

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування**

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

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

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Лінія виробництва цементу з модернізацією трубного млина

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-22
(шифр групи)

_____ **Гаманчук Данил Юрійович**
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник проєкту:

_____ **доцент, Ph.D. Швачко Д.Г.**

(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультанти з питань

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

ТЕХ. МАШ.: ст. викл. Борщик С.О. _____

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

РЕЦЕНЗЕНТ _____

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

Студент (-ка) _____

Київ 2026 рік

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – *133 Галузеве машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Гаманчуку Данилу Юрійовичу

1. Тема проєкту «Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина», керівник проєкту Швачко Денис Григорович, Ph.D., доцент, затверджені наказом по університету від «19». 05 2026 р. № 1317-с

2. Термін подання студентом проєкту 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту:

Трубний млин розмірами 4×13,5 м для помелу клінкеру у відкритому циклі за сухим способом виробництва цементу.

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ; опис технологічної схеми виробництва цементу; технічна характеристика млина; опис конструкції, її основних частин та принципу дії; літературно-патентний огляд та обґрунтування вибору модернізації футерівки; параметричні, кінематