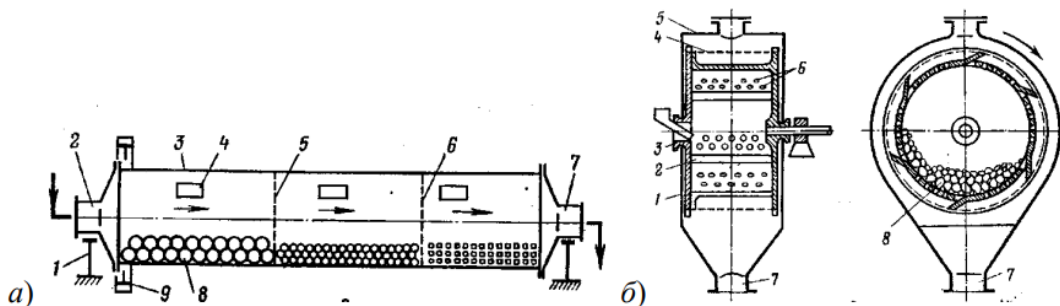


Рисунок 1.2 – Схеми кульових млинів: а – багатокамерний млин безперервної дії;
б – ситовий млин безперервної дії

Такі млини широко використовуються у цементній промисловості для помелу цементного клінкеру, гіпсу та мінеральних добавок. Також вони застосовуються у виробництві будівельних матеріалів для подрібнення вапняку, шлаків, керамічної сировини та інших мінеральних компонентів. У гірничо-збагачувальній галузі кульові млини використовують для подрібнення руд і концентратів перед подальшими процесами збагачення. Крім того, таке обладнання може застосовуватися у хімічній, металургійній та інших галузях промисловості, де необхідне тонке подрібнення твердих матеріалів [1, 4].

2 **ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ**

Режим роботи:	безперервний
Спосіб помелу:	сухий
Кількість камер:	$n = 2$
Діаметр барабана:	$D = 2,4 \text{ м}$
Довжина барабана:	$L = 4,8 \text{ м}$
Ступінь завантаження:	$\varphi = 0,28$
Густина мелючих тіл:	$\rho_t = 7800 \text{ кг/м}^3$
Густина матеріалу:	$\rho_m = 1400 \text{ кг/м}^3$
Коефіцієнт заповнення матеріалом:	$\psi = 0,15$
ККД приводу:	$\eta = 0,9$
Потужність електродвигуна:	$N_{\text{дв}} = 306 \text{ кВт}$
Питома продуктивність:	$q = 0,035 \text{ т/(кВт}\cdot\text{год)}$
Мелючі тіла:	сталеві кулі
Робочий орган:	барабан
Футеровка:	змінна

3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

Базова конструкція двокамерного барабанного кульового млина складається з робочого барабана, завантажувального та розвантажувального пристроїв, привода, опорних вузлів і допоміжних елементів. Основним робочим органом машини є барабан, усередині якого розміщуються мелючі тіла та матеріал, що підлягає подрібненню. Обертання барабана забезпечує переміщення мелючих тіл, унаслідок чого відбувається руйнування частинок матеріалу ударом і стиранням.

Загальний вигляд двокамерного барабанного кульового млина наведено на рисунку 3.1.

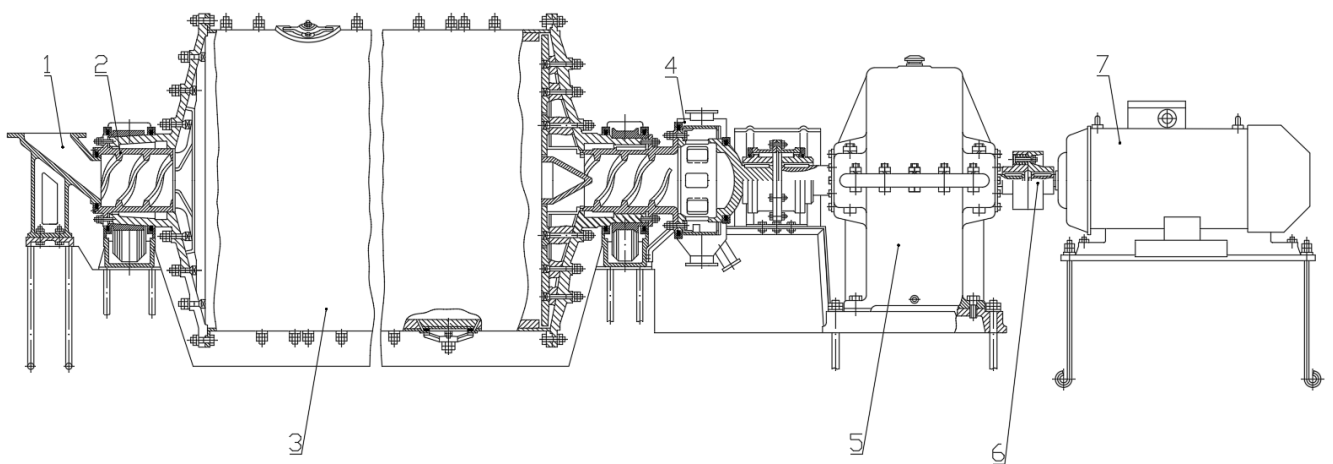


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд двокамерного барабанного кульового млина

Завантажувальний жолоб 1 призначений для подавання вихідного матеріалу до внутрішньої порожнини млина. Через нього матеріал спрямовується до завантажувальної частини барабана. Для рівномірнішого переміщення матеріалу в напрямку робочої зони застосовується шнекова насадка 2. Вона сприяє подачі матеріалу всередину барабана та запобігає його накопиченню в зоні завантаження.

Барабан 3 є основним робочим вузлом млина. Він має циліндричну форму і встановлюється на опорних вузлах, які забезпечують його обертання під час роботи. Усередині барабана розміщені мелючі тіла та футеровка. Футеровка захищає корпус

барабана від безпосереднього контакту з мелючими тілами і матеріалом, а також сприймає значну частину ударних та абразивних навантажень. Оскільки футеровка працює в умовах інтенсивного зношування, вона виконується змінною, що дає можливість проводити її заміну під час ремонту або технічного обслуговування.

Барабан млина поділений на дві робочі камери за допомогою міжкамерної перегородки. Такий поділ дозволяє виконувати подрібнення матеріалу послідовно. У першій камері переважає грубіше подрібнення більших частинок матеріалу. Тут мелючі тіла мають інтенсивнішу ударну дію, оскільки саме на початку процесу матеріал має більшу крупність. У другій камері відбувається подальший, тонший помел, де матеріал доводиться до необхідної дисперсності. Міжкамерна перегородка забезпечує перехід матеріалу з першої камери до другої та одночасно розділяє робочі зони млина.

Розвантажувальний патрубок 4 призначений для виведення подрібненого матеріалу з барабана після завершення процесу помелу. Через нього готовий продукт спрямовується до наступного обладнання технологічної лінії. Конструкція розвантажувальної частини повинна забезпечувати безперервне видалення матеріалу та запобігати його надмірному накопиченню всередині барабана.

Привод млина складається з електродвигуна 7, муфти 6 та редуктора 5. Електродвигун створює обертальний рух, який через муфту передається на редуктор. Редуктор зменшує частоту обертання та збільшує крутний момент, необхідний для обертання барабана з робочим навантаженням. Муфта використовується для з'єднання валів привода та компенсації незначних відхилень, які можуть виникати під час роботи обладнання.

Під час роботи млина мелючі тіла виконують основну руйнівну дію на матеріал. У кульових млинах подрібнення відбувається переважно за рахунок ударної та стиральної дії сталевих куль [5].

Схема руху мелючих тіл у барабані кульового млина наведена на рисунку 3.2.

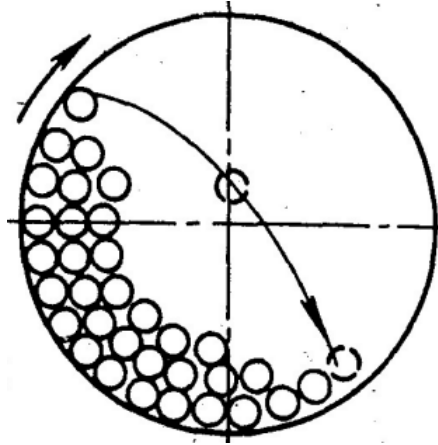


Рисунок 3.2 – Схема руху мелючих тіл у барабані кульового млина

Характер руху мелючих тіл залежить від частоти обертання барабана. При недостатній частоті обертання кулі переважно перекочуються в нижній частині барабана, тому інтенсивність подрібнення є невисокою. При надмірній частоті обертання мелючі тіла можуть притискатися до внутрішньої поверхні барабана відцентровою силою і не виконувати ефективного подрібнення. Найбільш доцільним є такий режим, за якого кулі піднімаються на певну висоту, після чого падають на шар матеріалу. У цьому випадку забезпечується поєднання ударної та стиральної дії, що підвищує ефективність помелу [3].

Під час роботи матеріал поступово переміщується вздовж барабана від завантажувальної частини до розвантажувальної. У першій камері відбувається початкове подрібнення, після чого матеріал через міжкамерну перегородку переходить до другої камери. У другій камері частинки додатково подрібнюються до потрібної тонкості. Після проходження робочого об'єму млина готовий продукт виводиться через розвантажувальний патрубок.

Особливістю роботи барабанного кульового млина є значні навантаження на внутрішні елементи барабана. Під час падіння мелючих тіл виникають ударні навантаження, а під час перекочування куль і руху матеріалу - абразивне зношування. Найбільш інтенсивно ці процеси проявляються у зоні контакту мелючих тіл з футеровкою. Саме тому футеровка є одним із найважливіших елементів конструкції млина, оскільки вона безпосередньо впливає на довговічність барабана та стабільність роботи обладнання.

4 ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД

Метою літературно-патентного огляду є аналіз сучасних конструктивних рішень, спрямованих на підвищення довговічності, зносостійкості та ремонтпридатності футеровки барабанних кульових млинів. Вибір раціональної конструкції футеровочного вузла має важливе значення для надійності роботи млина та зменшення витрат на його обслуговування.

У межах огляду розглянуто патентні рішення, у яких запропоновано різні способи вдосконалення футеровки: використання комбінованих матеріалів, застосування пружних шарів для демпфування ударів, введення зносостійких вставок, а також створення конструкцій з окремими змінними елементами. Особливу увагу приділено рішенням, які можуть бути використані саме для модернізації робочої поверхні барабана кульового млина.

На основі порівняння розглянутих патентів необхідно обрати найбільш доцільний варіант модернізації футеровки. При виборі враховуються конструктивна простота, можливість адаптації до розробленої моделі барабана, здатність футеровки сприймати ударні навантаження, захищати корпус млина та забезпечувати ефективну роботу мелючих тіл.

Таблиця розглянутих патентів наведена в **додатку А**.

4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації футеровки кульового млина

Аналіз літературних джерел показує, що футеровка барабанних млинів працює в умовах поєднаної ударної та абразивної дії. Основними напрямками підвищення її довговічності є застосування зносостійких матеріалів, використання комбінованих конструкцій, удосконалення профілю робочої поверхні та покращення умов монтажу і заміни футеровочних елементів. Особливе значення має форма робочої поверхні футеровки, оскільки вона впливає на рух мелючих тіл і характер подрібнення матеріалу [1, 5].

Для вибору варіанта модернізації було розглянуто декілька патентних рішень, пов'язаних із удосконаленням футеровки барабанних млинів.

Одним із розглянутих рішень є патент US9475058B2 [6], у якому запропоновано футеровочний елемент із твердими вставками, розміщеними в пружному матеріалі (рис. 4.1). Таке конструктивне рішення дозволяє поєднати зносостійкість твердих елементів і здатність пружної основи частково гасити ударні навантаження. Тверді вставки сприймають основне абразивне зношування, а еластомерне тіло зменшує передачу ударів на корпус барабана. Перевагою такого підходу є підвищення ресурсу футеровки та зменшення ймовірності її пошкодження під час роботи млина.

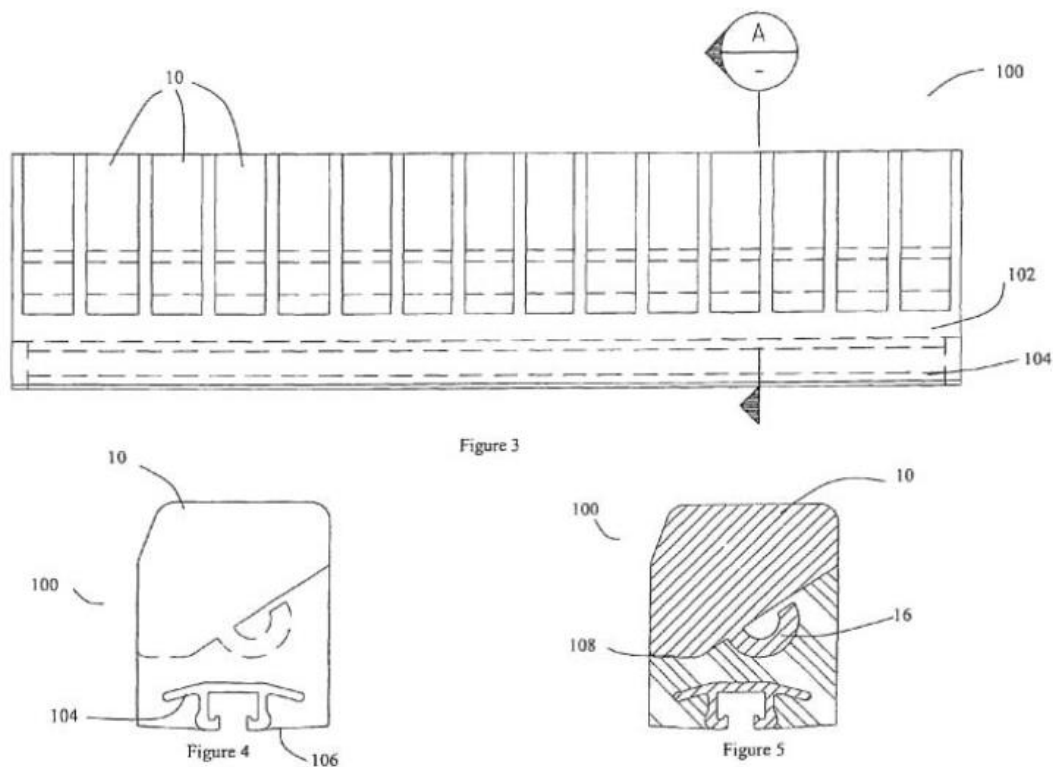


Рисунок 4.1 – Патент US9475058B2

У патенті US20100233420A1 [7] запропоновано композитну футеровку для кульових млинів, яка складається з верхнього шару легованої литої сталі та нижнього гумового шару (рис. 4.2). Верхній металевий шар безпосередньо контактує з мелючими тілами та матеріалом, тому сприймає основне абразивне навантаження. Нижній гумовий шар виконує амортизуючу функцію і зменшує передачу ударних навантажень на корпус барабана. Така конструкція є достатньо

простою та зрозумілою, оскільки поєднує зносостійкість металу та пружні властивості гуми.

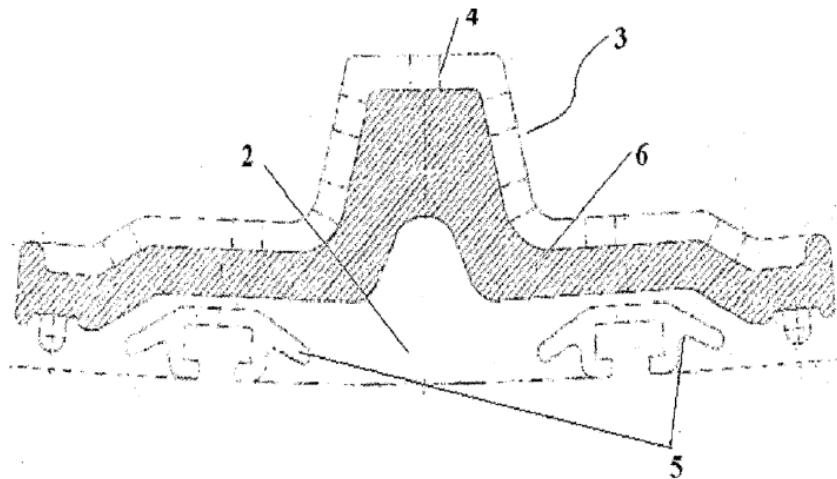


Рисунок 4.2 – Патент US20100233420A1

Патент EP1838446B1 [8] розглядає футеровочний вузол млина як систему окремих елементів, що виконують різні функції (рис. 4.3). У конструкції передбачені порожнини для розміщення елементів зношування, а також амортизуючі частини, які сприймають частину ударних навантажень. Завдяки цьому футеровка не є суцільною деталлю, а складається з окремих функціональних елементів. Такий підхід підвищує ремонтпридатність вузла, оскільки найбільш навантажені частини можуть бути замінені окремо.

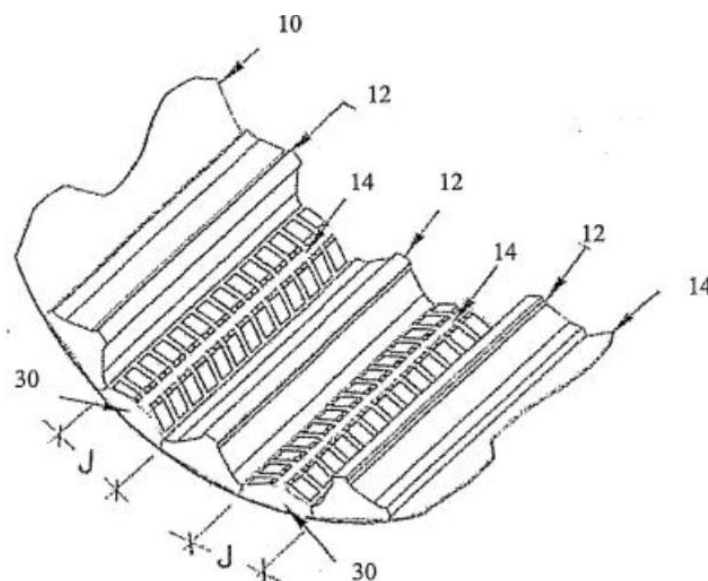


Рисунок 4.3 – Патент EP1838446B1

Окремо було розглянуто патент US9375722B2 [9], у якому описано зносостійку плиту для розвантажувальної стінки млина (рис. 4.4). Конструкція містить металеву опорну частину, що встановлюється на стінку млина, а також робочу зносостійку поверхню. Таке рішення спрямоване на захист ділянки, через яку проходить подрібнений матеріал, і працює в умовах інтенсивного абразивного зношування. Перевагою даного патенту є орієнтація на конкретний вузол млина, який потребує підвищеної довговічності.

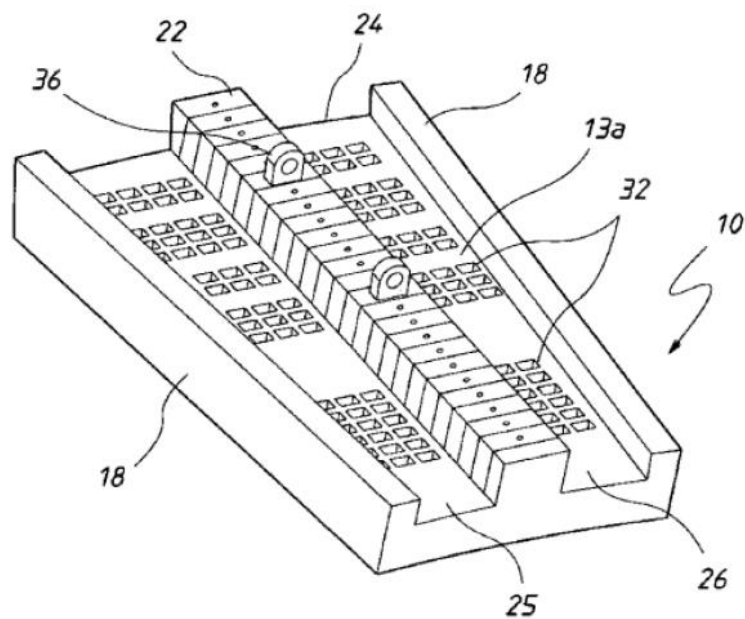


Рисунок 4.4 – Патент US9375722B2

Також було розглянуто патент WO2015081800A1 [10], у якому запропоновано футеровочний вузол кульового млина та спосіб його встановлення (рис. 4.5). Дане рішення спрямоване на удосконалення монтажу футеровки та підвищення зручності її заміни під час обслуговування млина. У конструкції враховано, що футеровка кульових млинів працює в умовах значного зношування, тому важливим є не лише вибір матеріалу, а й спосіб кріплення та заміни футеровочних елементів. Перевагою такого рішення є підвищення ремонтпридатності млина та зменшення часу простою під час заміни зношених плит.

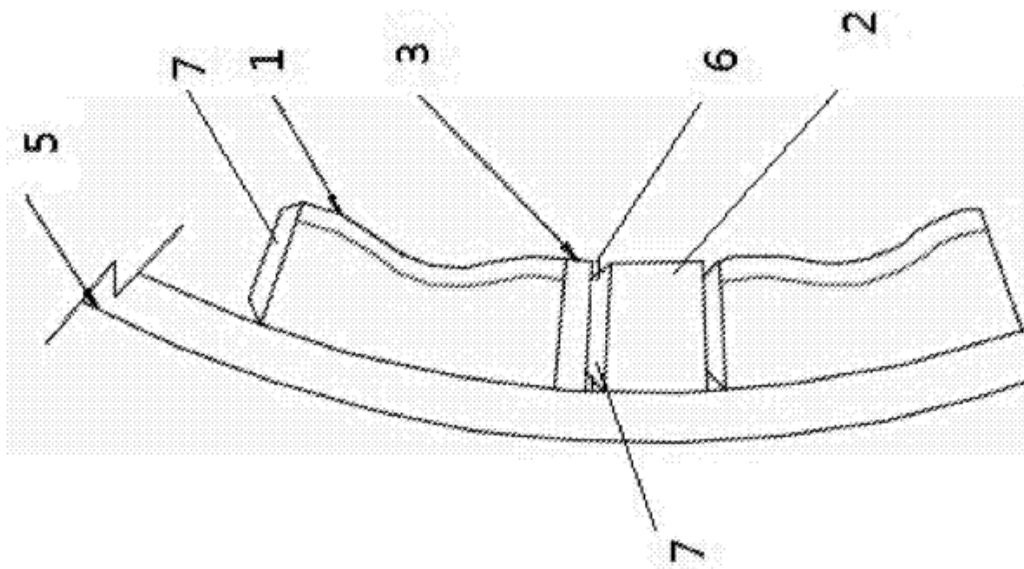


Рисунок 4.5 – Патент WO2015081800A1

Порівняння розглянутих патентів показує, що модернізація футеровки барабанних млинів може здійснюватися різними способами. Найбільш поширеними напрямками є застосування комбінованих матеріалів, використання пружних шарів для демпфування ударних навантажень, введення зносостійких вставок, удосконалення способів кріплення та підвищення ремонтпридатності окремих елементів. Кожне з розглянутих рішень має свої переваги, однак для подальшої модернізації необхідно обрати таку конструкцію, яка поєднує захист корпусу барабана, зниження ударної дії та ефективну роботу футеровки як елемента, що взаємодіє з мелючими тілами.

Окремо для подальшої модернізації було розглянуто технічне рішення за патентом US8235318B2, у якому футеровочний елемент виконано як складену конструкцію з еластомерного тіла, опорної пластини та зносостійкої вставки-ліфтера [11].

4.2 Обґрунтування вибору модернізації футеровки

За результатами проведеного літературно-патентного огляду для подальшої модернізації футеровки було обрано технічне рішення за патентом US8235318B2 [11]. Це технічне рішення стосується футеровочного елемента барабанного млина,

який виконаний не у вигляді суцільної металевої плити, а як комбінована конструкція з кількох функціональних частин. Такий підхід забезпечує поєднання в одному вузлі захисної, демпфувальної та робочої функцій футеровки.

Конструкція за патентом передбачає використання основного еластомерного тіла, нееластомерної опорної пластини та зносостійкої вставки, яка формує виступаючу робочу частину футеровки. Така виступаюча частина виконує роль ліфтера, тобто впливає на рух мелючих тіл усередині барабана та сприяє ефективнішому подрібненню матеріалу (рис. 4.6).

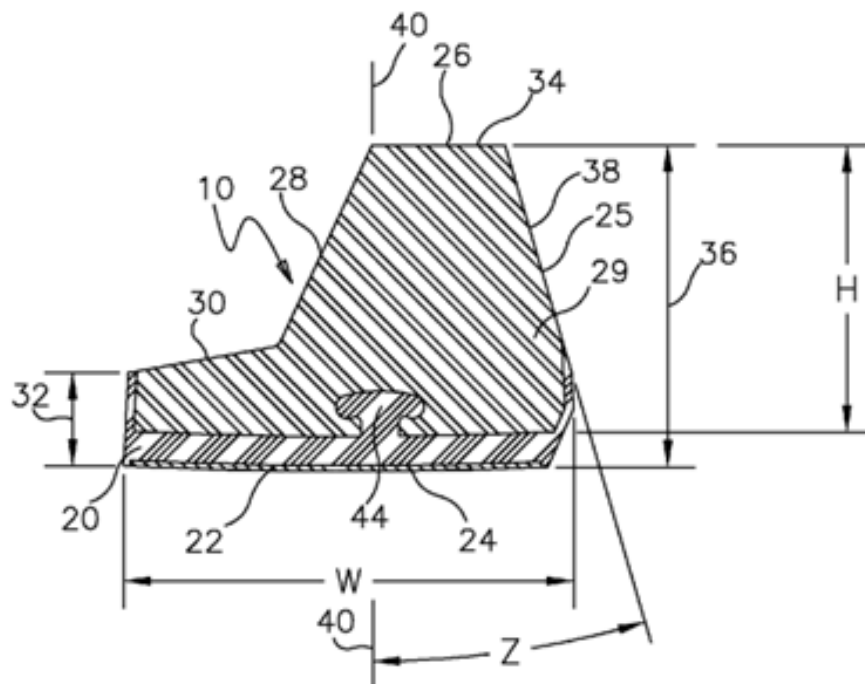


Рисунок 4.6 – Конструкція футеровочного елемента за патентом US8235318B2

Перевагою обраного рішення є те, що окремі частини футеровки виконують різні функції. Опорна пластина забезпечує надійне встановлення футеровочного елемента на корпусі барабана. Основне тіло футеровки може частково сприймати та гасити ударні навантаження від мелючих тіл. Зносостійка вставка-ліфтер безпосередньо контактує з матеріалом і кулями, тому працює як найбільш навантажений елемент конструкції.

Порівняно з іншими розглянутими патентами, вибране рішення є більш доцільним для модернізації робочої зони барабана кульового млина. Інші патенти переважно спрямовані або на підвищення зносостійкості окремих елементів, або на

покращення способу встановлення футеровки, або на застосування пружних шарів. Натомість патент US8235318B2 поєднує декілька важливих напрямів одночасно: захист корпусу барабана, демпфування ударних навантажень, використання зносостійкого елемента та формування ліфтерної частини.

Також важливо, що обране рішення можна адаптувати до розробленої конструкції футеровочного вузла. У межах роботи було прийнято зберегти корпус барабана та схему кріплення, а саму футеровку виконати складеною: з опорною пластиною, основним тілом футеровки та окремою вставкою-ліфтером. Такий підхід створює можливість виконати розрахунок модернізованого футеровочного вузла за прийнятими розрахунковими умовами та оцінити вплив складеної конструкції на його напружено-деформований стан.

Отже, патент US8235318B2 обрано як основу для модернізації, оскільки він найбільш повно відповідає умовам роботи футеровки кульового млина. Запропонована конструкція сприяє підвищенню довговічності вузла, зменшенню впливу ударних навантажень на корпус барабана та спрощенню заміни найбільш зношеного елемента футеровки.

Остаточна оцінка працездатності запропонованої конструкції виконується у розділі розрахунків шляхом визначення навантажень на футеровочний вузол та аналізу його напружено-деформованого стану.

5 РОЗРАХУНКИ

У даному розділі виконано розрахунки, необхідні для визначення основних робочих параметрів кульового млина та перевірки працездатності його основних елементів. Розрахункова частина включає параметричні та кінематичні розрахунки, розрахунки на міцність корпусу барабана і елементів кріплення футеровки, а також числове моделювання однієї камери барабана зі звичайною й модернізованою футеровкою.

5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки

Режим руху мелючих тіл у барабані кульового млина залежить від частоти його обертання: при малій швидкості переважає стирання, а при раціональній - ударно-стиральне подрібнення. При надмірному збільшенні частоти кулі притискаються до стінки барабана відцентровими силами, що знижує ефективність помелу (рис. 5.1). Тому для вибору робочого режиму необхідно визначити критичну частоту обертання барабана [12].

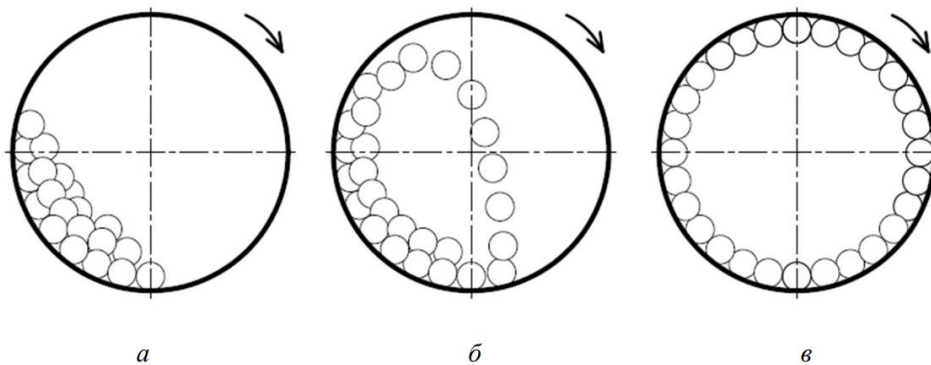


Рисунок 5.1 - Схема руху мелючих тіл у барабані кульового млина: а – повільне обертання; б – оптимальне обертання; в – критичне обертання

Критична частота обертання барабана млина:

$$n_{кр} = \frac{42,4}{\sqrt{D}} = \frac{42,4}{\sqrt{2,4}} = 27,37 \text{ об/хв},$$

де D – внутрішній діаметр барабана, м.

Оптимальна частота обертання барабана:

$$n = (0,65 \dots 0,95) \cdot n_{кр} = 0,75 \cdot 27,37 = 20,53 \text{ об/хв.}$$

Кутова швидкість барабана:

$$\omega = \pi \cdot n / 30 ,$$

де n - оптимальна частота обертання барабана, об/хв.

$$\omega = 3,14 \cdot 20,53 / 30 = 2,15 \text{ рад/с.}$$

Колова швидкість внутрішньої поверхні барабана визначається за формулою:

$$v = \pi \cdot D \cdot n / 60.$$

$$v = 3,14 \cdot 2,4 \cdot 20,53 / 60 = 2,58 \text{ м/с.}$$

Колова швидкість барабана становить 2,58 м/с. При такій швидкості забезпечується підйом мелючих тіл на достатню висоту з подальшим їх падінням на матеріал, що відповідає ударно-стиральному режиму подрібнення.

Робочий об'єм барабана визначається за формулою:

$$V_6 = \pi \cdot D^2 \cdot L / 4 ,$$

де L - довжина барабана, м.

$$V_6 = 3,14 \cdot 2,4^2 \cdot 4,8 / 4 = 21,7 \text{ м}^3.$$

Робочий об'єм барабана становить 21,7 м³. Цей параметр є основним для визначення об'єму завантаження мелючими тілами та матеріалом.

Ефективність помелу значною мірою залежить від кількості мелючих тіл. Для кульових млинів кількість куль задають через коефіцієнт заповнення φ , який характеризує частку об'єму барабана, зайняту кулями. Для двокамерних млинів сухого помелу φ зазвичай приймають у межах 0,27 ... 0,36. У даному випадку прийнято $\varphi = 0,28$.

Об'єм мелючих тіл у барабані визначається залежно від ступеня заповнення барабана:

$$V_T = \varphi \cdot V_6 ,$$

де φ - ступінь заповнення барабана мелючими тілами.

$$V_T = 0,28 \cdot 21,70 = 6,08 \text{ м}^3.$$

Маса мелючих тіл визначається за формулою:

$$m_T = \rho_T \cdot V_T ,$$

де ρ_T - густина мелючих тіл, кг/м³;

V_T - об'єм мелючих тіл, м³.

$$m_T = 7800 \cdot 6,08 = 47424 \text{ кг} = 47,42 \text{ т.}$$

Маса мелючих тіл у барабані становить 47,42 т. Значення маси мелючого завантаження є важливим, оскільки саме воно створює основне навантаження на футеровку барабана під час роботи млина.

Матеріал у барабані знаходиться у вигляді потоку і заповнює частину вільного об'єму між кулями. Для параметричних розрахунків кількість матеріалу в млині приймають через коефіцієнт заповнення матеріалом ψ . Прийняте значення ψ залежить від режиму роботи та властивостей матеріалу і використовується для орієнтовної оцінки маси матеріалу всередині барабана.

Об'єм матеріалу в барабані визначається за формулою:

$$V_M = \psi \cdot V_6 ,$$

де ψ - коефіцієнт заповнення барабана матеріалом.

$$V_M = 0,15 \cdot 21,71 = 3,26 \text{ м}^3.$$

Маса матеріалу в барабані визначається за формулою:

$$m_M = \rho_M \cdot V_M ,$$

де ρ_M - густина матеріалу, кг/м³;

V_M - об'єм матеріалу, м³.

$$m_M = 1400 \cdot 3,26 = 4564 \text{ кг} = 4,56 \text{ т.}$$

Маса матеріалу в барабані становить 4,56 т.

Сумарна маса завантаження (кулі + матеріал) характеризує рівень інерційних і динамічних навантажень у млині та використовується для подальших перевірочних розрахунків окремих елементів конструкції.

Сумарна маса завантаження барабана:

$$\Sigma m = m_T + m_M.$$

$$\Sigma m = 47,42 + 4,56 = 51,98 \text{ т.}$$

Сумарна маса завантаження барабана становить 51,98 т. Надалі це значення може бути використане для оцінки навантаження на футеровку, корпус барабана та опорні елементи млина.

Сила ваги сумарного завантаження:

$$F_{\text{зав}} = \Sigma m \cdot g,$$

де Σm - сумарна маса завантаження, кг;

g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Оскільки:

$$\Sigma m = 51,98 \text{ т} = 51980 \text{ кг}.$$

тоді:

$$F_{\text{зав}} = 51980 \cdot 9,81 = 509923,8 \text{ Н} \approx 510 \text{ кН}.$$

Корисна потужність на барабані (з урахуванням втрат у приводі):

$$N_{\text{б}} = \eta \cdot N_{\text{дв}} = 0,90 \cdot 306 = 275,4 \text{ кВт},$$

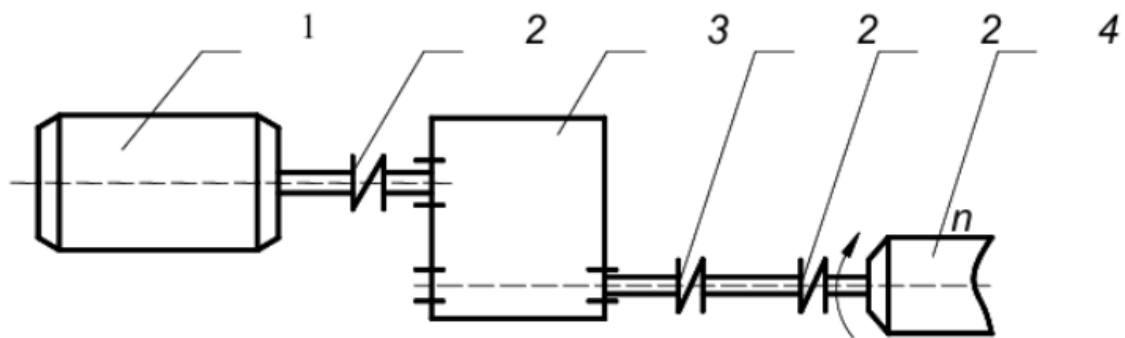
де η – ККД приводу;

$N_{\text{дв}}$ – потужність електродвигуна, кВт.

Питома потужність на завантаження:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N_{\text{б}}}{\Sigma m} = \frac{275,4}{51,98} = 5,3 \text{ кВт/т}.$$

Обертання барабана млина забезпечується приводом, який складається з електродвигуна, муфти та редуктора. Крутний момент від електродвигуна через муфту передається на редуктор, а далі - на барабан млина. Кінематична схема приводу наведена на рисунку 5.2.



1 – електродвигун, 2 – муфта, 3 – редуктор, 4 – барабан.

Рисунок 5.2 - Кінематична схема приводу двокамерного кульового млина

Крутний момент на валу барабана є важливим параметром для приводу та з'єднувальних елементів (муфти, редуктора). Його визначають за відомими значеннями корисної потужності на барабані та робочої частоти обертання.

Крутний момент на валу барабана:

$$T = \frac{9550 \cdot N_6}{n} = \frac{9550 \cdot 275,4}{20,53} = 128\,108,62 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 128 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продуктивність кульового млина залежить від властивостей матеріалу, режиму роботи, частоти обертання барабана, типу футеровки, кількості мелючих тіл та потужності приводу. Для орієнтовної оцінки продуктивності використаємо питому продуктивність млина на 1 кВт корисної потужності приводу.

Продуктивність млина визначається за формулою:

$$Q_{\text{пр}} = q_{\text{п}} \cdot N_6,$$

де $q_{\text{п}}$ - питома продуктивність млина, т/(кВт·год);

N_6 - корисна потужність на барабані, кВт.

$$Q_{\text{пр}} = 0,035 \cdot 275,4 = 9,64 \text{ т/год}.$$

Розрахункова продуктивність кульового млина становить 9,64 т/год.

Питома витрата енергії на помел характеризує кількість енергії, яка витрачається на подрібнення однієї тонни матеріалу. Цей показник дозволяє оцінити енергетичну ефективність роботи млина та порівнювати різні режими його роботи.

Питома витрата енергії визначається за формулою:

$$E_{\text{пит}} = N_6 / Q_{\text{пр}}.$$

$$E_{\text{пит}} = 275,4 / 9,64 = 28,57 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}.$$

Питома витрата енергії на помел становить 28,57 кВт·год/т.

Орієнтовний час перебування матеріалу в барабані визначається відношенням маси матеріалу, що одночасно знаходиться в барабані, до продуктивності млина:

$$t_{\text{пер}} = m_{\text{м}} / Q_{\text{пр}}.$$

$$t_{\text{пер}} = 4,56 / 9,64 = 0,47 \text{ год}.$$

Отримане значення в хвиликах:

$$t_{\text{пер}} = 0,47 \cdot 60 = 28,2 \text{ хв}.$$

Орієнтовний час перебування матеріалу в барабані становить 28,2 хв. Це значення характеризує середню тривалість перебування матеріалу в зоні подрібнення і залежить від продуктивності млина, об'єму завантаження та режиму роботи.

Виконані параметричні та кінематичні розрахунки дозволили визначити основні робочі параметри кульового млина, які характеризують режим руху мелючих тіл, завантаження барабана, енергетичні показники та продуктивність машини. Під час розрахунків було визначено критичну та оптимальну частоту обертання барабана, кутову і колову швидкість, робочий об'єм барабана, масу мелючих тіл, масу матеріалу та сумарне завантаження.

Окремо визначено силу ваги завантаження, корисну потужність на барабані, питому потужність на завантаження та крутний момент на валу барабана. Крім того, розраховано питому витрату енергії на помел і орієнтовний час перебування матеріалу в барабані, що дає змогу додатково оцінити енергетичну ефективність та технологічний режим роботи млина.

Отримані параметри мають важливе значення для подальшої оцінки силової дії завантаження на футеровочний вузол, корпус барабана та елементи приводу. Вони також використовуються як вихідні дані для розрахунків на міцність і подальшого числового моделювання камери барабана з модернізованою футеровкою.

Узагальнені результати параметричних та кінематичних розрахунків наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати параметричних та кінематичних розрахунків кульового млина

Параметр	Позначення	Значення
Внутрішній діаметр барабана	D	2,4 м
Довжина барабана	L	4,8 м
Критична частота обертання барабана	$n_{кр}$	27,37 об/хв
Оптимальна частота обертання барабана	n	20,53 об/хв

Кутова швидкість барабана	ω	2,15 рад/с
Колова швидкість внутрішньої поверхні барабана	v	2,58 м/с
Робочий об'єм барабана	V_6	21,70 м ³
Об'єм мелючих тіл	V_T	6,08 м ³
Маса мелючих тіл	m_T	47,42 т
Об'єм матеріалу в барабані	V_M	3,26 м ³
Маса матеріалу	m_M	4,56 т
Сумарна маса завантаження	Σm	51,98 т
Сила ваги сумарного завантаження	$F_{зав}$	510 кН
Корисна потужність на барабані	N_6	275,4 кВт
Питома потужність на завантаження	$N_{уд}$	5,3 кВт/т
Крутний момент на валу барабана	T	128,11 кН·м
Розрахункова продуктивність млина	$Q_{пр}$	9,64 т/год
Питома витрата енергії на помел	$E_{пит}$	28,57 кВт·год/т
Орієнтовний час перебування матеріалу	$t_{пер}$	28,2 хв

5.2 Розрахунки на міцність

Розрахунки на міцність виконуються для перевірки працездатності основних елементів барабана кульового млина під дією робочих навантажень. Під час роботи млина корпус барабана сприймає навантаження від власної маси, маси футеровки, торцевих кришок, міжкамерної перегородки, мелючих тіл і матеріалу, а також крутний момент, що передається від привода.

Для виконання перевірконого розрахунку барабан розглядається як порожниста циліндрична оболонка, що спирається на дві опори. Розрахункова схема приймається у вигляді балки на двох опорах, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням. Така схема дозволяє визначити опорні реакції, поперечні сили, згинальні моменти, нормальні напруження від згину, дотичні напруження від крутного моменту та еквівалентні напруження в корпусі барабана.

Вихідні дані для розрахунку:

$D_{\text{вн}} = 2,4$ м - внутрішній діаметр барабана;

$D_{\text{зовн}} = 2,45$ м - зовнішній діаметр барабана;

$\delta_{\text{кор}} = 0,025$ м - товщина стінки барабана;

$L_6 = 4,8$ м - довжина барабана;

$L_{\text{оп}} = 5,71$ м - відстань між опорами барабана;

$\rho_{\text{ст}} = 7850$ кг/м³ - густина сталі;

$m_{\text{т}} = 47,42$ т - маса мелючих тіл;

$m_{\text{м}} = 4,56$ т - маса матеріалу;

$m_{\text{ф1}} = 223$ кг - маса одного футеровочного елемента;

$z_{\text{ф}} = 180$ шт. - кількість футеровочних елементів;

$T = 128,11$ кН·м - крутний момент на валу барабана.

Матеріал корпусу барабана приймаємо - сталь Ст3сп. Для розрахунку приймаємо допустиме напруження:

$$[\sigma] = 140 \text{ МПа.}$$

Маса корпусу барабана визначається через об'єм металу порожнистого циліндра:

$$V_{\text{кор}} = \pi \cdot (D_{\text{зовн}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot L_6 / 4.$$

$$V_{\text{кор}} = 3,14 \cdot (2,45^2 - 2,4^2) \cdot 4,8 / 4 = 0,914 \text{ м}^3.$$

Маса корпусу барабана:

$$m_{\text{кор}} = V_{\text{кор}} \cdot \rho_{\text{ст}}.$$

$$m_{\text{кор}} = 0,914 \cdot 7850 = 7176 \text{ кг} = 7,18 \text{ т.}$$

Маса футеровки визначається за кількістю футеровочних вузлів. У першій камері встановлено 6 рядів по 12 вузлів, у другій камері - 9 рядів по 12 вузлів.

Загальна кількість футеровочних вузлів:

$$z_{\text{ф}} = 6 \cdot 12 + 9 \cdot 12 = 72 + 108 = 180 \text{ шт.}$$

Маса футеровки:

$$m_{\text{ф}} = z_{\text{ф}} \cdot m_{\text{ф1}}.$$

$$m_{\text{ф}} = 180 \cdot 223 = 40140 \text{ кг} = 40,14 \text{ т.}$$

Маса торцевих кришок визначається орієнтовно. Для спрощення кожну кришку приймаємо як сталевий диск діаметром, що дорівнює зовнішньому діаметру барабана. Товщина кришки становить $\delta_{кр} = 0,05$ м.

Об'єм двох торцевих кришок:

$$V_{кр} = 2 \cdot \pi \cdot D_{зовн}^2 \cdot \delta_{кр} / 4.$$

$$V_{кр} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,45^2 \cdot 0,05 / 4 = 0,472 \text{ м}^3.$$

Маса двох торцевих кришок:

$$m_{кр} = V_{кр} \cdot \rho_{ст}.$$

$$m_{кр} = 0,472 \cdot 7850 = 3701 \text{ кг} = 3,70 \text{ т}.$$

Міжкамерна перегородка має товщину 0,30 м. Оскільки перегородка має отвори та не є суцільним диском, для орієнтовної оцінки її маси вводимо коефіцієнт заповнення металом $k_{пер} = 0,35$.

Об'єм металу міжкамерної перегородки:

$$V_{пер} = \pi \cdot D_{вн}^2 \cdot \delta_{пер} \cdot k_{пер} / 4.$$

$$V_{пер} = 3,14 \cdot 2,4^2 \cdot 0,30 \cdot 0,35 / 4 = 0,475 \text{ м}^3.$$

Маса міжкамерної перегородки:

$$m_{пер} = V_{пер} \cdot \rho_{ст}.$$

$$m_{пер} = 0,475 \cdot 7850 = 3728,75 \text{ кг} = 3,73 \text{ т}.$$

Повна маса конструктивних елементів барабана без урахування мелючих тіл і матеріалу:

$$m_{констр} = m_{кор} + m_{ф} + m_{кр} + m_{пер}.$$

$$m_{констр} = 7,18 + 40,14 + 3,70 + 3,73 = 54,75 \text{ т}.$$

Маса робочого завантаження барабана:

$$m_{зав} = m_{т} + m_{м}.$$

$$m_{зав} = 47,42 + 4,56 = 51,98 \text{ т}.$$

Повна маса барабана з футеровкою, кришками, міжкамерною перегородкою, мелючими тілами та матеріалом:

$$m_{заг} = m_{констр} + m_{зав}$$

$$m_{заг} = 54,75 + 51,98 = 106,73 \text{ т}.$$

Під час роботи млина мелючі тіла здійснюють складний рух у барабані та створюють додаткові динамічні навантаження на корпус і футеровку. Тому під час визначення розрахункового навантаження динамічний коефіцієнт доцільно застосовувати до маси робочого завантаження, а власну масу конструктивних елементів враховувати як статичне навантаження. Приймаємо коефіцієнт динамічності:

$$k_d = 1,5.$$

Еквівалентна розрахункова маса:

$$m_{\text{розр}} = m_{\text{констр}} + k_d \cdot m_{\text{зав}} \cdot$$
$$m_{\text{розр}} = 54,75 + 1,5 \cdot 51,98 = 132,72 \text{ т.}$$

Розрахункове навантаження на барабан:

$$F_{\text{розр}} = m_{\text{розр}} \cdot g \cdot$$

де g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$F_{\text{розр}} = 132720 \cdot 9,81 = 1301983 \text{ Н} \approx 1302 \text{ кН.}$$

Для подальшого розрахунку приймаємо, що розрахункове навантаження рівномірно розподілене між опорами барабана. Відстань між опорами за кресленням загального виду становить:

$$L_{\text{оп}} = 5710 \text{ мм} = 5,71 \text{ м.}$$

Інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження:

$$q = F_{\text{розр}} / L_{\text{оп}} \cdot$$
$$q = 1302 / 5,71 = 228 \text{ кН/м.}$$

Для подальшого розрахунку барабан кульового млина розглядаємо як балку на двох опорах, навантажену рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю q . Така розрахункова схема є спрощеною, однак вона дає можливість оцінити напружений стан корпусу барабана від дії власної маси конструкції, футеровки, мелючих тіл і матеріалу [13].

Розрахункова схема барабана наведена на рисунку 5.3.

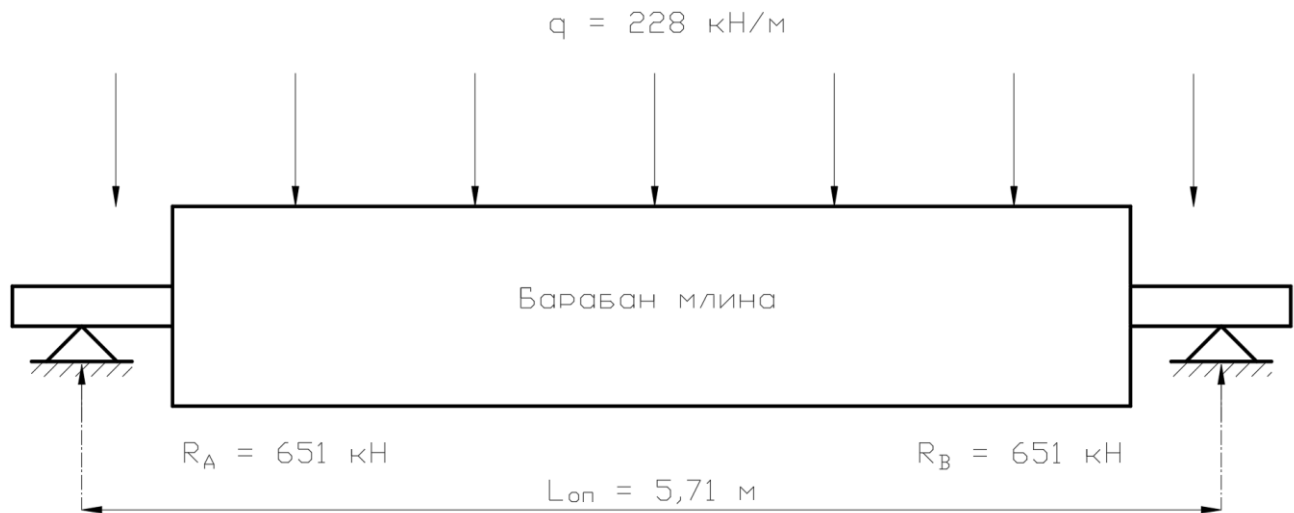


Рисунок 5.3 - Розрахункова схема барабана кульового млина

Оскільки навантаження прийняте рівномірно розподіленим, а схема є симетричною, реакції опор будуть однаковими:

$$R_A = R_B = F_{\text{розр}}/2 ,$$

де $F_{\text{розр}}$ - розрахункове навантаження на барабан, кН.

$$R_A = R_B = 1302 / 2 = 651 \text{ кН.}$$

Для визначення поперечної сили в довільному перерізі барабана використовується залежність:

$$Q_x = R_A - q \cdot x ,$$

де x - відстань від лівої опори до розрахункового перерізу, м;

q - інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження, кН/м.

На лівій опорі, при $x = 0$:

$$Q_0 = R_A = 651 \text{ кН.}$$

У середині прольоту, при $x = L_{\text{оп}} / 2$:

$$x = 5,71/2 = 2,855 \text{ м.}$$

$$Q = 651 - 228,0 \cdot 2,855 \approx 0 \text{ кН.}$$

На правій опорі, при $x = L_{\text{оп}}$:

$$Q = 651 - 228,0 \cdot 5,71 \approx -651 \text{ кН.}$$

Таким чином, поперечна сила змінюється за лінійним законом: від максимального додатного значення на лівій опорі до максимального від'ємного значення на правій опорі. Епюра поперечних сил наведена на рисунку 5.4.

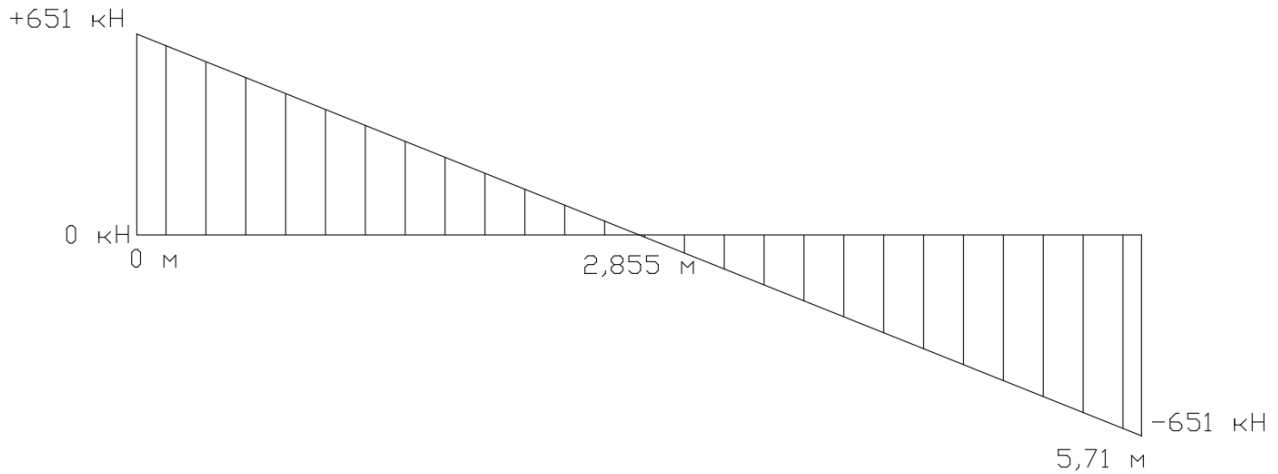


Рисунок 5.4 - Епюра поперечних сил для барабана млина

Згинальний момент у довільному перерізі барабана визначається за формулою:

$$M_x = R_A \cdot x - q \cdot x^2/2 ,$$

де R_A - реакція лівої опори, кН;

q - інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження, кН/м;

x - координата перерізу, м.

На опорах згинальний момент дорівнює нулю:

$$M_0 = 0 .$$

$$M_L = 0 .$$

Максимальний згинальний момент виникає в середині прольоту, де поперечна сила дорівнює нулю [13]:

$$M_{\max} = q \cdot L_{\text{оп}}^2/8 ,$$

де $L_{\text{оп}}$ - відстань між опорами барабана, м.

$$M_{\max} = 228,0 \cdot 5,71^2/8 = 929,2 \text{ кН} \cdot \text{м} .$$

Отже, максимальний згинальний момент у корпусі барабана становить 929,2 кН·м і виникає в середньому перерізі між опорами. Епюра згинальних моментів наведена на рисунку 5.5.

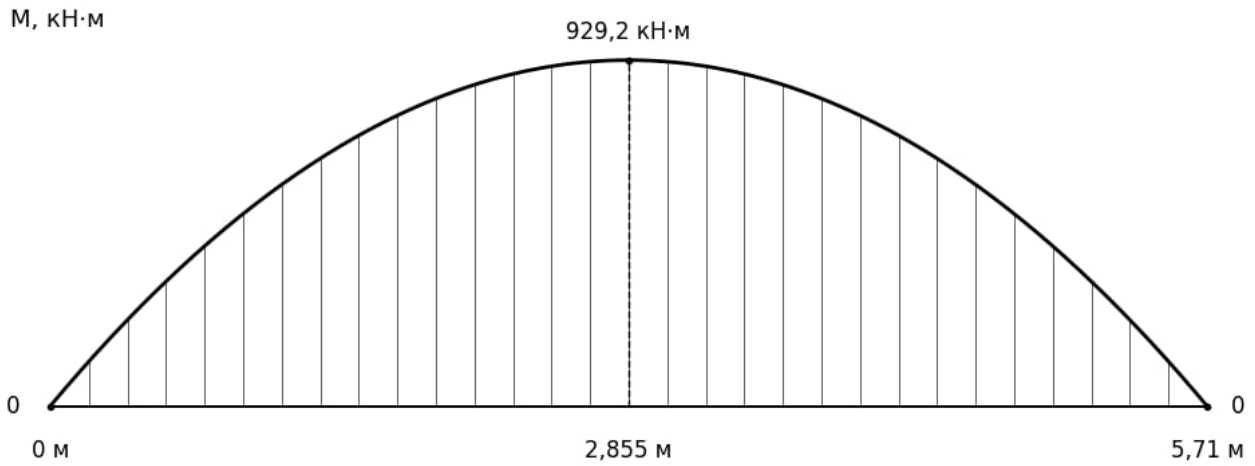


Рисунок 5.5 - Епюра згинальних моментів для барабана млина

Для визначення напружень у корпусі барабана необхідно розрахувати геометричні характеристики його поперечного перерізу. Корпус барабана приймаємо як порожнистий циліндр із зовнішнім діаметром $D_{\text{зовн}} = 2,45$ м і внутрішнім діаметром $D_{\text{вн}} = 2,4$ м. Розрахункова схема поперечного перерізу барабана наведена на рисунку 5.6.

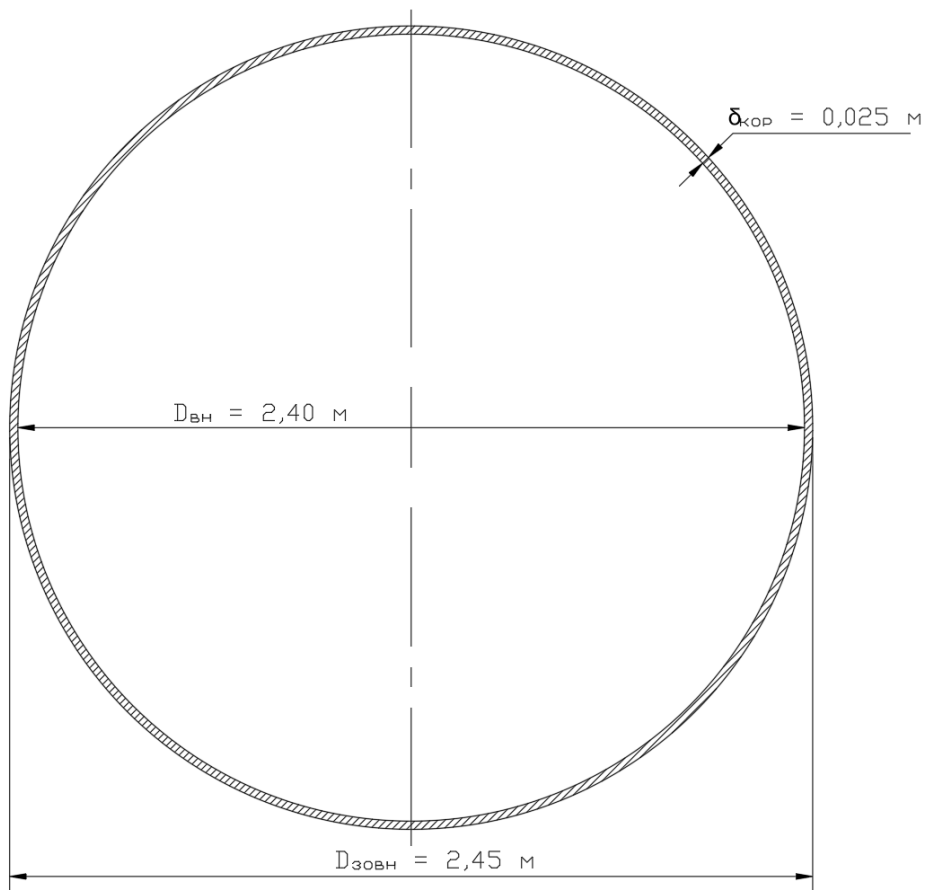


Рисунок 5.6 - Розрахункова схема поперечного перерізу барабана

Момент інерції поперечного перерізу корпусу барабана відносно нейтральної осі визначається за формулою:

$$I = \pi \cdot (D_{\text{зовн}}^4 - D_{\text{вн}}^4) / 64 .$$
$$I = 3,14 \cdot (2,45^4 - 2,4^4) / 64 = 0,140 \text{ м}^4 .$$

Момент опору поперечного перерізу:

$$W = I / (D_{\text{зовн}} / 2) .$$
$$W = 0,140 / (2,45 / 2) = 0,114 \text{ м}^3 .$$

Нормальні напруження від згину визначаються за формулою:

$$\sigma_{\text{зг}} = M_{\text{max}} / W ,$$

де M_{max} - максимальний згинальний момент, Н·м;

W - момент опору поперечного перерізу, м³.

Оскільки $M_{\text{max}} = 929,2 \text{ кН} \cdot \text{м} = 929200 \text{ Н} \cdot \text{м}$, то:

$$\sigma_{\text{зг}} = 929200 / 0,114 = 8150877 \text{ Па} = 8,15 \text{ МПа} .$$

Отримане значення нормальних напружень від згину є значно меншим за допустиме напруження для матеріалу корпусу барабана.

Крім згину, корпус барабана сприймає крутний момент, який передається від привода. Для врахування дії крутного моменту потрібно визначити дотичні напруження.

Полярний момент інерції поперечного перерізу барабана:

$$J_p = \pi \cdot (D_{\text{зовн}}^4 - D_{\text{вн}}^4) / 32 .$$
$$J_p = 3,14 \cdot (2,45^4 - 2,4^4) / 32 = 0,280 \text{ м}^4 .$$

Дотичні напруження від кручення визначаються за формулою:

$$\tau = T \cdot R_{\text{зовн}} / J_p ,$$

де T - крутний момент на валу барабана = 128,11 кН·м = 128110 Н·м;

$R_{\text{зовн}}$ - зовнішній радіус барабана = $D_{\text{зовн}} / 2 = 2,45 / 2 = 1,225 \text{ м}$;

J_p - полярний момент інерції перерізу, м⁴.

$$\tau = 128110 \cdot 1,225 / 0,280 = 560481 \text{ Па} = 0,56 \text{ МПа} .$$

Для оцінки міцності корпусу барабана при одночасній дії згину та кручення визначимо еквівалентне напруження за енергетичною теорією міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(\sigma_{\text{зг}}^2 + 3\tau^2)} .$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(8,15^2 + 3 \cdot 0,56^2)} = 8,21 \text{ МПа.}$$

Умова міцності корпусу барабана має вигляд:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma].$$

$$8,21 \text{ МПа} \leq 140 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується.

Коефіцієнт запасу міцності корпусу барабана:

$$n_3 = [\sigma] / \sigma_{\text{екв}},$$

де $[\sigma]$ - допустиме напруження матеріалу корпусу барабана, МПа.

$$n_3 = 140 / 8,21 = 17,05.$$

Отриманий коефіцієнт запасу міцності показує, що корпус барабана має значний запас міцності за умов прийнятої розрахункової схеми. При цьому найбільші напруження виникають у середній частині прольоту між опорами, де згинальний момент досягає максимального значення.

Для більш детальної оцінки напруженого стану корпусу барабана було виконано розрахунок із застосуванням електронно-обчислювальної машини.

Розрахунок виконано мовою програмування C++. Програма дозволяє визначити значення основних силових і міцнісних параметрів у декількох перерізах барабана від лівої опори до правої. Вихідними даними для розрахунку є довжина прольоту між опорами, інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження, реакції опор, геометричні характеристики поперечного перерізу барабана, крутний момент та допустиме напруження матеріалу.

У програмі використовуються такі залежності:

$$Q_x = R_A - q \cdot x,$$

$$M_x = R_A \cdot x - q \cdot x^2 / 2,$$

$$\sigma_{\text{зг}} = M_x / W,$$

$$\tau = T \cdot R_{\text{зовн}} / J_p,$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(\sigma_{\text{зг}}^2 + 3\tau^2)},$$

$$n_3 = [\sigma] / \sigma_{\text{екв}},$$

де Q_x - поперечна сила в розрахунковому перерізі, кН;

M_x - згинальний момент у розрахунковому перерізі, кН·м;

x - координата перерізу від лівої опори, м;

R_A - реакція лівої опори, кН;

q - інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження, кН/м;

W - момент опору поперечного перерізу барабана, м³;

T - крутний момент, Н·м;

n_3 - коефіцієнт запасу міцності;

$R_{зовн}$ - зовнішній радіус барабана, м;

J_p - полярний момент інерції поперечного перерізу, м⁴;

$[\sigma]$ - допустиме напруження матеріалу, МПа.

Алгоритм роботи програми передбачає послідовне визначення розрахункових параметрів у ряді перерізів барабана. Довжина між опорами поділяється на однакові інтервали, після чого для кожного значення координати x обчислюються поперечна сила, згинальний момент, нормальні напруження від згину, еквівалентні напруження та коефіцієнт запасу міцності.

Результати розрахунку виводяться у вигляді таблиці, що дозволяє оцінити зміну напруженого стану корпусу барабана по довжині прольоту.

Лістинг програми мовою C++ наведено в додатку В.

Результат виконання програми наведено на рисунку 5.7.

```
/c/Diplom_CPP
warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

user@WIN-8IL82QD29VP UCRT64 ~
$ cd /c/Diplom_CPP

user@WIN-8IL82QD29VP UCRT64 /c/Diplom_CPP
$ g++ main.cpp -o main.exe
./main.exe
Rozrachunok napruzhen u korpusi barabana kulovoho mlyna
-----
L = 5.710 m
q = 228.021 kN/m
RA = RB = 651.000 kN
I = 0.140 m^4
W = 0.114 m^3
Jp = 0.280 m^4
tau = 0.560 MPa
-----
  x, m      Q, kN      M, kN*m      sigma, MPa      sigma_eq, MPa      n
-----
  0.000      651.000      0.000      0.000      0.971      144.231
  0.571      520.800      334.549      2.927      3.084      45.400
  1.142      390.600      594.754      5.203      5.293      26.449
  1.713      260.400      780.614      6.830      6.898      20.295
  2.284      130.200      892.130      7.805      7.865      17.800
  2.855       0.000      929.303      8.130      8.188      17.098
  3.426     -130.200      892.130      7.805      7.865      17.800
  3.997     -260.400      780.614      6.830      6.898      20.295
  4.568     -390.600      594.754      5.203      5.293      26.449
  5.139     -520.800      334.549      2.927      3.084      45.400
  5.710     -651.000      0.000      0.000      0.971      144.231
```

Рисунок 5.7 – Результат виконання програми для розрахунку напружень у корпусі барабана

За результатами виконання програми було отримано числові значення поперечної сили, згинального моменту, нормальних напружень від згину, еквівалентних напружень та коефіцієнта запасу міцності в окремих перерізах барабана. Розрахунок виконано для одинадцяти перерізів по довжині прольоту між опорами.

Отримані результати наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку напружень у корпусі барабана з використанням ЕОМ

x, м	Q, кН	M, кН·м	$\sigma_{зг}$, МПа	$\sigma_{екв}$, МПа	n_3
0	651	0	0	0,971	144,230
0,57	520,8	334,549	2,927	3,084	45,400
1,14	390,6	594,754	5,203	5,293	26,449
1,71	260,4	780,614	6,830	6,898	20,295
2,28	130,2	892,130	7,805	7,865	17,800
2,86	0	929,303	8,130	8,188	17,098
3,43	-130	892,130	7,805	7,865	17,800
4,00	-260	780,614	6,830	6,898	20,295
4,57	-391	594,754	5,203	5,293	26,449
5,14	-521	334,549	2,927	3,084	45,400
5,71	-651	0	0	0,971	144,230

Як видно з таблиці 5.2, максимальні значення згинального моменту та напружень виникають у середньому перерізі барабана при $x = 2,855$ м. У цьому перерізі згинальний момент становить 929,303 кН·м, нормальне напруження від згину - 8,130 МПа, а еквівалентне напруження - 8,188 МПа.

Мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності також спостерігається в середній частині прольоту і становить 17,098. Це підтверджує результати ручного розрахунку та показує, що корпус барабана має достатній запас міцності за прийнятих умов навантаження.

Для більш наочного представлення результатів за даними таблиці побудовано графік зміни еквівалентних напружень по довжині барабана, наведений на рисунку 5.8.

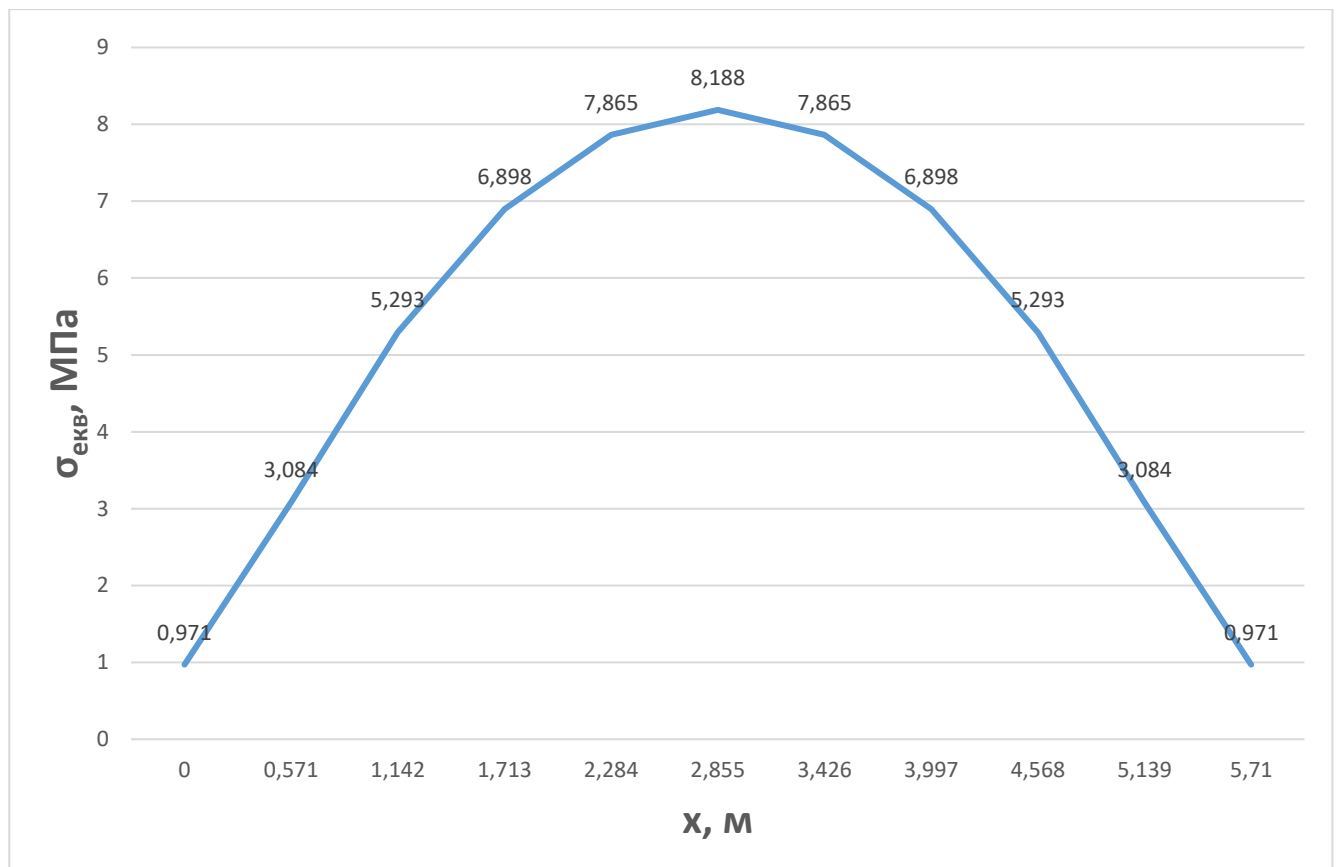


Рисунок 5.8 – Графік зміни еквівалентних напружень по довжині барабана

Як видно з рисунка 5.8, еквівалентні напруження в корпусі барабана змінюються по довжині прольоту нерівномірно. Мінімальні значення напружень спостерігаються біля опор і становлять 0,971 МПа. У напрямку до середини прольоту напруження поступово зростають і досягають максимального значення 8,188 МПа при $x = 2,855$ м. Такий характер зміни еквівалентних напружень відповідає характеру зміни згинального моменту, оскільки основний вплив на напружений стан корпусу барабана має саме згин від дії рівномірно розподіленого навантаження.

Максимальне еквівалентне напруження, отримане за результатами розрахунку з використанням ЕОМ, становить 8,188 МПа, що значно менше за допустиме напруження для матеріалу корпусу барабана $[\sigma] = 140$ МПа. Це

підтверджує виконання умови міцності та показує, що найбільш навантаженим є середній переріз барабана, де згинальний момент досягає максимального значення.

Оскільки модернізація млина пов'язана з удосконаленням конструкції футеровки, додатково виконується перевірка болтового кріплення футеровочних елементів до корпусу барабана. Футеровка під час роботи млина сприймає дію власної ваги, навантаження від мелючих тіл та матеріалу, а також ударні й динамічні навантаження. Тому надійність болтового з'єднання є важливою умовою працездатності футеровочного вузла.

Кріплення одного футеровочного елемента приймаємо за допомогою чотирьох болтів М24. Перевірку виконуємо за умовою зрізу болтів від дії розрахункового навантаження на футеровочний елемент [14].

Для розрахунку приймаємо, що один футеровочний елемент кріпиться до корпусу барабана чотирма болтами М24×100. Болти розташовані симетрично відносно футеровочного елемента. Відстань між болтами по довжині елемента становить 467,5 мм, відстань між рядами болтів - 200 мм, кут між болтами по дузі барабана - 22°. Сектор футеровочного вузла становить 30°.

Вихідні дані для розрахунку болтового кріплення:

$m_{ф1} = 223$ кг - маса одного футеровочного елемента;

$z_б = 4$ - кількість болтів кріплення одного футеровочного елемента;

$d_б = 24$ мм - діаметр болта М24;

$k_d = 1,5$ - коефіцієнт динамічності;

$g = 9,81$ м/с² - прискорення вільного падіння;

$m_{зав} = 51,98$ т - сумарна маса мелючих тіл і матеріалу в барабані;

$z_ф = 180$ - загальна кількість футеровочних елементів.

Оскільки під час роботи млина футеровка сприймає не тільки власну вагу, але й дію завантаження барабана, для розрахунку приймаємо навантаження на один футеровочний елемент з урахуванням частини маси мелючих тіл і матеріалу, що припадає на один елемент футеровки.

Маса завантаження, що умовно припадає на один футеровочний елемент:

$$m_{\text{зав1}} = m_{\text{зав}} / z_{\text{ф}} ,$$

де $m_{\text{зав}}$ - сумарна маса мелючих тіл і матеріалу, кг;

$z_{\text{ф}}$ - кількість футеровочних елементів у барабані.

$$m_{\text{зав1}} = 51980 / 180 = 288,8 \text{ кг.}$$

Сумарна маса, що припадає на один футеровочний елемент:

$$m_1 = m_{\text{ф1}} + m_{\text{зав1}} .$$

$$m_1 = 223 + 288,8 = 511,8 \text{ кг.}$$

Розрахункове навантаження на один футеровочний елемент з урахуванням динамічного коефіцієнта:

$$F_{\text{ф}} = k_{\text{д}} \cdot m_1 \cdot g .$$

де $k_{\text{д}}$ - коефіцієнт динамічності;

m_1 - сумарна маса, що припадає на один футеровочний елемент, кг;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2 .

$$F_{\text{ф}} = 1,5 \cdot 511,8 \cdot 9,81 = 7529 \text{ Н} = 7,53 \text{ кН} .$$

Оскільки футеровочний елемент кріпиться чотирма болтами, навантаження на один болт становить:

$$F_{\text{б}} = F_{\text{ф}} / z_{\text{б}} .$$

де $z_{\text{б}}$ - кількість болтів кріплення одного футеровочного елемента.

$$F_{\text{б}} = 7529 / 4 = 1882 \text{ Н} = 1,88 \text{ кН} .$$

Площа поперечного перерізу болта М24 визначається за формулою:

$$A_{\text{б}} = \pi \cdot d_{\text{б}}^2 / 4 .$$

де $d_{\text{б}}$ - діаметр болта, мм.

$$A_{\text{б}} = 3,14 \cdot 24^2 / 4 = 452,2 \text{ мм}^2 .$$

Напруження зрізу в одному болті:

$$\tau_{\text{зр}} = F_{\text{б}} / A_{\text{б}} ,$$

де $F_{\text{б}}$ - навантаження на один болт, Н;

$A_{\text{б}}$ - площа поперечного перерізу болта, мм^2 .

$$\tau_{\text{зр}} = 1882 / 452,2 = 4,16 \text{ МПа} .$$

Для болтового з'єднання приймаємо допустиме напруження зрізу:

$$[\tau] = 160 \text{ МПа} .$$

Умова міцності болта на зріз має вигляд:

$$\tau_{зр} \leq [\tau] .$$

$$4,16 \text{ МПа} \leq 160 \text{ МПа} .$$

Умова міцності болтів на зріз виконується.

Коефіцієнт запасу міцності болтів за напруженнями зрізу:

$$n_{зр} = [\tau] / \tau_{зр} .$$

$$n_{зр} = 160 / 4,16 = 38,5 .$$

Отримане значення коефіцієнта запасу міцності показує, що болти М24 мають достатній запас міцності за умов зрізу.

Окрім перевірки болтів на зріз, необхідно виконати перевірку болтового з'єднання на зминання контактної поверхні в зоні отвору [14]. Зминання може виникати в місці контакту стрижня болта з отвором у корпусі барабана або футеровочному елементі.

Розрахункове напруження зминання визначається за формулою:

$$\sigma_{зм} = F_6 / (d_6 \cdot \delta_{кор}) ,$$

де F_6 - навантаження на один болт, Н;

d_6 - діаметр болта, мм;

$\delta_{кор}$ - товщина елемента, що сприймає навантаження, мм.

Для розрахунку приймаємо товщину корпусу барабана:

$$\delta_{кор} = 25 \text{ мм} .$$

Тоді напруження зминання становить:

$$\sigma_{зм} = 1882 / (24 \cdot 25) = 3,14 \text{ МПа} .$$

Для сталевих з'єднань приймаємо допустиме напруження зминання:

$$[\sigma_{зм}] = 240 \text{ МПа} .$$

Умова міцності на зминання має вигляд:

$$\sigma_{зм} \leq [\sigma_{зм}] .$$

$$3,14 \text{ МПа} \leq 240 \text{ МПа} .$$

Умова міцності на зминання виконується.

Коефіцієнт запасу міцності за зминанням:

$$n_{3M} = [\sigma_{3M}] / \sigma_{3M} .$$

$$n_{3M} = 240 / 3,14 = 76,4 .$$

Таким чином, умови міцності болтового з'єднання на зріз і зминання виконуються. Болтове кріплення забезпечує надійне з'єднання футеровки з корпусом барабана і є працездатним за прийнятих умов навантаження.

Для узагальнення отриманих результатів основні параметри розрахунків на міцність зведено в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 - Основні результати розрахунків на міцність

Параметр	Позначення	Значення
Розрахункове навантаження на барабан	$F_{розр}$	1302 кН
Інтенсивність розподіленого навантаження	q	228,0 кН/м
Реакція лівої опори	R_A	651 кН
Реакція правої опори	R_B	651 кН
Максимальний згинальний момент	M_{max}	929,2 кН·м
Момент інерції перерізу барабана	I	0,140 м ⁴
Момент опору перерізу барабана	W	0,114 м ³
Полярний момент інерції	J_p	0,280 м ⁴
Нормальне напруження від згину	$\sigma_{зг}$	8,15 МПа
Дотичне напруження від кручення	τ	0,56 МПа
Еквівалентне напруження	$\sigma_{екв}$	8,21 МПа
Допустиме напруження матеріалу корпусу	$[\sigma]$	140 МПа
Коефіцієнт запасу міцності корпусу	n_3	17,05
Напруження зрізу в болті М24	$\tau_{зр}$	4,16 МПа
Допустиме напруження зрізу	$[\tau]$	160 МПа
Коефіцієнт запасу за зрізом болта	$n_{зр}$	38,5
Напруження зминання в зоні отвору	σ_{3M}	3,14 МПа
Допустиме напруження зминання	$[\sigma_{3M}]$	240 МПа
Коефіцієнт запасу за зминанням	n_{3M}	76,4

За результатами виконаних розрахунків на міцність встановлено, що корпус барабана кульового млина та елементи кріплення футеровки працюють у допустимих межах напружень. Максимальні еквівалентні напруження в корпусі барабана виникають у середній частині прольоту між опорами, що відповідає характеру зміни згинального моменту.

Розрахунок із застосуванням ЕОМ підтвердив результати ручного розрахунку та показав, що максимальні напруження не перевищують допустимого значення для матеріалу корпусу барабана. Перевірка болтового кріплення футеровочного елемента також показала виконання умов міцності на зріз і зминання.

Отже, корпус барабана та болтове кріплення модернізованої футеровки мають достатній запас міцності. Конструкція є міцною і працездатною за прийнятих умов навантаження.

5.3 Числове моделювання

Числове моделювання напружено-деформованого стану барабана кульового млина виконується з метою перевірки працездатності футеровочного вузла та оцінки ефективності запропонованої модернізації. Для цього розглядаються два конструктивні варіанти: барабан з немодернізованою сталевую футеровкою та барабан з модернізованою футеровкою, до складу якої входить поліуретановий демпфувальний шар, сталева вставка-ліфтер і нижня опорна пластина.

Розрахунок виконується для півмоделі першої камери барабана у середовищі ANSYS Mechanical. Такий підхід дає змогу порівняти напруження, переміщення та коефіцієнт запасу міцності обох конструкцій за однакових умов моделювання.

Першим розглядається барабан з немодернізованою футеровкою. Геометрична модель створена у середовищі SolidWorks і являє собою півмодель першої камери барабана. До її складу входять корпус барабана, торцева кришка, міжкамерна перегородка та сталеві футеровочні елементи.

Корпус барабана має внутрішній діаметр 2400 мм та товщину стінки 25 мм. Футеровка розміщена на внутрішній поверхні корпусу. Для формування

футеровочного покриття використано елементи довжиною 300 мм, розташовані рядами вздовж осі барабана. У розрахунковій півмоделі прийнято шість рядів футеровки по довжині та шість елементів по півколу барабана. Таким чином, загальна кількість футеровочних елементів у моделі становить 36 штук.

У моделі враховано отвори під кріплення футеровочних елементів, однак болти, гайки та шайби окремо не моделюються. Таке спрощення дає змогу зменшити складність розрахункової моделі та зосередити аналіз на роботі корпусу барабана і футеровки.

Застосування півмоделі дає змогу зменшити обсяг розрахункової задачі та водночас зберегти можливість оцінювання роботи футеровки у верхній і нижній частинах барабана. Це важливо, оскільки під час прогину корпусу верхні та нижні футеровочні елементи працюють у різних умовах навантаження. 3-D модель барабана з немодернізованою футеровкою у середовищі SolidWorks наведено на рисунку 5.9.

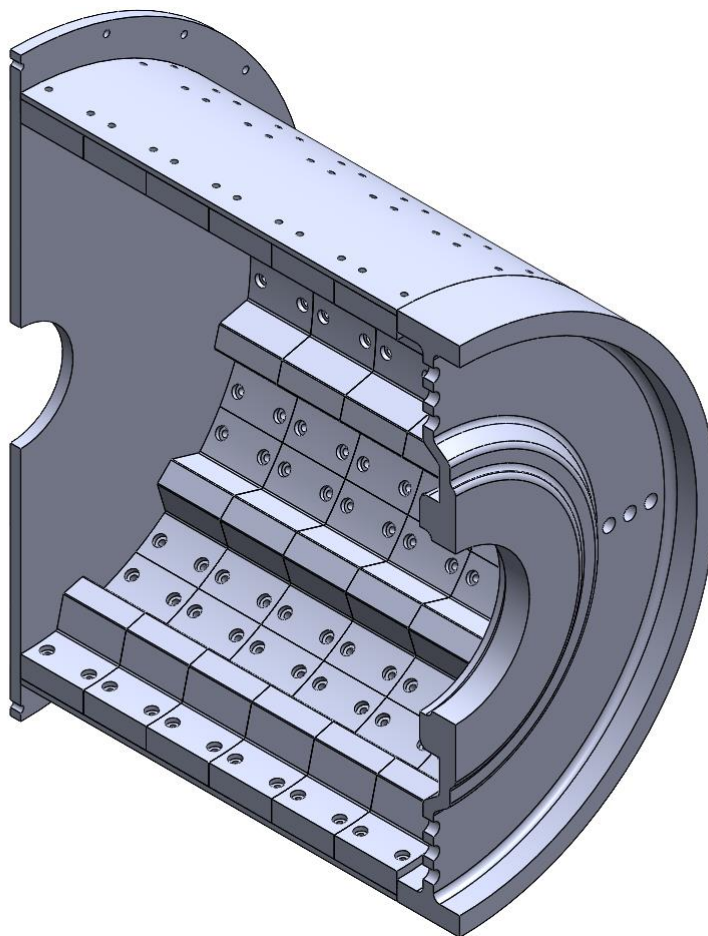


Рисунок 5.9 - 3-D модель барабана з немодернізованою футеровкою у середовищі SolidWorks

Після побудови геометрична модель імпортується до середовища ANSYS Mechanical для подальшого числового розрахунку. Розрахунок виконується у статичній постановці Static Structural, що дозволяє визначити переміщення, еквівалентні напруження та коефіцієнт запасу міцності елементів барабана під дією заданих навантажень.

Для немодернізованої моделі прийнято такі матеріали: корпус барабана та міжкамерна перегородка виготовлені зі сталі Ст3сп, торцева кришка - зі сталі 45, футеровочні елементи - зі сталі 110Г13Л. Прийняті матеріали розрахункової моделі наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Матеріали елементів барабана з немодернізованою футеровкою

Елемент моделі	Матеріал
Корпус барабана	Сталь Ст3сп
Торцева кришка	Сталь 45
Міжкамерна перегородка	Сталь Ст3сп
Немодернізована футеровка	Сталь 110Г13Л

Основні механічні властивості матеріалів, використані під час числового моделювання, наведено в таблиці 5.5 [15].

Таблиця 5.5 - Механічні властивості матеріалів немодернізованої моделі

Матеріал	Густина, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона	Межа текучості, МПа
Сталь Ст3сп	7850	$2,0 \cdot 10^{11}$	0,30	245
Сталь 45	7850	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,30	355
Сталь 110Г13Л	7800	$1,9 \cdot 10^{11}$	0,30	350

Розрахункова модель складається з окремих твердотільних деталей: корпусу барабана, торцевої кришки, міжкамерної перегородки та футеровочних елементів. Взаємодія між суміжними деталями задається за допомогою контактів типу Bonded. Такий тип контакту прийнято для спрощеного врахування нероз'ємного з'єднання деталей у межах статичного розрахунку.

Розрахункову модель барабана з немодернізованою футеровкою у середовищі ANSYS Mechanical наведено на рисунку 5.10.

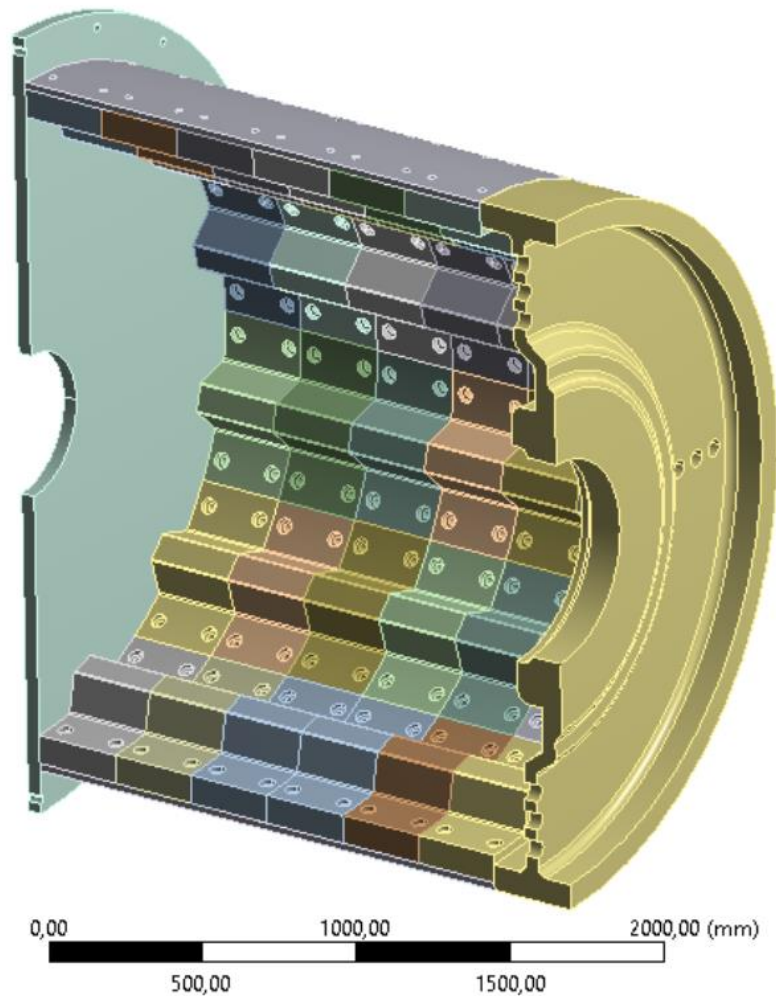


Рисунок 5.10 - Розрахункова модель барабана з немодернізованою футеровкою у середовищі ANSYS Mechanical

Оскільки в розрахунку використовується півмодель барабана, на площинах розрізу задано умову симетрії. Для цього використовується гранична умова Frictionless Support, яка забороняє переміщення вузлів у напрямку, перпендикулярному до площини розрізу, але не обмежує переміщення в самій

площині. Це дає змогу імітувати наявність другої половини барабана без її безпосереднього моделювання.

Умова симетрії на площині розрізу моделі наведена на рисунку 5.11.

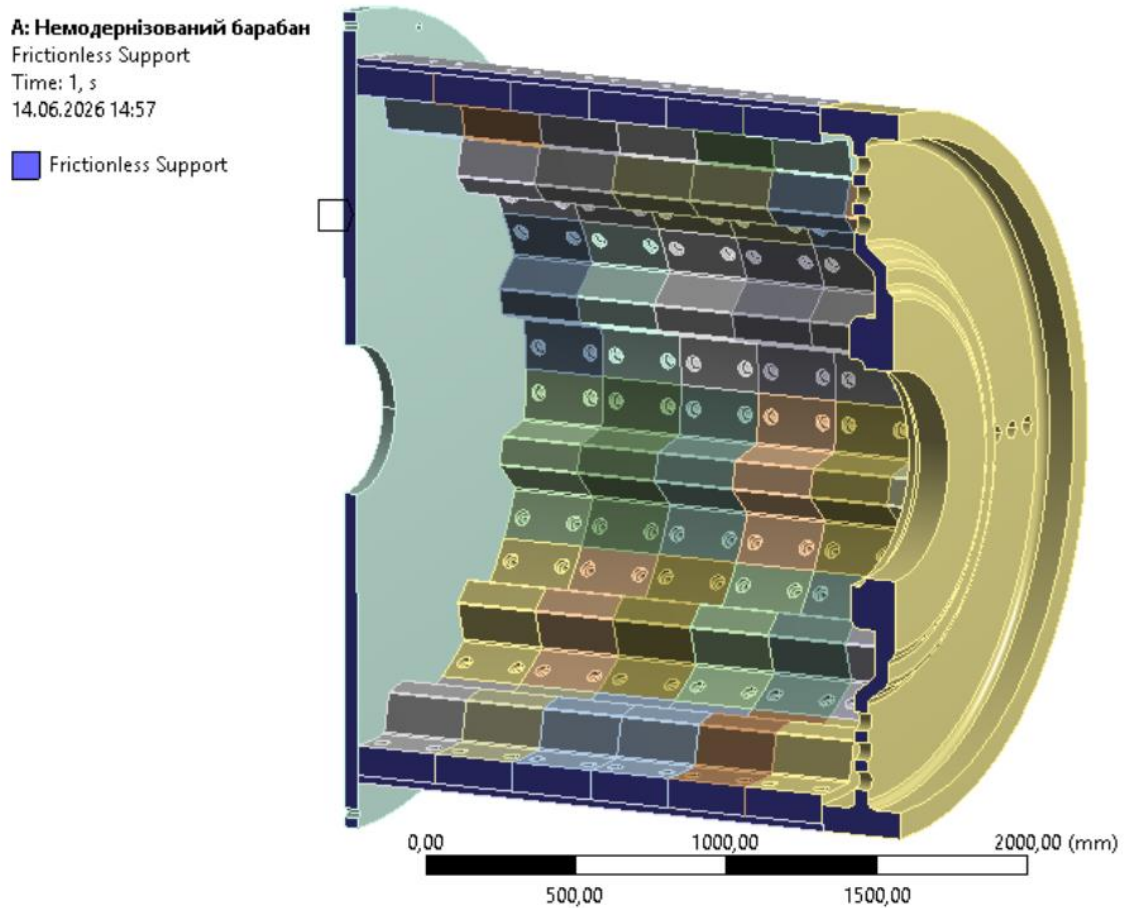


Рисунок 5.11 - Умова симетрії на площині розрізу моделі

Для імітації опирання барабана на підшипникові вузли в розрахунковій моделі використано граничну умову Remote Displacement. Закріплення задано на ділянках центральних отворів торцевої кришки та міжкамерної перегородки, що відповідає зонам передавання навантаження від барабана до опор.

Віддалені точки закріплення розташовано на відстані 430 мм від торцевих поверхонь кришки та міжкамерної перегородки. Це значення прийнято як спрощена відстань до умовних опорних перерізів барабана, що дозволяє врахувати вплив опирання без детального моделювання цапф, підшипникових вузлів та другої камери млина.

Довжина першої камери у розрахунковій моделі становить 1800 мм. Відстань між віддаленими точками закріплення визначається з урахуванням додаткових ділянок по 430 мм з обох боків:

$$L_{\text{розр}} = 1800 + 430 + 430 = 2660 \text{ мм.}$$

Таким чином, розрахункова схема не розглядає другу камеру барабана як окрему геометричну область. Її вплив враховано спрощено через положення віддаленого закріплення з боку міжкамерної перегородки. Такий підхід дає змогу уникнути штучного збільшення плеча навантаження та надмірного прогину моделі, який виникав би при винесенні опори на повну довжину відсутньої другої камери.

На стороні торцевої кришки обмежено переміщення у поперечних напрямках, а переміщення вздовж осі барабана залишено вільним. Для цієї опори прийнято:

$$X \text{ Component} = 0, Y \text{ Component} = 0, Z \text{ Component} = \text{Free.}$$

На стороні міжкамерної перегородки обмежено переміщення в усіх трьох координатних напрямках:

$$X \text{ Component} = 0, Y \text{ Component} = 0, Z \text{ Component} = 0.$$

Повороти відносно всіх осей для обох опор залишено вільними. Така схема відповідає роботі барабана на підшипникових опорах без жорсткого защемлення торців і запобігає надмірному обмеженню деформацій моделі. Схему віддалених закріплень барабана наведено на рисунках 5.12 – 5.13.

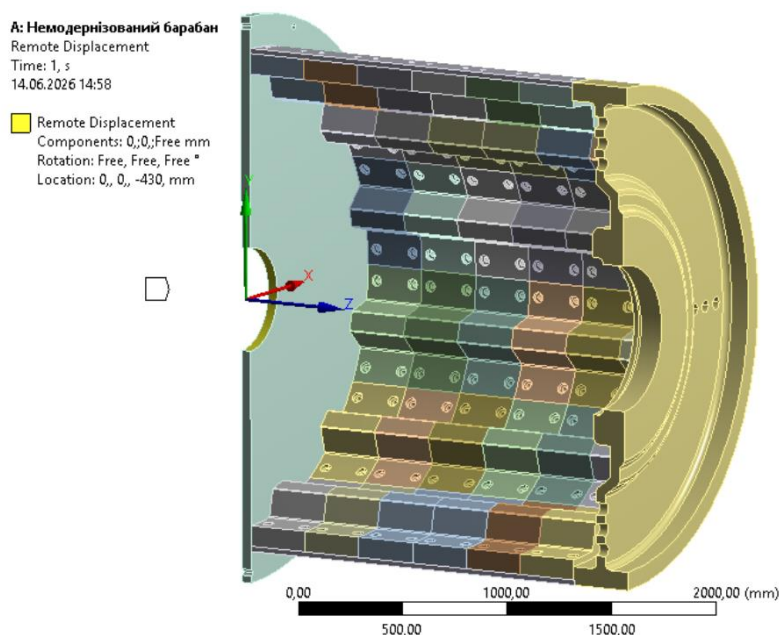


Рисунок 5.12 - Віддалені закріплення Remote Displacement торцевої кришки

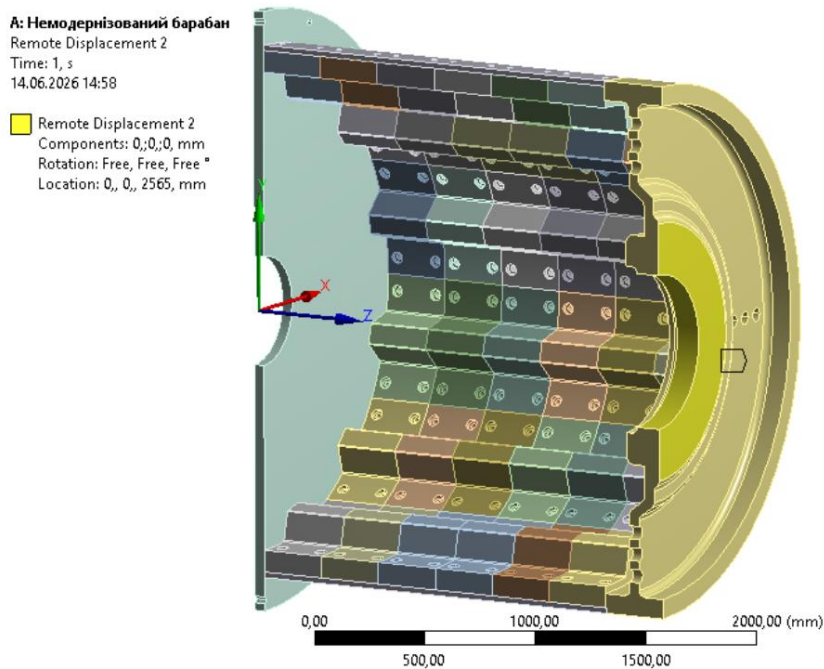


Рисунок 5.13 - Віддалені закріплення Remote Displacement міжкамерної перегородки

Навантаження розрахункової моделі включає дію сили тяжіння, обертання барабана та навантаження від мелючих тіл і матеріалу. Сила тяжіння задається стандартним прискоренням вільного падіння та напрямлена вертикально вниз. Обертання барабана враховано за допомогою кутової швидкості, прийнятої за результатами попереднього кінематичного розрахунку $\omega = 2,15$ рад/с. Схему прикладання сили тяжіння наведено на рисунку 5.14.

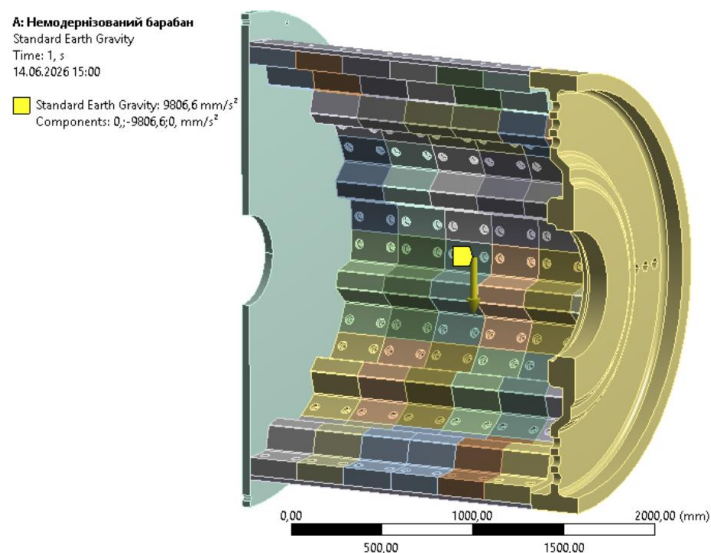


Рисунок 5.14 - Прикладання сили тяжіння

Навантаження від мелючих тіл і матеріалу прийнято за результатами попередніх розрахунків. Для повного барабана воно становить 510 кН. Оскільки у числовому моделюванні використовується півмодель, до розрахункової моделі прикладається половина цього навантаження:

$$F = 255 \text{ кН}.$$

Сила прикладається до нижньої робочої зони футеровки у вертикальному напрямку вниз, що відповідає дії маси мелючих тіл і матеріалу на футеровочні елементи під час роботи млина. Схему прикладання навантаження до футеровки наведено на рисунку 5.15.

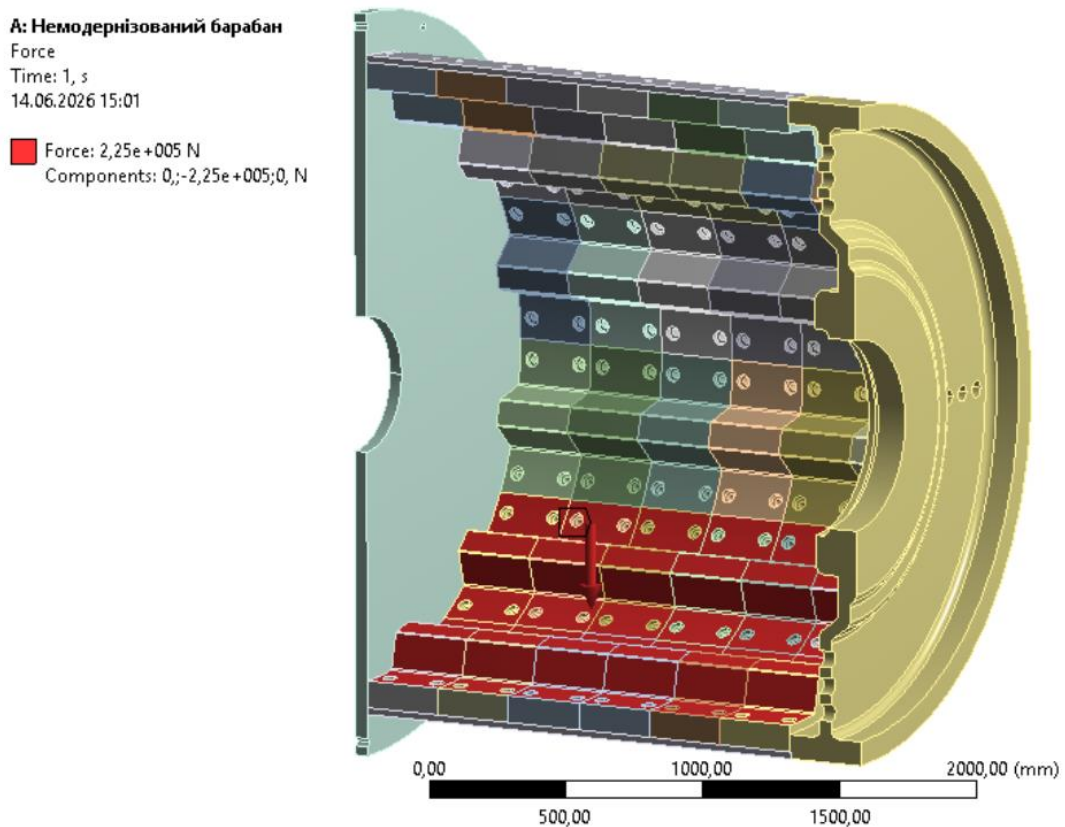


Рисунок 5.15 - Прикладання навантаження до нижньої зони футеровки

Для проведення числового розрахунку геометричну модель дискретизовано скінченно-елементною сіткою. Оскільки найбільший інтерес у розрахунку становить напружено-деформований стан футеровки, для футеровочних елементів прийнято менший розмір елемента - 40 мм. Для масивніших деталей барабана, а саме корпусу, торцевої кришки та міжкамерної перегородки, прийнято розмір елемента 80 мм.

Такий підхід дозволяє уточнити результати у зоні футеровки та водночас зменшити загальну кількість скінченних елементів у моделі. Це є важливим для забезпечення стабільності розрахунку та зменшення обчислювальних витрат.

Скінченно-елементну сітку барабана з немодернізованою футеровкою наведено на рисунку 5.16.

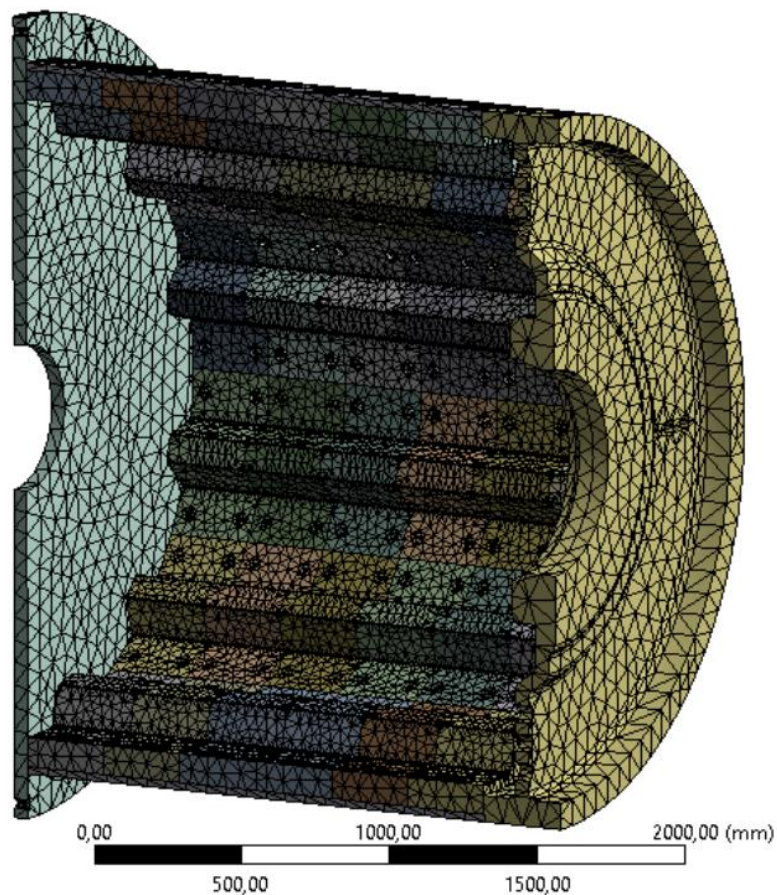


Рисунок 5.16 - Скінченно-елементна сітка барабана з немодернізованою футеровкою

Після задання матеріалів, граничних умов, навантажень та скінченно-елементної сітки проведено розрахунок напружено-деформованого стану барабана з немодернізованою футеровкою. За результатами розрахунку визначено загальні переміщення моделі, вертикальний прогин, еквівалентні напруження у футеровці, корпусі та торцевій кришці, а також мінімальний коефіцієнт запасу міцності.

Результати числового моделювання барабана з немодернізованою футеровкою наведено на рисунках 5.17–5.23.

A: Немодернізований барабан

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

14.06.2026 15:27

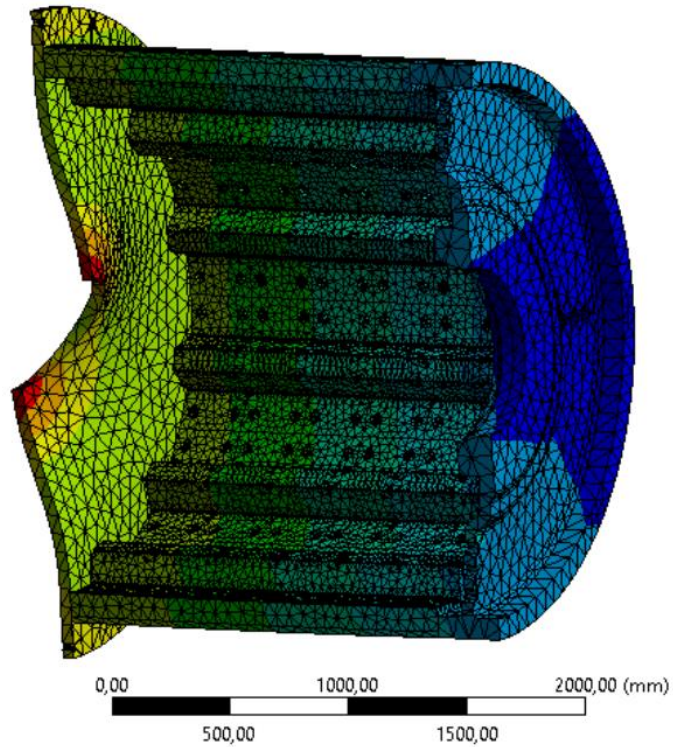
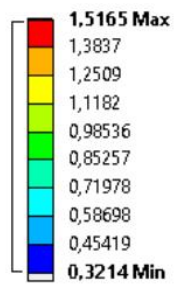


Рисунок 5.17 - Загальні переміщення барабана з немодернізованою футеровкою

A: Немодернізований барабан

Directional Deformation

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

14.06.2026 15:27

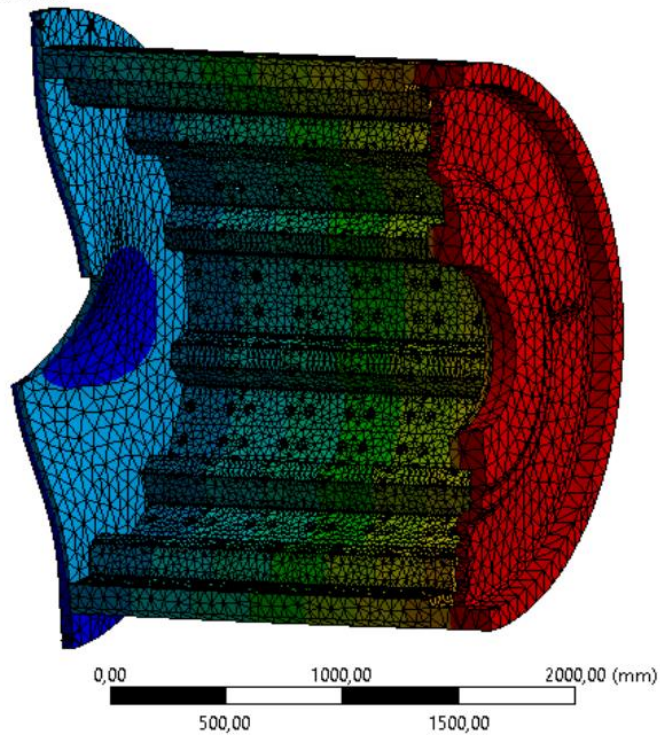
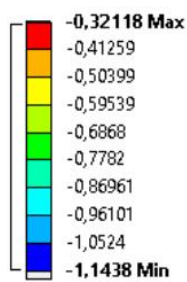


Рисунок 5.18 - Вертикальний прогин барабана з немодернізованою футеровкою

A: Немодернізований барабан
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 15:28

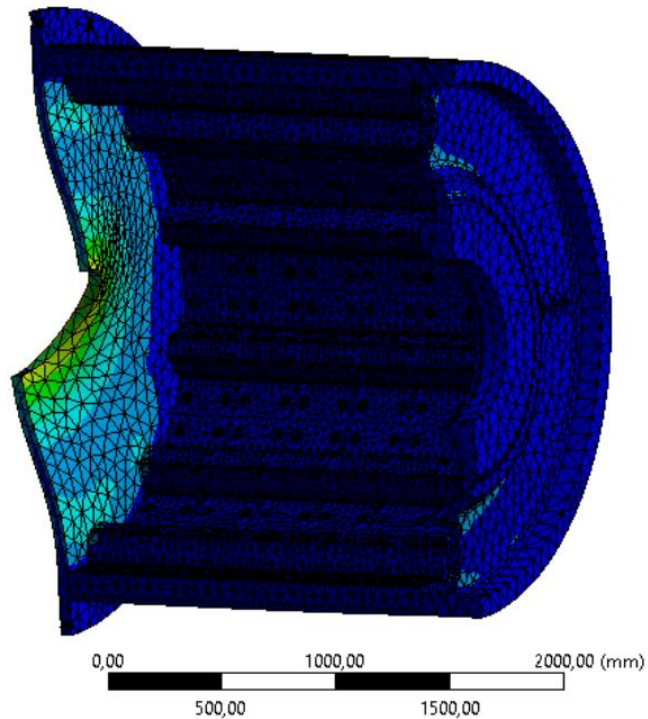
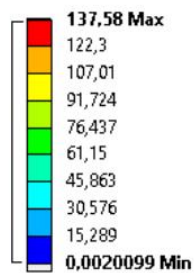


Рисунок 5.19 - Еквівалентні напруження барабана з немодернізованою футеровкою

A: Немодернізований барабан
 Equivalent Stress 2
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 15:28

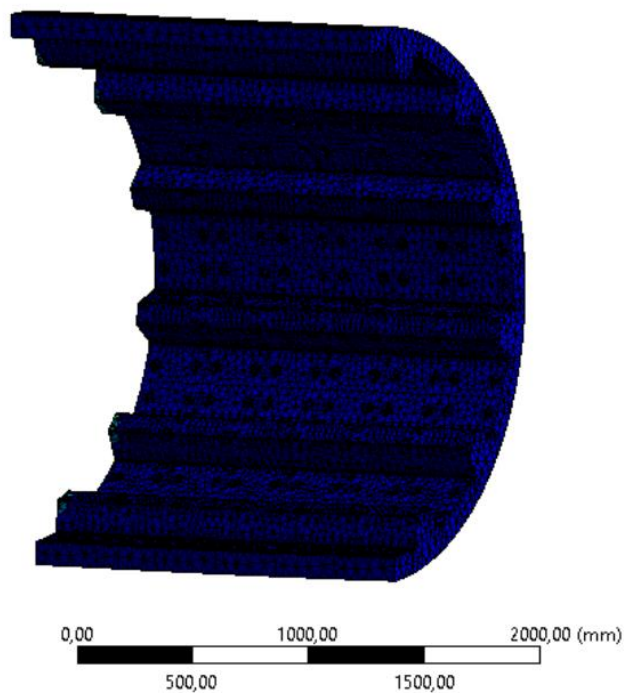
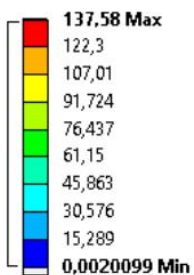


Рисунок 5.20 - Еквівалентні напруження у немодернізованій футеровці

A: Немоdernізований барабан
 Equivalent Stress 3
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 15:30

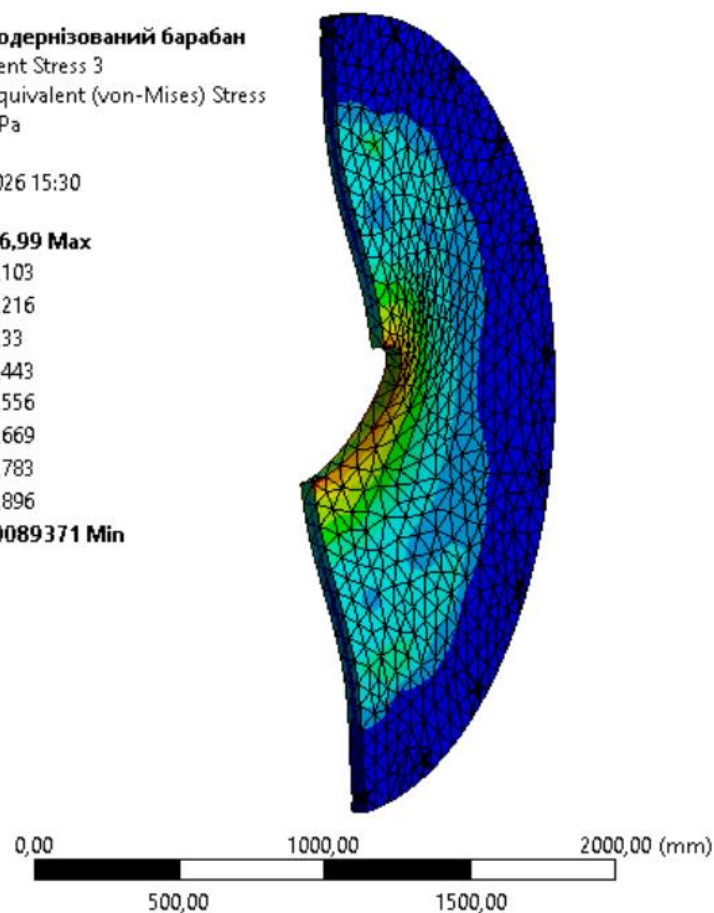
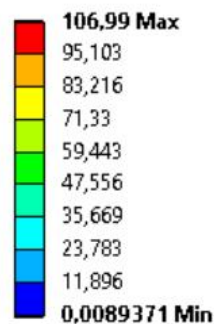


Рисунок 5.21 - Еквівалентні напруження у торцевій кришці

A: Немоdernізований барабан
 Equivalent Stress 4
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 15:28

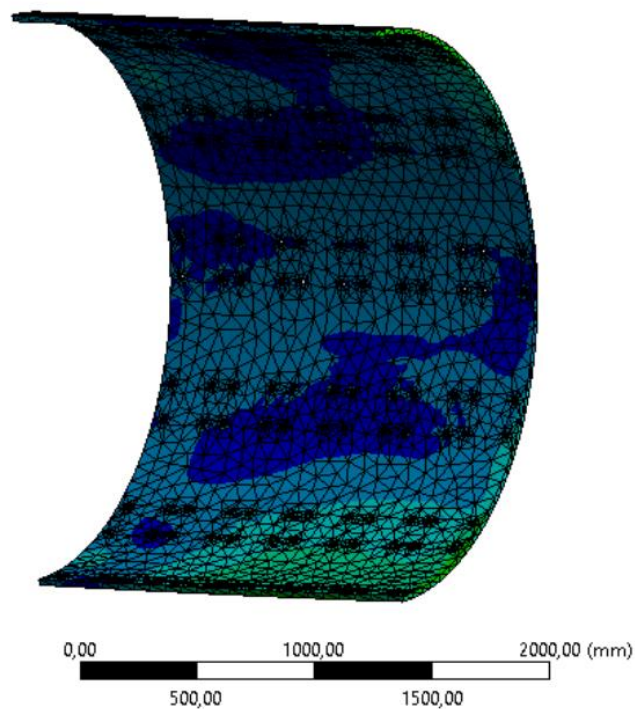
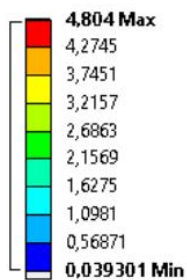


Рисунок 5.22 - Еквівалентні напруження у корпусі барабана

A: Немодернізований барабан

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 1

14.06.2026 15:29

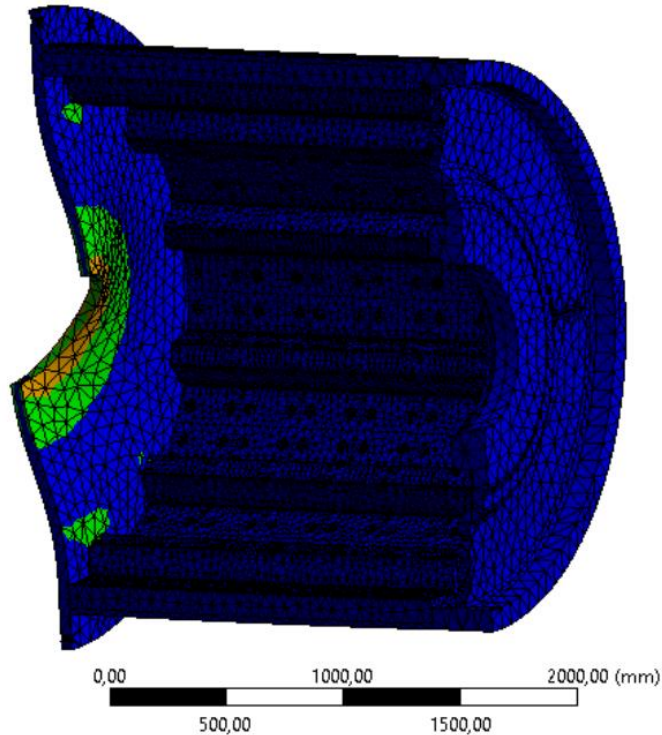
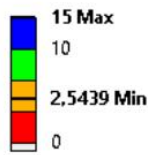


Рисунок 5.23 - Коефіцієнт запасу міцності барабана з немодернізованою футеровкою

За результатами числового моделювання максимальні загальні переміщення барабана з немодернізованою футеровкою становлять 1,5165 мм. Мінімальне значення вертикального переміщення по осі Y дорівнює -1,1438 мм, що відповідає прогину моделі у напрямку дії сили тяжіння та навантаження від мелючих тіл і матеріалу.

Максимальні еквівалентні напруження в розрахунковій моделі становлять 137,58 МПа. Для немодернізованої футеровки максимальне значення напружень також дорівнює 137,58 МПа, для торцевої кришки - 106,99 МПа, а для корпусу барабана - 4,804 МПа. Мінімальний коефіцієнт запасу міцності становить 2,5439.

Отримані значення свідчать, що барабан з немодернізованою футеровкою зберігає працездатність за прийнятих умов навантаження. Найбільші напруження не перевищують межу текучості матеріалів, а корпус барабана працює з незначним рівнем напружень.

Наступним етапом розглядається барабан з модернізованою футеровкою. Геометрична модель також створена у середовищі SolidWorks у вигляді півмоделі

першої камери барабана. До складу моделі входять корпус барабана, торцева кришка, міжкамерна перегородка та модернізовані футеровочні вузли.

У розрахунковій півмоделі, як і для немодернізованого варіанта, прийнято шість рядів футеровки по довжині та шість елементів по півколу барабана. Загальна кількість модернізованих футеровочних вузлів становить 36 штук. Оскільки кожен вузол складається з трьох окремих деталей, загальна кількість деталей модернізованої футеровки у розрахунковій моделі становить 108 штук.

3-D модель барабана з модернізованою футеровкою у середовищі SolidWorks наведено на рисунку 5.24.

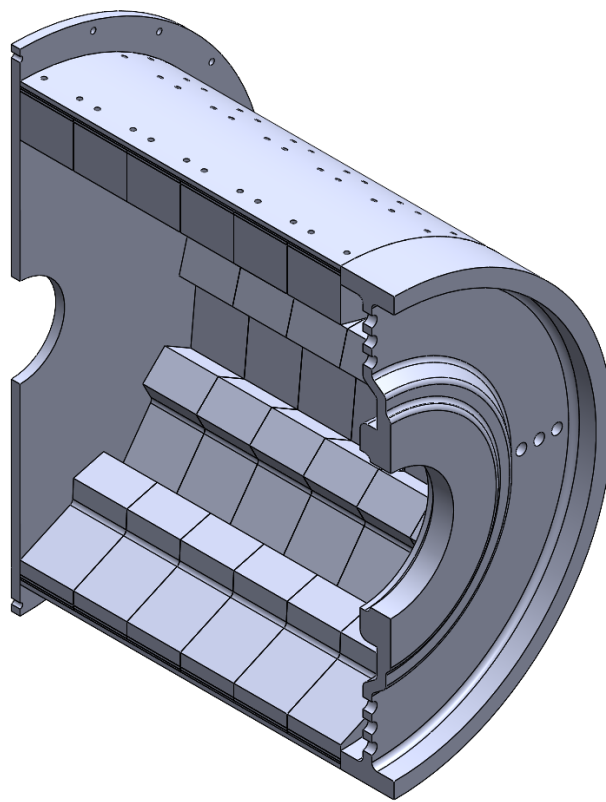


Рисунок 5.24 - 3-D модель барабана з модернізованою футеровкою у середовищі SolidWorks

Конструктивною відмінністю модернізованої моделі є застосування складеного футеровочного вузла замість суцільного сталевих елементів. Кожен футеровочний вузол складається з трьох основних деталей: поліуретанового тіла, сталевих вставки-ліфтера та нижньої опорної пластини [11]. Така будова дає змогу поєднати робочу металеву поверхню, яка сприймає навантаження від мелючих тіл

і матеріалу, з податливим поліуретановим шаром. Конструкцію модернізованого футеровочного вузла наведено на рисунку 5.25.

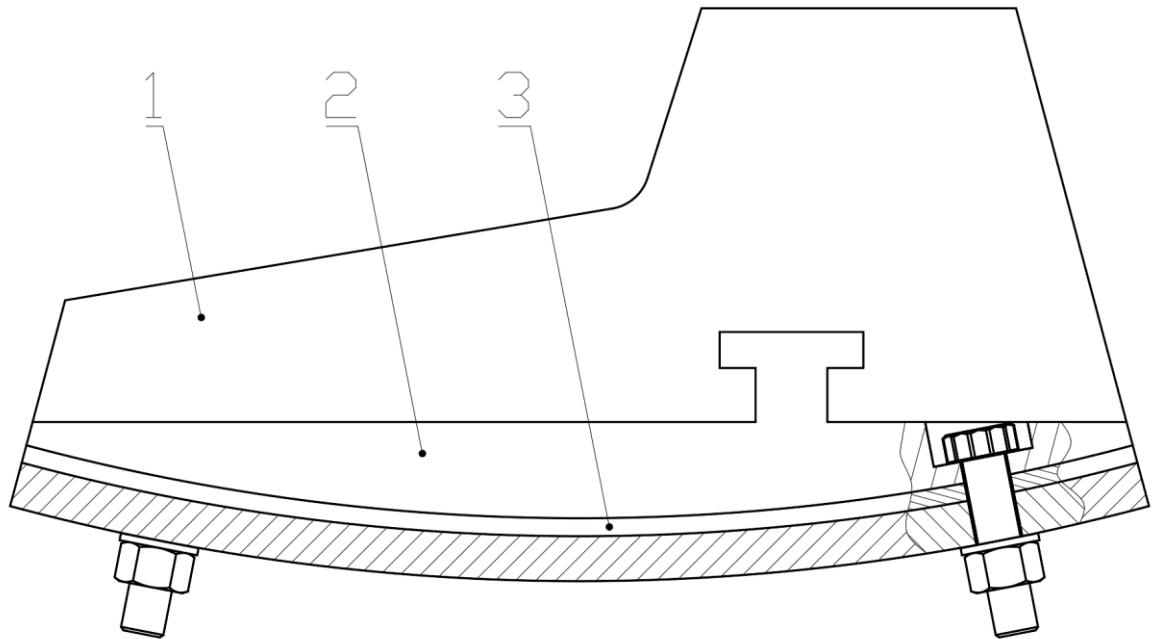


Рисунок 5.25 - Конструкція модернізованого футеровочного вузла:

1 - сталева вставка-ліфтер; 2 - поліуретанове тіло; 3 - нижня опорна пластина.

Для корпусу барабана, торцевої кришки та міжкамерної перегородки прийнято ті самі матеріали, що й у моделі з немодернізованою футеровкою. Відмінність полягає у матеріалах елементів модернізованого футеровочного вузла. Поліуретанове тіло прийнято як Filled Polyurethane, сталева вставка-ліфтер виготовлена зі сталі 110Г13Л, а нижня опорна пластина - зі сталі 45. Матеріали елементів модернізованої футеровки наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 - Матеріали елементів модернізованої футеровки

Елемент модернізованої футеровки	Матеріал
Нижня опорна пластина	Сталь 45
Поліуретановий демпфувальний шар	Filled Polyurethane
Сталева вставка-ліфтер	Сталь 110Г13Л

Основні механічні властивості поліуретанового матеріалу, використаного у розрахунку, наведено в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 - Механічні властивості поліуретанового матеріалу

Матеріал	Густина, кг/м³	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона	Межа текучості, МПа
Filled Polyurethane	2000	$1,0 \cdot 10^8$	0,40	40

Розрахунок барабана з модернізованою футеровкою виконується у середовищі ANSYS Mechanical за тією самою розрахунковою схемою, що й для барабана з немодернізованою футеровкою. Для забезпечення коректного порівняння обох конструкцій граничні умови, схема опирання, кутова швидкість барабана та величина прикладеного навантаження залишаються незмінними.

Взаємодія між суміжними деталями модернізованої моделі задається за допомогою контактів типу Bonded. На площинах розрізу, як і в попередній моделі, задано умову симетрії Frictionless Support. Опирання барабана імітується за допомогою віддалених закріплень Remote Displacement, розташованих на відстані 430 мм від торцевих поверхонь кришки та міжкамерної перегородки.

Відмінність модернізованої моделі полягає у конструкції футеровочного вузла. Навантаження від мелючих тіл і матеріалу прикладається до робочих поверхонь сталевих вставок-ліфтерів, оскільки саме вони безпосередньо контактують із завантаженням під час роботи млина. Значення сили, як і для немодернізованої моделі, становить 255 кН, що відповідає половині сумарного навантаження для півмоделі барабана.

Розрахункову модель барабана з модернізованою футеровкою у середовищі ANSYS Mechanical наведено на рисунку 5.26.

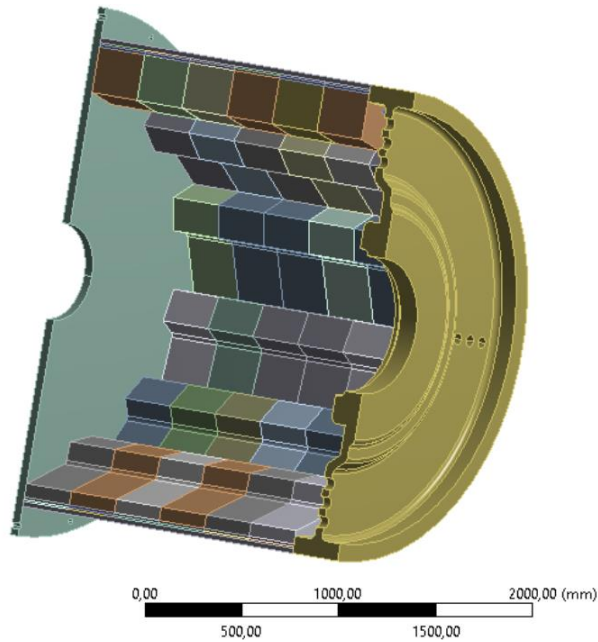


Рисунок 5.26 - Розрахункова модель барабана з модернізованою футеровкою у середовищі ANSYS Mechanical

Для дискретизації модернізованої моделі використано таку саму логіку побудови скінченно-елементної сітки, як і для немодернізованої моделі. Для деталей футеровочного вузла прийнято розмір елемента 40 мм, а для корпусу барабана, торцевої кришки та міжкамерної перегородки - 80 мм. Скінченно-елементну сітку барабана з модернізованою футеровкою наведено на рисунку 5.27.

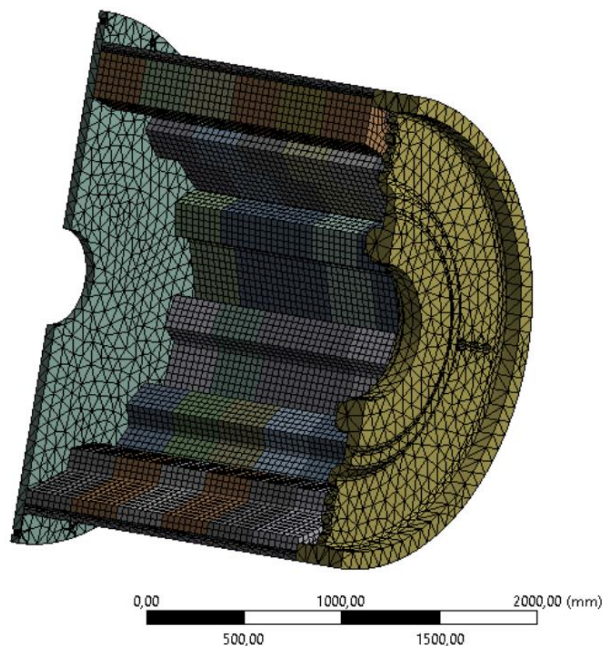


Рисунок 5.27 - Скінченно-елементна сітка барабана з модернізованою футеровкою

Після задання матеріалів, контактів, граничних умов, навантажень та скінченно-елементної сітки проведено розрахунок напружено-деформованого стану барабана з модернізованою футеровкою.

Результати числового моделювання барабана з модернізованою футеровкою наведено на рисунках 5.28–5.38.

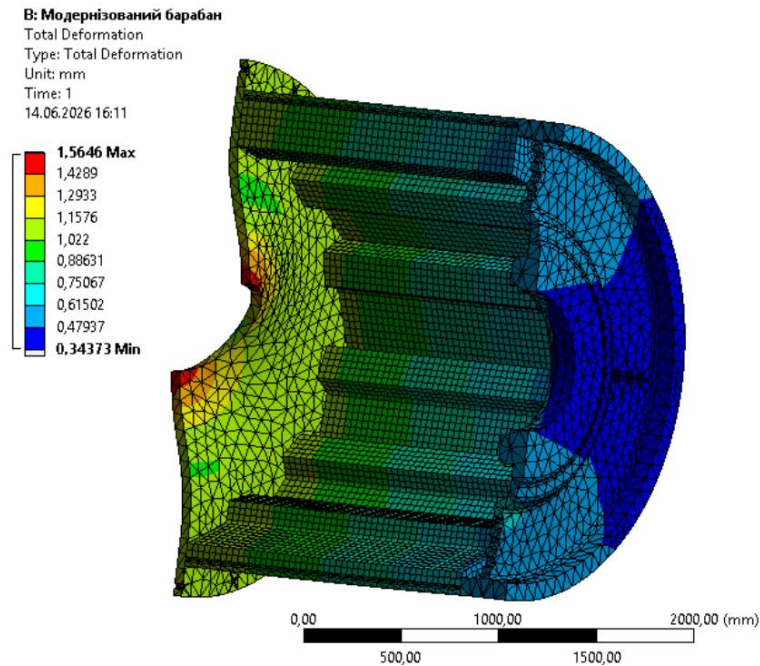


Рисунок 5.28 - Загальні переміщення барабана з модернізованою футеровкою

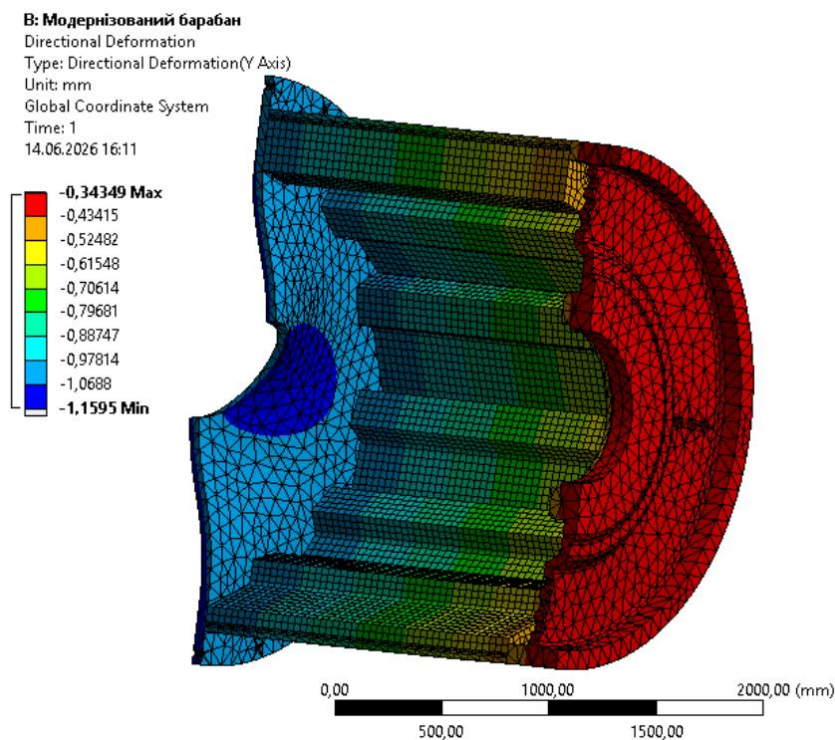


Рисунок 5.29 - Вертикальний прогин барабана з модернізованою футеровкою

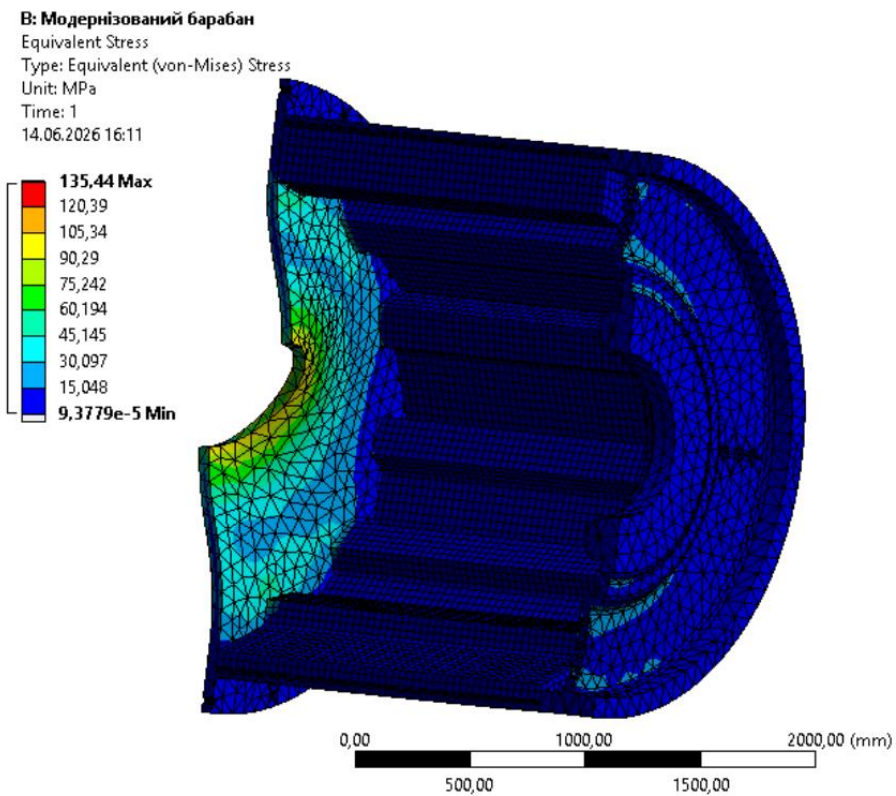


Рисунок 5.30 - Еквівалентні напруження барабана з модернізованою футеровкою

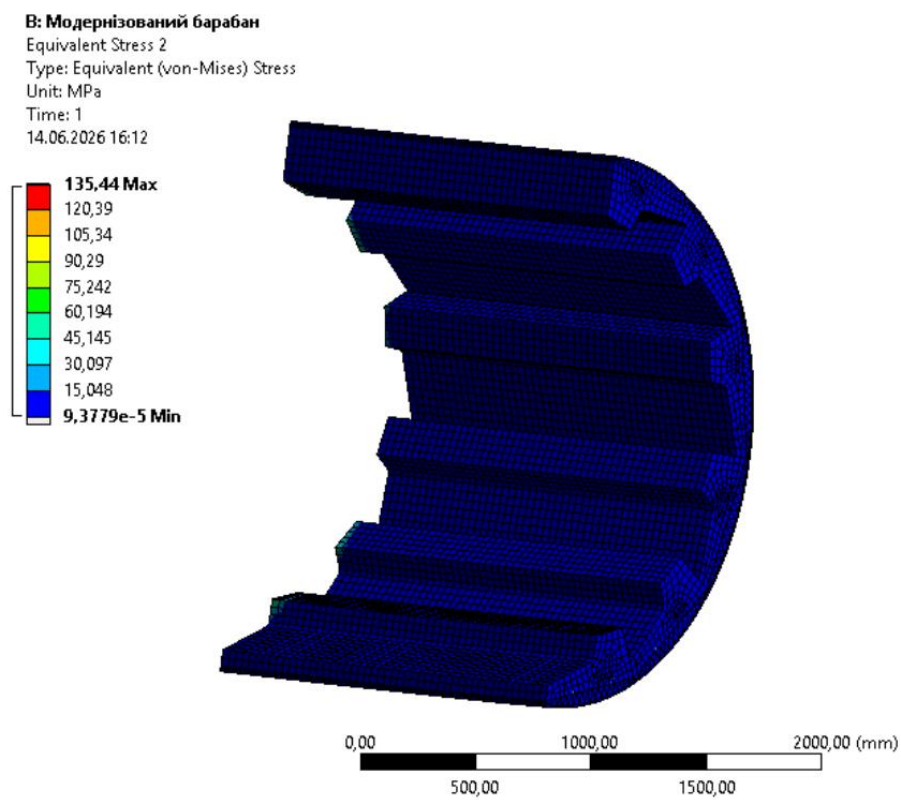


Рисунок 5.31 - Еквівалентні напруження у модернізованій футеровці

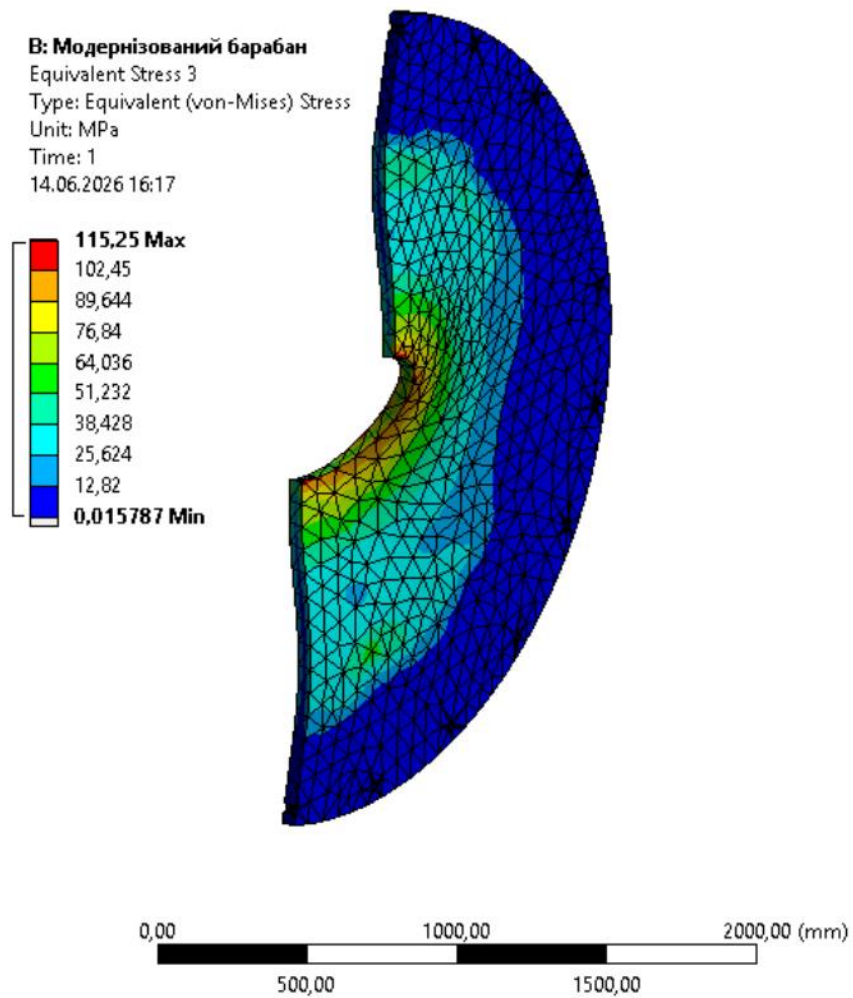


Рисунок 5.32 - Еквівалентні напруження у торцевій кришці

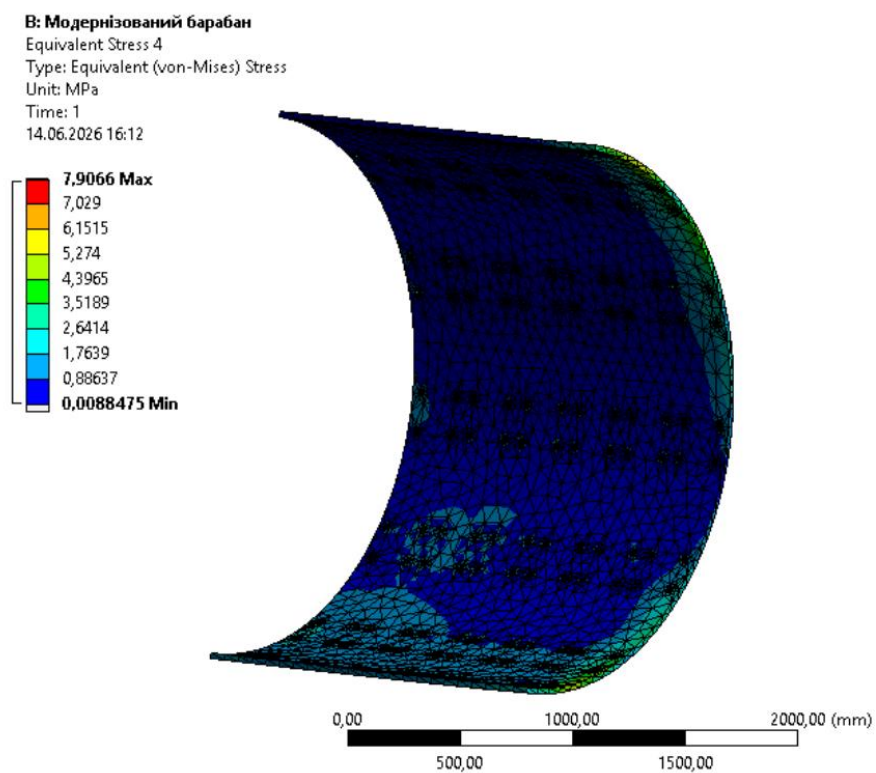


Рисунок 5.33 - Еквівалентні напруження у корпусі барабана

В: Модернізований барабан
 Equivalent Stress 5
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 16:12

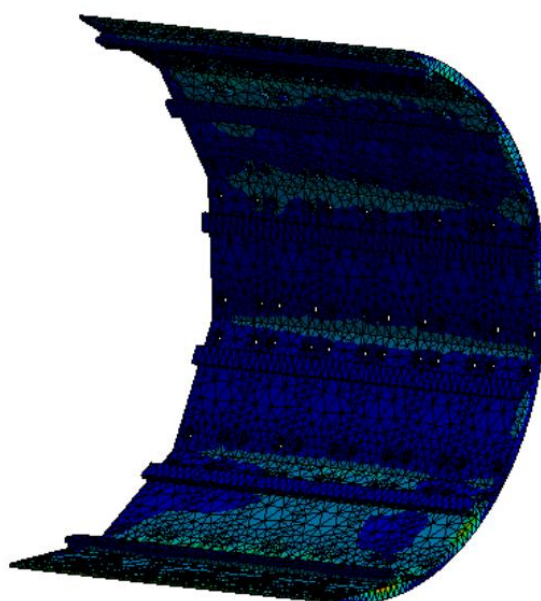
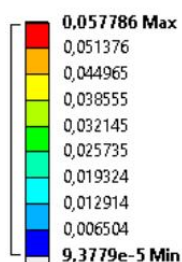


Рисунок 5.34 - Еквівалентні напруження у поліуретановому тілі

В: Модернізований барабан
 Equivalent Stress 6
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 16:12

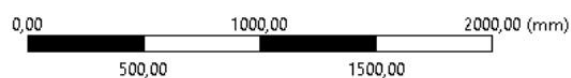
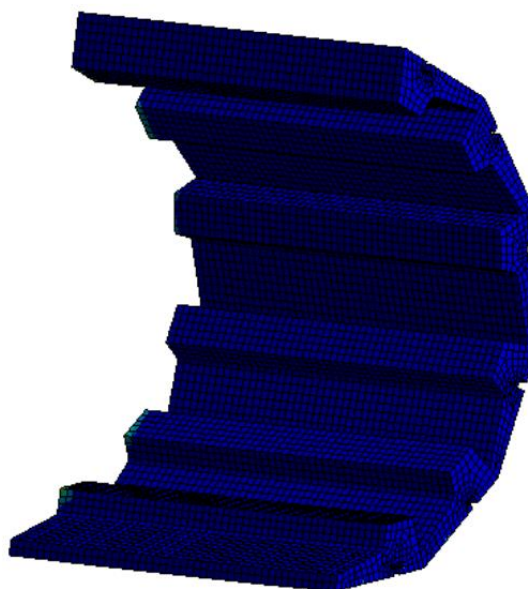
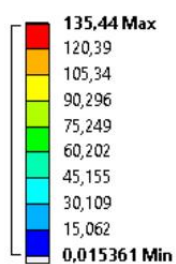


Рисунок 5.35 - Еквівалентні напруження у сталевій вставці-ліфтері

В: Модернізований барабан
 Equivalent Stress 7
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 14.06.2026 16:13

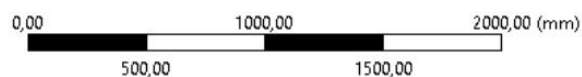
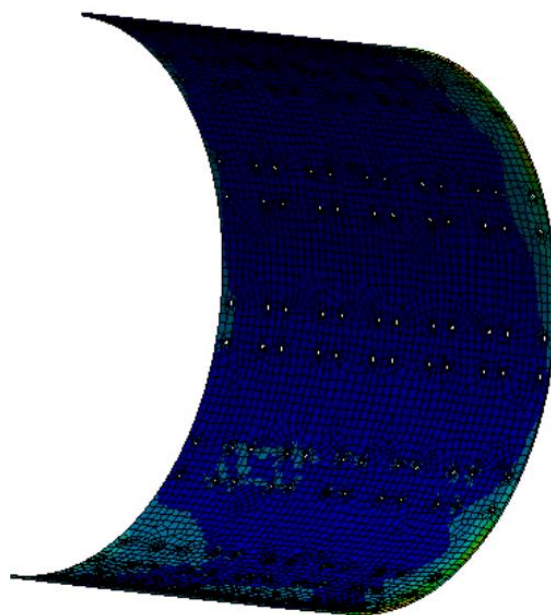
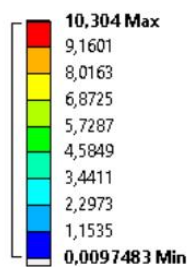


Рисунок 5.36 - Еквівалентні напруження у нижній опорній пластині

В: Модернізований барабан
 Equivalent Elastic Strain
 Type: Equivalent Elastic Strain
 Unit: mm/mm
 Time: 1
 14.06.2026 16:13

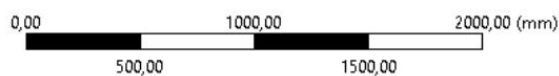
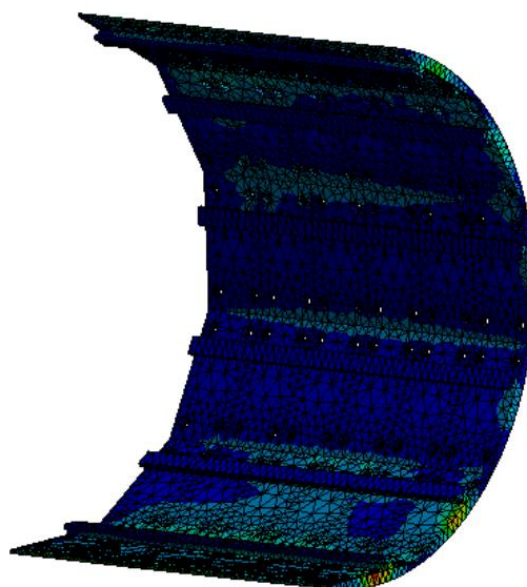
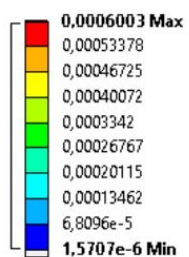


Рисунок 5.37 - Еквівалентна пружна деформація поліуретанового шару

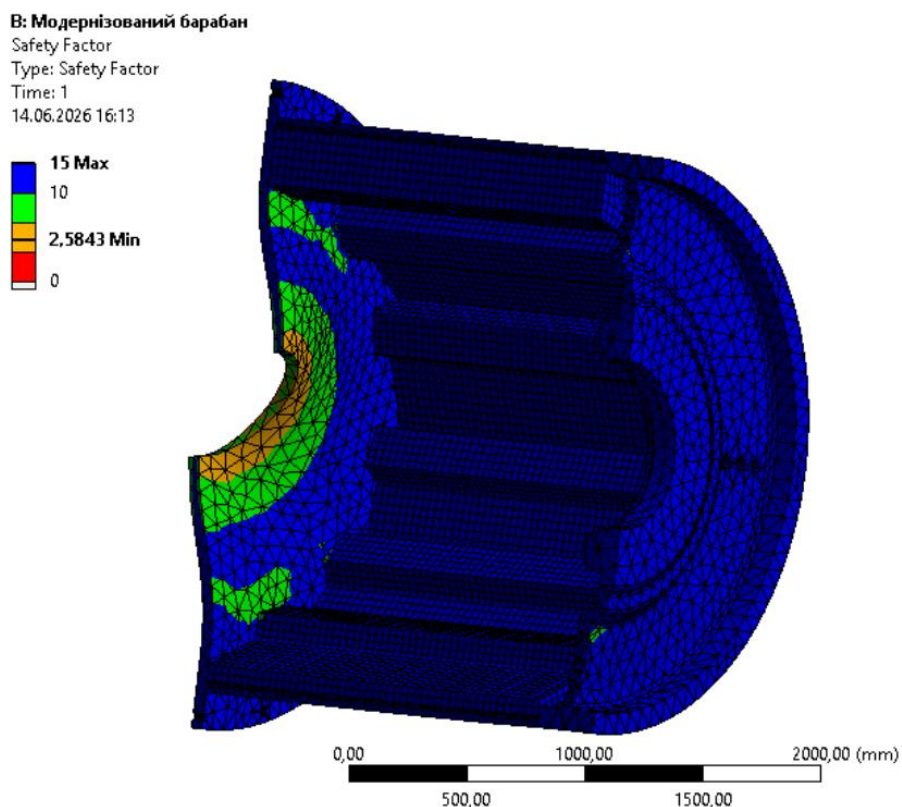


Рисунок 5.38 - Коефіцієнт запасу міцності барабана з модернізованою футеровкою

Узагальнені результати числового моделювання барабана з немодернізованою та модернізованою футеровкою наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 - Порівняння результатів числового моделювання барабана з різними типами футеровки

Параметр	Немодернізована	Модернізована	Зміна
Загальні переміщення, мм	1,5165	1,5646	+3,17 %
Вертикальний прогин по осі Y, мм	-1,1438	-1,1595	+1,37 %
Еквівалентні напруження всієї моделі, МПа	137,58	135,44	-1,56 %
Еквівалентні напруження футеровки, МПа	137,58	135,44	-1,56 %

Еквівалентні напруження торцевої кришки, МПа	106,99	115,25	+7,72 %
Еквівалентні напруження корпусу барабана, МПа	4,804	7,9066	+64,58 %
Мінімальний коефіцієнт запасу міцності	2,5439	2,5843	+1,59 %

Для наочного порівняння максимальних еквівалентних напружень у основних елементах розрахункових моделей побудовано діаграму, наведену на рисунку 5.39.

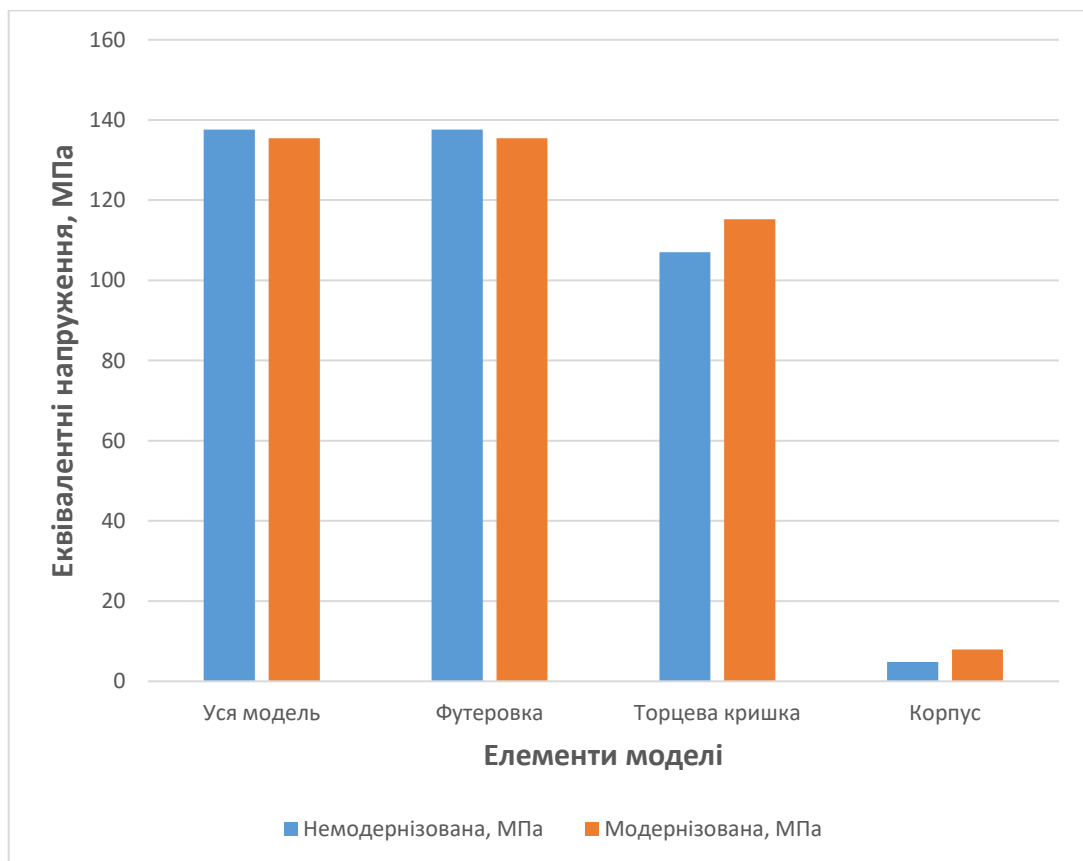


Рисунок 5.39 - Порівняння максимальних еквівалентних напружень у елементах барабана

За результатами порівняння встановлено, що обидві конструкції є працездатними, оскільки мінімальний коефіцієнт запасу міцності в обох випадках перевищує одиницю. Для барабана з немодернізованою футеровкою коефіцієнт запасу становить 2,5439, а для барабана з модернізованою футеровкою - 2,5843.

Модернізована конструкція має дещо більші загальні переміщення, що пояснюється наявністю поліуретанового демпфувального шару. Збільшення переміщення є незначним і становить 3,17 %, тому не впливає на працездатність конструкції. При цьому максимальні еквівалентні напруження у футеровці зменшуються з 137,58 МПа до 135,44 МПа, а коефіцієнт запасу міцності незначно зростає.

Напруження у корпусі барабана та торцевій кришці не перевищують допустимих значень для прийнятих матеріалів. Отже, модернізована футеровка не призводить до перевантаження основних елементів барабана. Поліуретановий шар у модернізованій конструкції працює як податливий елемент, що створює умови для зменшення ударної дії мелючих тіл і матеріалу на корпус барабана.

Таким чином, запропонована модернізація футеровки є доцільною, оскільки забезпечує працездатність барабана, зберігає достатній запас міцності та покращує умови сприйняття ударних навантажень у футеровочному вузлі.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно зі статтею 21 Закону України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII [16], виробниче обладнання, машини, механізми та технологічні процеси повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів з охорони праці.

Тема даного дипломного проекту - «Кульовий млин з модернізацією футеровки». Кульовий млин є промисловим обладнанням, призначеним для подрібнення матеріалів за рахунок ударної та стиральної дії мелючих тіл усередині обертового барабана.

Обладнання розміщується у виробничому приміщенні ділянки подрібнення площею $S = 500 \text{ м}^2$. У приміщенні розташовані кульовий млин, привід, завантажувальний та розвантажувальний вузли, сепаратор, циклон, транспортує обладнання та система аспірації для видалення пилу. Приміщення обладнане загальнообмінною вентиляцією, штучним освітленням, електроживленням для приводу млина та проходами для безпечного обслуговування обладнання.

6.1 Виявлення та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Кульовий млин працює у складі технологічної лінії подрібнення матеріалу. Основний процес відбувається всередині обертового барабана, де матеріал подрібнюється за рахунок удару, стирання та роздавлювання мелючими тілами.

Під час експлуатації кульового млина та допоміжного обладнання ділянки подрібнення виникають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- запиленість повітря робочої зони під час завантаження, подрібнення, сепарації та розвантаження матеріалу;
- небезпека ураження електричним струмом при роботі електродвигунів, шаф керування, кабельних ліній та пускозахисної апаратури;
- небезпека травмування рухомими й обертовими частинами обладнання, а також супутній вплив шуму і вібрації, що виникають під час роботи барабана, зубчастого вінця, муфт, валів, редуктора, приводу та мелючих тіл;

- пожежна небезпека, пов'язана з наявністю електрообладнання, кабельних мереж, мастильних матеріалів, пилу та можливим перегріванням вузлів машини.

Найбільш небезпечними зонами на ділянці подрібнення є місця біля приводу млина, зубчастої передачі, муфт, підшипникових вузлів, завантажувального та розвантажувального обладнання, сепаратора і циклона. У подальших підрозділах наведено заходи щодо зменшення впливу зазначених факторів на працівників.

6.2 Повітря робочої зони

Під час роботи кульового млина можливе виділення пилу в повітря робочої зони. Основними місцями пиловиділення є завантажувальний та розвантажувальний вузли, сепаратор, циклон, транспортуюче обладнання та місця пересипання матеріалу.

Параметри мікроклімату у виробничому приміщенні приймаються відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [17]. Робота оператора кульового млина відноситься до категорії легких фізичних робіт Іа, для яких енерговитрати становлять до 120 ккал/год. Основні операції виконуються з пульта керування та не потребують значного фізичного навантаження. Робоче місце оператора є постійним, оскільки працівник перебуває на ньому більшу частину робочого часу під час контролю роботи млина та допоміжного обладнання. Оптимальні параметри мікроклімату для цієї категорії робіт наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Оптимальні параметри мікроклімату робочої зони для категорії робіт Іа

Період року	Категорія роботи	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	легка Іа	22–24	40–60	0,1
Теплий	легка Іа	23–25	40–60	0,1

Для зменшення запиленості передбачаються: герметизація завантажувального та розвантажувального вузлів, встановлення місцевої аспірації, очищення запиленого повітря в циклоні або фільтрувальній установці, регулярне очищення обладнання та підлоги від пилу. Працівники повинні використовувати протипилові респіратори та захисні окуляри, наприклад респіратор 3М 9322+ FFP2, респіратор Дніпро-М FFP2 або аналогічні засоби захисту органів дихання.

Після виконання наведених заходів, підтримання справної роботи вентиляції, аспірації та пиловловлювального обладнання, параметри повітря робочої зони будуть відповідати нормативним вимогам, а вплив пилу на працівників буде мінімізований.

6.3 Електробезпека

Електроживлення кульового млина та допоміжного обладнання здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380/220 В і частотою 50 Гц. До електрообладнання ділянки подрібнення належать електродвигун приводу млина, електродвигуни сепаратора, циклона, системи аспірації, шафа керування, кабельні лінії та пускозахисна апаратура.

Вимоги до безпечної експлуатації електроустановок приймаються згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” [18]. Виробниче приміщення ділянки подрібнення належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом, оскільки в ньому наявне металеве обладнання, електроприводи, кабельні лінії та можливе осідання пилу на електроапаратурі.

Основними причинами ураження електричним струмом є пошкодження ізоляції кабелів, дотик до струмоведучих частин, несправність захисного заземлення, потрапляння пилу в електричні шафи та виконання ремонтних робіт без повного знеструмлення обладнання.

Для забезпечення електробезпеки передбачаються такі заходи: захисне заземлення корпусів електродвигунів і шаф керування, автоматичне вимкнення живлення при короткому замиканні або перевантаженні, розміщення

струмоведучих частин у закритих шафах, встановлення кнопки аварійного зупинення млина, використання попереджувальних плакатів «Не вмикати - працюють люди» та «Стій! Напруга».

Під час обслуговування електрообладнання застосовують діелектричні рукавички, діелектричні килимки, інструмент з ізольованими ручками та показчики напруги. Прикладами таких засобів є діелектричні рукавички КВТ С-31, показчик напруги КВТ УНН-1 та діелектричний килимок Дніпро-М 750×750 мм.

Електротехнічні роботи повинні виконувати тільки працівники, які мають відповідну групу з електробезпеки. Оператор кульового млина не повинен відкривати електричні шафи, ремонтувати кабелі або працювати з електрообладнанням під напругою.

Після виконання наведених вимог і рекомендацій ризик ураження працівників електричним струмом на ділянці подрібнення буде мінімізований, а питання з електробезпеки під час експлуатації кульового млина не повинні виникати.

6.4 Безпека при роботі з рухомими та обертовими частинами

Під час роботи кульового млина небезпеку становлять обертовий барабан, зубчастий вінець, муфти, вали, редуктор, привід і транспортуюче обладнання. Потрапляння працівника в зону дії цих вузлів може призвести до затягування одягу, защемлення або травмування.

Вимоги до зменшення ризиків при роботі з машинами приймаються згідно з ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків» [19].

Для запобігання травмуванню передбачаються: встановлення стаціонарних металевих огорожень біля зубчастого вінця, муфт і валів; закриття небезпечних зон кожухами; нанесення попереджувальних знаків; встановлення кнопки аварійної зупинки млина; заборона роботи при знятих огороженнях. Огляд, очищення та ремонт допускаються тільки після повної зупинки барабана,

вимкнення електроживлення і вивішування плаката «Не вмикати - працюють люди».

Для безпечного обслуговування млина передбачаються проходи шириною не менше 1 м, справні робочі майданчики та поручні. Під час роботи млина також виникають шум і вібрація, що пов'язані з ударною дією мелючих тіл, обертанням барабана, роботою редуктора, приводу та допоміжного обладнання. Допустимі рівні шуму приймаються відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [20], а рівні загальної та локальної вібрації - відповідно до ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [21]. Контроль рівнів шуму та вібрації повинен виконуватися на робочому місці оператора з урахуванням допустимих значень, установлених зазначеними санітарними нормами. Для зменшення впливу шуму працівники повинні використовувати протишумові навушники, наприклад 3М Peltor Optime I або Дніпро-М Profi, а для зменшення вібрації необхідно регулярно контролювати технічний стан підшипників, редуктора, приводу та кріплення обладнання.

Після встановлення огорожень, дотримання порядку зупинки обладнання перед ремонтом і використання засобів індивідуального захисту ризик травмування рухомими та обертовими частинами буде мінімізований.

6.5 Пожежна безпека

Пожежна безпека ділянки подрібнення забезпечується відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [22] та Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників, затверджених наказом МВС України від 15.01.2018 № 25 [23].

У виробничому приміщенні площею $S = 500 \text{ м}^2$ розташовані кульовий млин, сепаратор, циклон, транспортуюче обладнання, електродвигуни, кабельні лінії та система аспірації. Основний матеріал, що подрібнюється, не є легкозаймистим,

тому приміщення ділянки подрібнення можна віднести до категорії Д за пожежною небезпекою.

Основними джерелами пожежної небезпеки є електрообладнання, кабельні мережі, мастильні матеріали в редукторі та підшипникових вузлах, осідання пилу на поверхнях обладнання, а також можливе перегрівання вузлів млина.

Відповідно до норм належності порошкових вогнегасників для приміщень категорій Г, Д при площі від 150 до 500 м² і класі можливої пожежі А, Е необхідно передбачити не менше 3 порошкових вогнегасників із зарядом 9 кг або еквівалентний варіант за вогнегасною здатністю. Для даного приміщення приймаємо 3 порошкові вогнегасники ВП-9. Додатково біля електрошаф і пульта керування встановлюємо 2 вуглекислотні вогнегасники ВВК-5, які доцільно використовувати для гасіння електрообладнання.

Для запобігання пожежі передбачаються: справний стан електрообладнання, захист кабельних ліній від пошкодження, регулярне очищення обладнання від пилу, контроль температури підшипників і редуктора, заборона використання відкритого вогню та своєчасне усунення витоків мастильних матеріалів.

Приміщення обладнується пожежними сповіщувачами, наприклад димовими Артон СПД-3 або тепловими Тірас СПТ, пожежним щитом, ящиком з піском та пожежним інвентарем. Вогнегасники розміщують у доступних місцях, поблизу виходів і зон підвищеної небезпеки. Евакуаційні проходи повинні залишатися вільними, а їх ширина має бути не менше 1 м.

Після виконання наведених заходів, забезпечення приміщення необхідною кількістю вогнегасників і підтримання справного стану електрообладнання, системи аспірації та пожежної сигналізації, ризик виникнення пожежі на ділянці подрібнення буде мінімізований.

6.6 Висновки до розділу

У розділі охорони праці було розглянуто основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які можуть виникати під час експлуатації кульового млина з модернізацією футеровки та допоміжного обладнання ділянки подрібнення.

До основних факторів віднесено запиленість повітря робочої зони, небезпеку ураження електричним струмом, небезпеку травмування рухомими та обертовими частинами обладнання із супутнім впливом шуму і вібрації, а також пожежну небезпеку. Для кожного з цих факторів було запропоновано відповідні заходи захисту: використання вентиляції та аспірації, захисного заземлення, аварійного вимкнення, огорожень рухомих частин, засобів індивідуального захисту та первинних засобів пожежогасіння.

Після виконання наведених заходів, дотримання вимог чинних нормативних документів та проведення регулярного контролю технічного стану обладнання, умови праці на ділянці подрібнення будуть відповідати вимогам охорони праці, а ризик виникнення небезпечних ситуацій буде мінімізований.

7.1 Опис і призначення деталі

У даному розділі розглядається технологія виготовлення кришки підшипникового вузла кульового млина. Кришка підшипника є деталлю, що входить до складу опорного вузла барабана млина та призначена для закривання корпусу підшипника, захисту внутрішніх елементів від забруднення, а також для забезпечення правильного положення ущільнювальних елементів.

Кришка працює в умовах дії статичних навантажень, вібрації та можливого забруднення пилом, тому до неї висуваються вимоги щодо достатньої міцності, жорсткості та точності обробки посадкових поверхонь. За конструктивною формою деталь належить до деталей типу «диск» і має циліндричні зовнішні та внутрішні поверхні, торцеві площини і кріпильні отвори. Ескіз кришки підшипникового вузла наведено на рисунку 7.1.

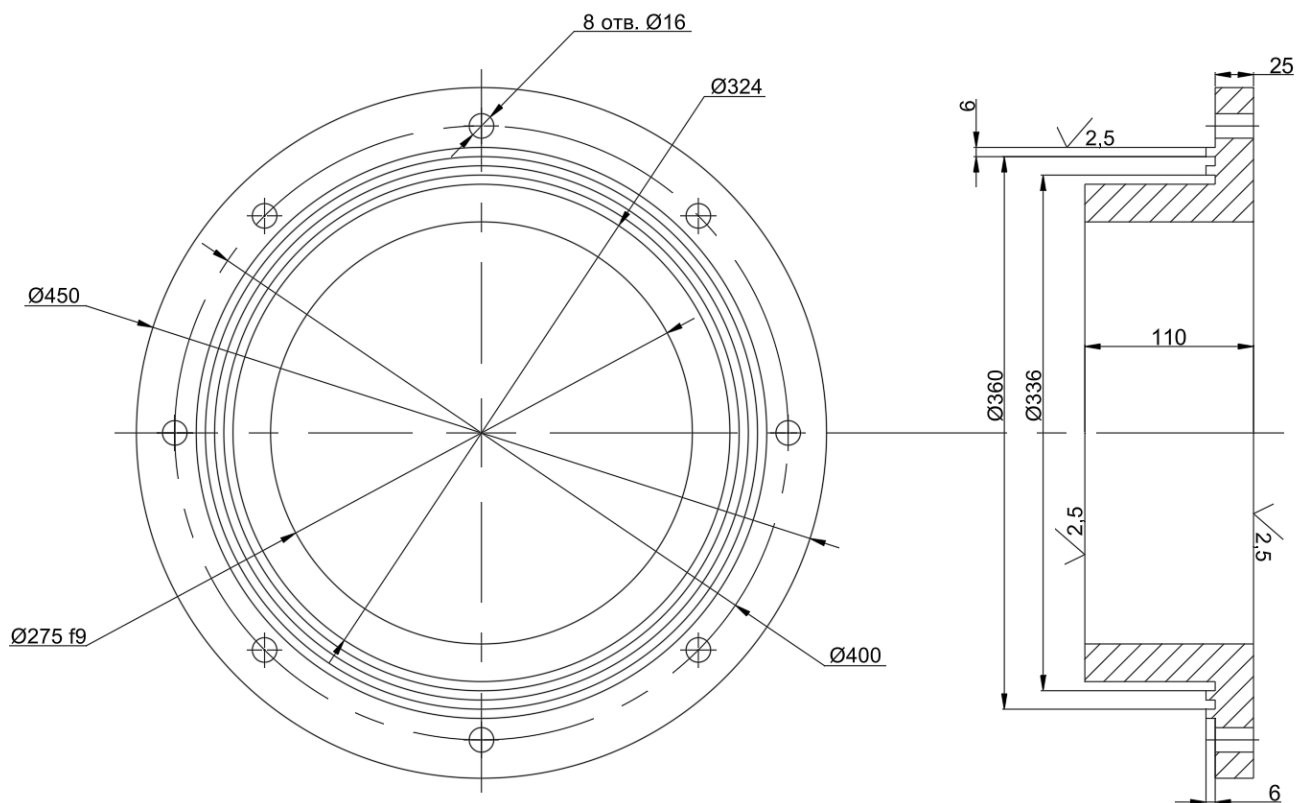


Рисунок 7.1 – Ескіз кришки підшипникового вузла

Матеріал деталі - сірий чавун СЧ20 ГОСТ 1412-85. Цей матеріал має достатню міцність, добрі ливарні властивості, добре обробляється різанням і широко застосовується для виготовлення корпусних деталей, кришок, втулок та інших елементів машинобудівного обладнання.

Для виготовлення кришки підшипникового вузла як заготовку доцільно використовувати литу заготовку, отриману литтям у піщану форму. Такий спосіб отримання заготовки є раціональним, оскільки деталь має відносно просту форму, а сірий чавун добре підходить для ливарного виробництва. Ескіз заготовки кришки наведено на рисунку 7.2.

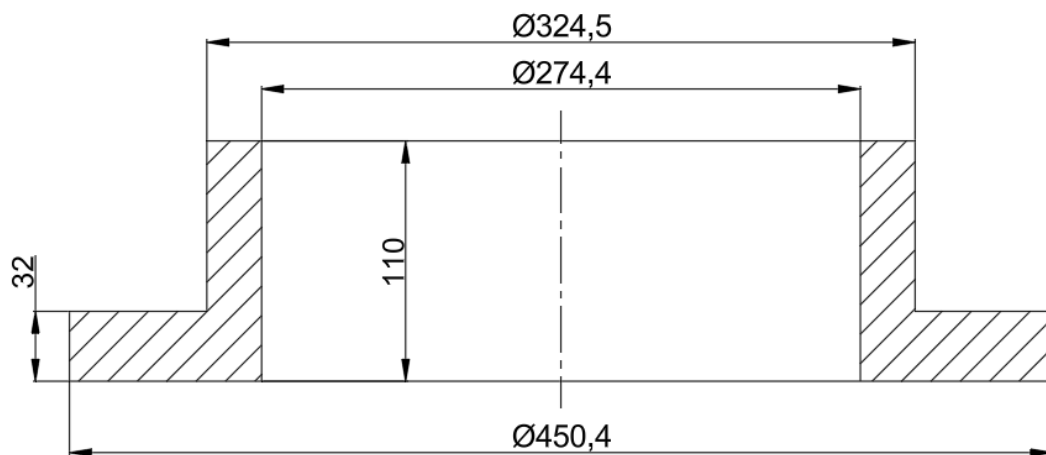


Рисунок 7.2 – Ескіз заготовки кришки підшипникового вузла

Заготовка повинна забезпечувати можливість отримання всіх необхідних поверхонь деталі після механічної обробки. Основними оброблюваними поверхнями є зовнішні циліндричні поверхні, центральний отвір, торцеві площини та кріпильні отвори.

7.2 Розробка технологічного процесу виготовлення деталі

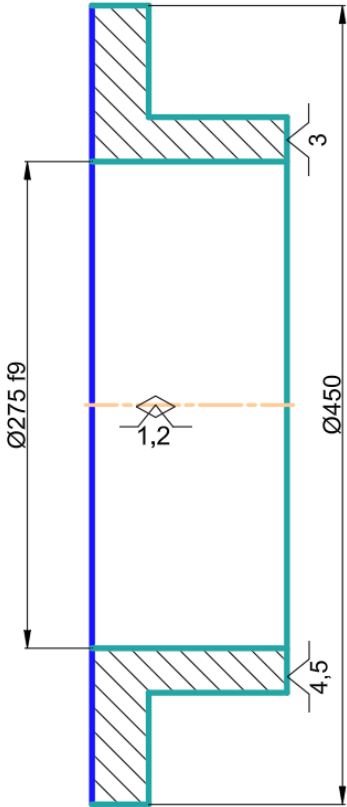
Розроблений технологічний процес виготовлення кришки підшипникового вузла складається з токарних та свердлильних операцій. Детально процес виготовлення наведено у маршрутній карті, картах ескізів та операційних картах.

Дубл.																
Взамін.																
Підпис									Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата			
Розробив	Білецький К.М.					КПІ імені Ігоря Сікорського										
Перевірів	Борщик С.О.															
						Кришка підшипникового вузла					Н					
Н.контр.																
М01	СЧ20 ГОСТ 1412-85															
М02	Код		ОВ	МД	ОМ	Н.роз	КВМ	код.загот	Профіль і розміри		КД	МЗ				
			Кз	50	1						1					
А	Цех	Уч	Рм	Опер.	Код, найменування операції				Позначення документу							
Б	Код, найменування обладнання					См	Проф.	Р	Уп	Кр	Коод	Он	Оп	Кшт	Тп.з	Т. шт
А01	005 3608 Токарна					60141.00001; 20141.00001; 10П№ХХ-ХХ										
Б02	38261.ХХХХ Токарний верстат з ЧПК 16K20Ф3					1863	3	10	1	1	1	50	1			
03																
А04	010 3608 Токарна					60141.00002; 20141.00002; 10П№ХХ-ХХ										
Б05	38261.ХХХХ Токарний верстат з ЧПК 16K20Ф3					1863	3	10	1	1	1	50	1			
06																
А07	015 4233 Свердлильна					60141.00003; 20141.00003; 10П№ХХ-ХХ										
Б08	38261.ХХХХ Вертикально-свердлильний верстат 2Н125					1863	3	10	1	1	1	50	1			
09																
А10																
Б11																
12																
А13																
Б14																
МК	Обробка різанням															

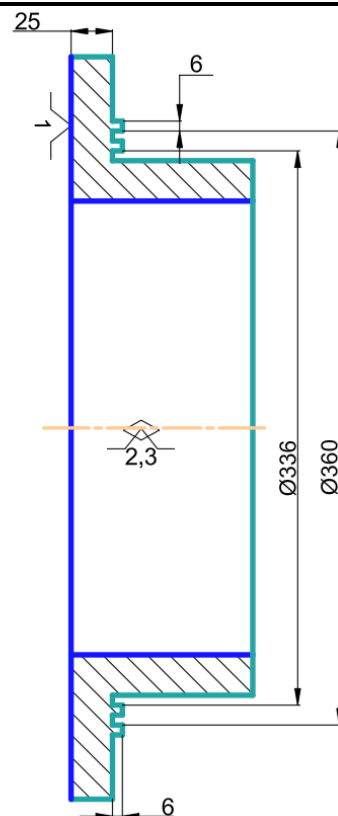
Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

Розробив	Білецький К.М.			КПІ імені Ігоря Сікорського		005						
Перевірів	Борщик С.О.											
				Кришка підшипникового вузла						Н		
Н.контр.												



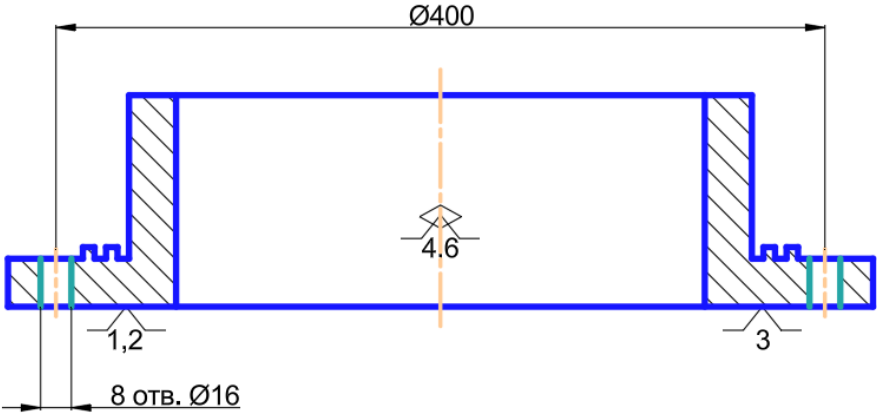
<i>Дубл.</i>													
<i>Взамін.</i>													
<i>Підпис</i>													
<i>Розробив</i>	<i>Білецький К.М.</i>			<i>КПІ імені Ігоря Сікорського</i>						<i>010</i>			
<i>Перевірив</i>	<i>Борщук С.О.</i>												
				<i>Кришка підшипникового вузла</i>							<i>Н</i>		
<i>Н.контр.</i>													



KE

Обробка різанням

Дубл.															
Взамін.															
Підпис									Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата		
Розробив	Білецький К.М.			КПІ імені Ігоря Сікорського								015			
Перевірів	Борищук С.О.														
				Кришка підшипникового вузла										Н	
Н.контр.															



Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

						Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата
--	--	--	--	--	--	----	----	--------	--------	------

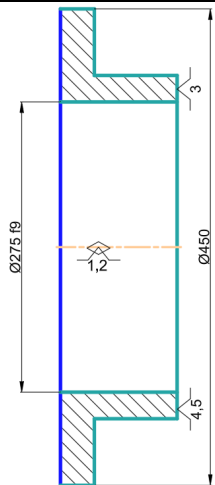
Розробив	Білецький К.М.		
Перевірів	Борщик С.О.		
Н.контр.			

КПІ імені Ігоря
Сікорського

Кришка підшипникового вузла

Н

005



Назва операції				Матеріал	
Токарна				СЧ 20 ГОСТ 1412-85	
Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри	МЗ	Коод
	кг	50			
Обладнання, пристрій ЧПК			Позначення програми		
Токарний верстат з ЧПУ 16К20Ф3					
То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР	
				Емульсія	

Р		ПН	Д або В	Л	t	i	s	n	v
Р01	1. Встановити та закріпити деталь;								
Т02	2. Точити Ø450 начорно, начисто;								
О3	3. Розточити отвір Ø275 f9 начорно, начисто;								
О04	4. Підрізати торець.								
Т05									

ОК

Обробка різанням

Дубл.																				
Взамін.																				
Підпис																				
										Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата						
Розробив	Білецький К.М.							КПІ імені Ігоря Сікорського												
Перевірів	Борщик С.О.																			
Н.контр.										Кришка підшипникового вузла				Н		010				
										Назва операції				Матеріал						
										Токарна				СЧ 20 ГОСТ 1412-85						
										Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ		Коод			
											кг	50								
										Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми						
										Токарний верстат з ЧПУ 16К20Ф3										
										То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР						
														Емульсія						
Р					ПН	D або B		L	t	i	s	n	v							
P01	1. Встановити та закріпити деталь;																			
T02	2. Розточити Ø336 начорно, начисто;																			
O3	3. Точити Ø360 начорно, начисто;																			
O04	4. Підрізати торець;																			
T05	5. Точити пази шириною 6 мм начорно, начисто.																			
OK		Обробка різанням																		

**КПІ імені Ігоря
Сікорського**

Кришка підшипникового вузла

H		015
-----	--	-----

Technical drawing of a rectangular frame structure. The overall width is labeled as $\varnothing 400$. The height of the frame is indicated by a dimension line on the left, labeled 4.6 . The frame consists of a central rectangular section and two side sections. The side sections are labeled with dimensions 1.2 and 3 . The bottom section is labeled $8 \text{ отв. } \varnothing 16$. The drawing includes a central vertical dashed line and a horizontal dashed line.

[illegible]

7.3 Призначення пристосування для обробки деталі

Для виконання свердлильної операції під час виготовлення кришки підшипникового вузла використовується поворотний ділильний стіл з трьохкулачковим самоцентруючим патроном. Це пристосування призначене для базування, закріплення та повороту деталі на заданий кут під час свердління кріпильних отворів.

Кришка встановлюється в трьохкулачковий патрон, який забезпечує її центрування відносно осі поворотного стола. Після закріплення деталі виконується свердління першого отвору. Далі стіл повертають на необхідний кут і фіксують у новому положенні. Оскільки на кришці передбачено вісім кріпильних отворів, кут повороту після свердління кожного отвору становить 45° .

Ескіз поворотного ділильного стола з трьохкулачковим патроном наведено на рисунку 7.3.

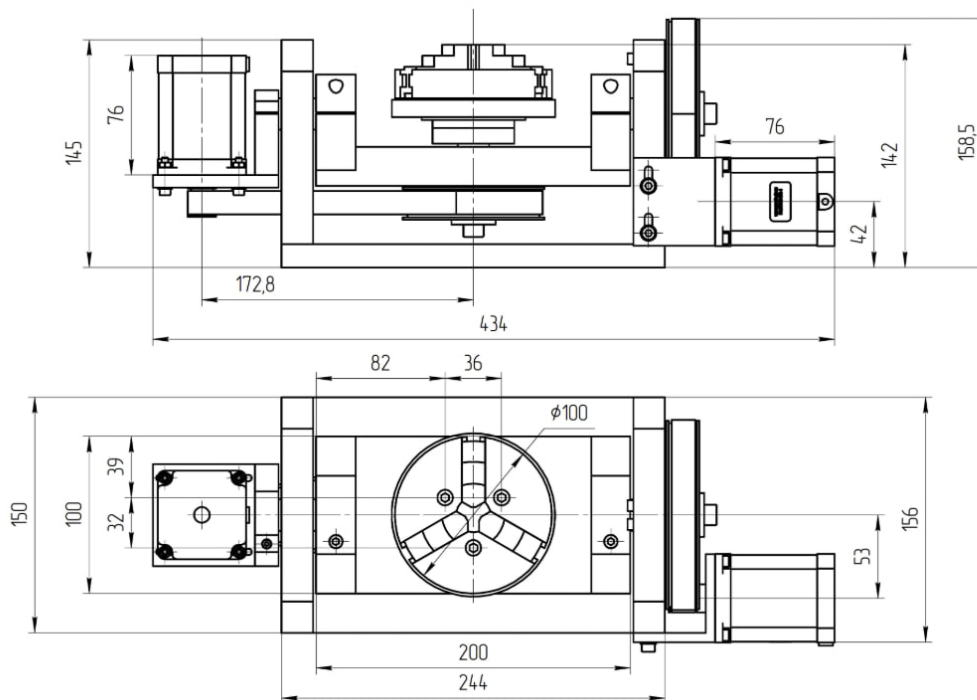


Рисунок 7.3 – Поворотний ділильний стіл з трьохкулачковим патроном

Застосування такого пристосування дозволяє точно розташувати кріпильні отвори по колу, зменшити час на розмічання та підвищити зручність обробки деталі на вертикально-свердлильному верстаті.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розглянуто конструкцію двокамерного барабанного кульового млина та виконано модернізацію його футеровочного вузла. Актуальність модернізації зумовлена тим, що футеровка працює в умовах інтенсивної ударної та абразивної дії мелючих тіл і матеріалу, тому значною мірою впливає на надійність, довговічність і ремонтпридатність млина.

У роботі проаналізовано призначення, галузь застосування, конструкцію та принцип дії базової машини. На основі літературно-патентного огляду обґрунтовано вибір модернізованої конструкції футеровки, яка має складену будову та включає поліуретановий демпфувальний шар, сталеву вставку-ліфтер і нижню опорну пластину. Таке рішення дозволяє поєднати зносостійку робочу поверхню з податливим шаром, що сприяє зменшенню ударної дії на корпус барабана.

Виконано параметричні та кінематичні розрахунки кульового млина, у результаті яких визначено основні робочі параметри обладнання: критичну та робочу частоту обертання, кутову і колову швидкість барабана, об'єм завантаження, масу мелючих тіл і матеріалу, силу ваги завантаження, корисну потужність, крутний момент, продуктивність та питому витрату енергії. Отримані значення використано як вихідні дані для подальших перевірочних розрахунків і числового моделювання.

Проведено розрахунок на міцність корпусу барабана та болтового кріплення футеровочних елементів. За результатами розрахунків встановлено, що корпус барабана працює з достатнім запасом міцності, а болтове кріплення витримує навантаження за умовами зрізу та зминання. Додатково виконано розрахунок із застосуванням ЕОМ, який підтвердив результати ручного розрахунку.

Для оцінки ефективності модернізації виконано числове моделювання напружено-деформованого стану півмоделі першої камери барабана у середовищі ANSYS Mechanical. Порівняно два конструктивні варіанти: барабан з немодернізованою сталевною футеровкою та барабан з модернізованою футеровкою. Результати моделювання показали, що обидві конструкції є працездатними, а мінімальний коефіцієнт запасу міцності в обох випадках перевищує одиницю.

Модернізована футеровка має дещо більші загальні переміщення, що пояснюється наявністю поліуретанового шару, однак це збільшення є незначним і не впливає на працездатність конструкції. При цьому максимальні еквівалентні напруження у футеровці зменшуються, а коефіцієнт запасу міцності дещо зростає.

У проекті також розглянуто питання охорони праці під час експлуатації кульового млина та визначено основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори. Для виготовлення деталі розроблено технологічний процес механічної обробки, маршрутну карту та операційні карти, що забезпечує можливість виготовлення деталі в умовах машинобудівного виробництва.

Отже, у результаті виконання дипломного проекту підтверджено технічну доцільність модернізації футеровочного вузла кульового млина. Запропонована конструкція забезпечує працездатність барабана, не призводить до перевантаження його основних елементів, зберігає достатній запас міцності та створює умови для зменшення ударної дії мелючих тіл і матеріалу. Поставлені завдання виконано в повному обсязі, а мету дипломного проекту досягнуто.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І. О. Механічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів : підручник. 5-те вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 102 с.
2. Технологічна схема лінії з використанням кульового млина. Kurimoto. Ball mill system. URL:<https://www.global-kurimoto.com/id/id/product/item/07pw/190.php>
3. Корнієнко Я. М., Гайдай С. С. Процеси та обладнання хімічної технології. ПАХТ-3. Гідромеханічні процеси : практикум. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
4. Білецький В. С., Смирнов В. О. Технологія збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2009.
5. Мікульонок І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Подрібнювальні тіла барабанних млинів і дробарок. Хімічна інженерія. 2022.
6. 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>
7. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Гур'єва Л.Н. Технологія виробництва матеріалів і виробів будівельного призначення [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. – 188с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66516>
8. Patent US9475058B2. Mill liner.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/d8/96/a8/32ea6d25f1ec48/US9475058.pdf>
9. Patent US20100233420A1. Composite lining for ball mills.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/d3/b1/24/4dfbb851c5c35d/US20100233420A1.pdf>
10. Patent EP1838446B1. Mill lining assembly.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/75/9d/81/e05227f723ebc4/EP1838446B1.pdf>

11. Patent US9375722B2. Wear resistant liner for a discharge wall of a grinding mill.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/8f/f1/76/cd364a900a04c3/US9375722.pdf>
12. Patent WO2015081800A1. Ball mill liner assembly and installation method thereof.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/27/de/4673ceca7f727c/WO2015081800A1.pdf>
13. Patent US8235318B2. Liner for grinding mills.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/4b/44/47/6e3ad62f0ab00b/US8235318.pdf>
14. Кульові млини: опис, принцип роботи та основні розрахункові залежності.
Studfile. URL:<https://studfile.net/preview/15370064/page:6/>
15. Чихладзе Е. Д. Опір матеріалів : підручник. Харків : УкрДУЗТ, 2018. 362 с.
16. Вершков О. О. Практичні розрахунки на зріз та зминання : методичні вказівки до практичного заняття. Мелітополь : ТДАТУ, 2020.
17. Марочник сталі і сплавів. Характеристики сталей і сплавів, механічні та фізичні властивості матеріалів. URL:<https://www.splav-kharkov.com>
18. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.
19. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
20. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
21. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків.
22. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
23. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
25. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 15.01.2018 № 25.

ДОДАТКИ

Додаток А – таблиця розглянутих патентів

№	Предмет пошуку	№ свідоцтва, МПК, країна, організація, автор	Суть заявленого технологічного рішення та ціль його створення
1	Футерувальний елемент з твердими вставками у пружному матеріалі	US9475058B2; МПК: B02C 17/22, B02C 17/225; США; організація: Weir Minerals Australia Ltd; автор: Stuart Town	Рішення передбачає виготовлення футеровочного компонента шляхом розміщення твердих вставок у формі та подальшого формування навколо них тіла з пружного матеріалу. Така конструкція поєднує зносостійкість твердих елементів і демпфуючі властивості еластомеру. Основною метою є підвищення ресурсу футеровки та зменшення пошкоджень від ударних навантажень.
2	Композитна футеровка для кульових млинів	US20100233420A1; МПК: B02C 17/22, B02C 17/225; США; організація: Tega Industries Ltd; автори: Somenath Ghosh, Koushik Sengupta	Запропоновано футеровку, що складається з верхнього шару легованої литої сталі та нижнього гумового шару. Металева частина забезпечує зносостійкість робочої поверхні, а гумова основа зменшує передачу ударних навантажень на корпус барабана. Основна мета - підвищення довговічності футеровки та зменшення динамічного впливу на корпус млина.
3	Футеровочний вузол млина з амортизуючим и та зносостійкими елементами	EP1838446B1; МПК: B02C 17/22; Європейський патент; організація: Vulco S.A.; автори: Ricardo Abarca Melo, Ricardo Fernandez Daberti	Конструкція передбачає використання футеровочного вузла з порожнинами для розміщення зносостійких елементів і амортизуючих частин. Це дозволяє розділити функції сприйняття зношування та демпфування ударів. Основна мета - підвищення ремонтпридатності, зменшення зношування та збільшення строку служби футеровки.

4	Зносостійка плита для розвантажувальної частини млина	US9375722B2; МПК: B02C 17/18, B02C 17/22, B02C 17/225, B02C 17/183; США; організація: Vulco S.A.; автор: Ricardo Francisco Doberti Fernandez	Патент описує зносостійку плиту для розвантажувальної стінки подрібнювального млина. Конструкція призначена для захисту ділянки, через яку проходить подрібнений матеріал, і працює в умовах інтенсивного абразивного зношування. Основна мета - підвищення довговічності вузла та зменшення витрат на ремонт.
5	Футеровочний вузол кульового млина та спосіб його встановлення	WO2015081800A1; МПК: B02C 17/22; країна: Китай; організація: Jiangsu Pengfei Group Co., Ltd.; автори: Gu Jinsheng, Wang Jiajun	Запропоновано футеровочний вузол кульового млина, що складається з окремих футеровочних плит, установлених на внутрішній поверхні барабана. Конструкція спрямована на спрощення монтажу та демонтажу футеровки, підвищення зручності її обслуговування і зменшення часу простою обладнання під час ремонту. Основною метою рішення є підвищення ремонтпридатності млина, надійності кріплення футеровочних елементів та забезпечення ефективної роботи барабана в умовах інтенсивного зношування.
6	Комбінована футеровка барабанного млина з ліфтерною частиною	US8235318B2; МПК: B02C 17/22, B02C 17/225; США; організація: Weir Slurry Group Inc; автори: David Timm, Neil Hirschi, Todd Moir, Bob Ecoff	Запропоновано футеровочний елемент, що складається з еластомерного тіла, нееластомерної опорної пластини та зносостійких вставок. Конструкція має підвищену частину, яка виконує функцію ліфтера і впливає на рух мелючих тіл. Основною метою є зменшення схильності футеровки до тріщиноутворення, зниження ударних навантажень, полегшення заміни зношених елементів та підвищення ефективності роботи робочої поверхні барабана.

Додаток Б - специфікації

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```

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

using namespace std;

int main()
{
    const double L = 5.71;
    const double F = 1302.0;
    const double q = F / L;
    const double RA = F / 2.0;

    const double Dzovn = 2.45;
    const double Dvn = 2.40;
    const double T = 128110.0;
    const double sigma_allow = 140.0;

    const double pi = 3.141592653589793;

    double I = pi * (pow(Dzovn, 4) - pow(Dvn, 4)) / 64.0;
    double W = I / (Dzovn / 2.0);
    double Jp = pi * (pow(Dzovn, 4) - pow(Dvn, 4)) / 32.0;
    double Rzovn = Dzovn / 2.0;

    double tau = T * Rzovn / Jp / 1000000.0;

    cout << fixed << setprecision(3);

    cout << "Rozrakhunok napruzhen u korpusi barabana kulovoho
mlyna" << endl;
    cout << "-----" << endl;
    cout << "L = " << L << " m" << endl;
    cout << "q = " << q << " kN/m" << endl;
    cout << "RA = RB = " << RA << " kN" << endl;
    cout << "I = " << I << " m^4" << endl;
    cout << "W = " << W << " m^3" << endl;
    cout << "Jp = " << Jp << " m^4" << endl;
    cout << "tau = " << tau << " MPa" << endl;
    cout << endl;

```

```
cout << setw(8) << "x, m"
    << setw(12) << "Q, kN"
    << setw(14) << "M, kN*m"
    << setw(16) << "sigma, MPa"
    << setw(18) << "sigma_eq, MPa"
    << setw(12) << "n" << endl;
```

```
cout << "-----"
-----" << endl;
```

```
int N = 10;
```

```
for (int i = 0; i <= N; i++)
{
```

```
    double x = L * i / N;
    double Q = RA - q * x;
    double M = RA * x - q * x * x / 2.0;
```

```
    double M_Nm = M * 1000.0;
    double sigma = M_Nm / W / 1000000.0;
```

```
    double sigma_eq = sqrt(pow(sigma, 2) + 3.0 * pow(tau, 2));
    double n = sigma_allow / sigma_eq;
```

```
    cout << setw(8) << x
        << setw(12) << Q
        << setw(14) << M
        << setw(16) << sigma
        << setw(18) << sigma_eq
        << setw(12) << n << endl;
```

```
}
```

```
return 0;
```

```
}
```

Модернізація футеровки барабанного кульового млина

Білецький К.М., студ., Сокольський О.Л., д.т.н., доц., Коцюба Н.М., студ.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

У роботі розглянута можливість удосконалення футеровки барабанного кульового млина шляхом використання складеної конструкції з опорною пластиною, пружним основним тілом та зносостійкою вставкою-ліфтером. Запропонована конструкція дозволяє зменшити вплив ударних навантажень на корпус барабана, підвищити довговічність футеровочного вузла та спростити заміну найбільш зношеного елемента.

Ключові слова: кульовий млин, футеровка, футеровочний вузол, ліфтер, модернізація.

Вступ. Кульові млини широко застосовуються у виробництві будівельних матеріалів, цементній, гірничо-збагачувальній та інших галузях промисловості для подрібнення твердих матеріалів до заданої крупності [1]. Робота такого обладнання ґрунтується на обертанні барабана з мелючими тілами, які подрібнюють матеріал за рахунок ударної, стиральної та роздавлювальної дії.

Одним із найбільш навантажених елементів барабанного млина є футеровка [2]. Вона захищає корпус від зношування, сприймає дію мелючих тіл і впливає на характер їх руху всередині барабана. У процесі експлуатації футеровка працює в умовах інтенсивного ударного та абразивного зношування, тому її довговічність безпосередньо впливає на надійність роботи млина і періодичність ремонтів.

Звичайна суцільна футеровочна плита переважно виконує захисну функцію, однак у складних умовах роботи вона поступово зношується і передає частину ударної дії на корпус барабана. Тому доцільним напрямом модернізації є використання складеної футеровки, у якій окремі елементи виконують опорну, демпфувальну та робочу функції.

Конструкція модернізованої футеровки. На основі аналізу патентних рішень для модернізації було обрано конструкцію футеровочного елемента за патентом US8235318B2 (рис. 1) [3]. Це рішення передбачає використання складеної футеровки, яка складається з кількох функціональних частин: опорної пластини, основного тіла та зносостійкої вставки-ліфтера.

Опорна пластина розміщується з боку корпусу барабана та є основою для встановлення футеровочного елемента. Основне тіло футеровки розташоване між опорною пластиною та робочою частиною. Зносостійка вставка-ліфтер утворює виступаючу ділянку робочої поверхні, яка контактує з матеріалом і мелючими тілами під час роботи млина.

За обраним патентним рішенням було розроблено 3D-модель модернізованого футеровочного вузла [4]. Модель включає сектор корпусу барабана, опорну пластину, основне тіло футеровки, окрему вставку-ліфтер, а також елементи болтового з'єднання. У конструкції збережено загальну ідею складеної футеровки, де окремі елементи виконують опорну, проміжну та робочу функції (рис. 2).

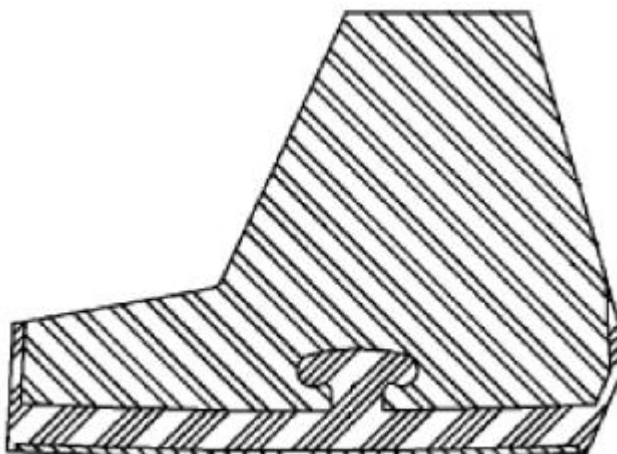


Рисунок 1 – Конструкція футеровочного елемента за патентом US8235318B2

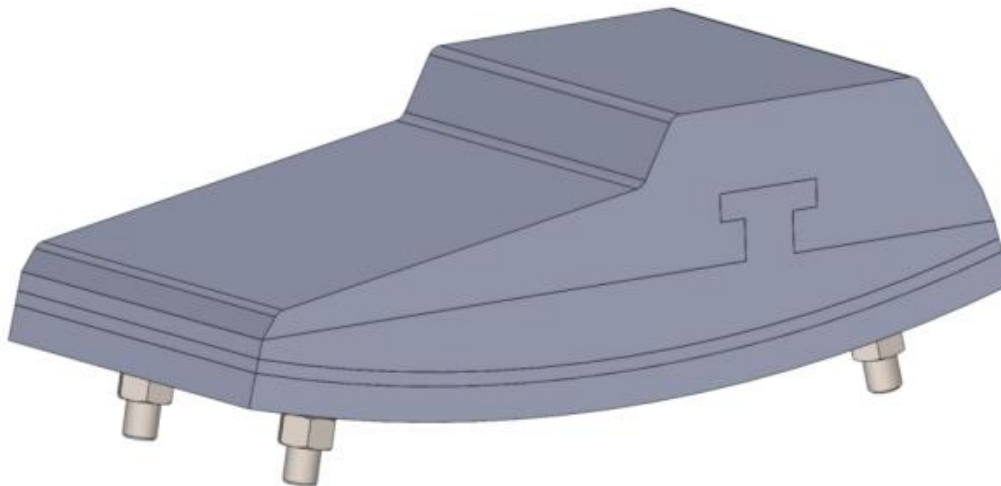


Рисунок 2 – 3D-модель модернізованого футеровочного вузла

Опис розробленої конструкції. Розроблена 3D-модель адаптує патентне рішення до умов встановлення футеровки на секторі барабана кульового млина. У конструкції збережено складену будову елемента, а вставка-ліфтер винесена в робочу зону, де відбувається безпосередня взаємодія з матеріалом і мелючими тілами. Такий підхід дозволяє розглядати ліфтер як окремий найбільш навантажений елемент футеровки.

Загальними перевагами запропонованої конструкції є:

- Розділення функцій між окремими елементами футеровки, що дозволяє окремо виділити опорну, демпфувальну та робочу частини.
- Зменшення передачі ударної дії на корпус барабана за рахунок використання пружного основного тіла.
- Підвищення зносостійкості робочої поверхні завдяки застосуванню окремої вставки-ліфтера.
- Спрощення обслуговування футеровочного вузла, оскільки найбільш навантажений елемент може бути замінений окремо.
- Збереження працездатності конструкції при заданому розрахунковому навантаженні.

Висновок. Запропонована конструкція модернізованої футеровки є доцільним варіантом удосконалення барабанного кульового млина. Використання складеної футеровки з опорною пластиною, пружним основним тілом і зносостійкою вставкою-ліфтером дає змогу розділити функції між окремими елементами вузла. Така конструкція спрямована на зменшення передачі ударної дії на корпус барабана, підвищення зносостійкості робочої поверхні та спрощення заміни найбільш навантаженого елемента. Отже, модернізована футеровка може бути використана для підвищення довговічності та ремонтпридатності кульового млина.

Перелік посилань

1. Мікульонюк І.О. Механічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів : підруч. 5-те вид., переробл. та доповн. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 102 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74513>
2. Деталі і вузли кульових млинів. Studfile. URL:<https://studfile.net/preview/9170823/page:3/>
3. Patent US8235318B2. Liner for grinding mills.
URL:<https://patentimages.storage.googleapis.com/4b/44/47/6e3ad62f0ab00b/US8235318.pdf>
4. Planchard D. C. Engineering Design with SOLIDWORKS 2023: A Step-by-Step Project Based Approach Utilizing 3D Solid Modeling. – SDC Publications, 2023.
URL:<https://static.sdcpublications.com/pdfsamples/978-1-63057-550-2-4-mbg811eo6r.pdf>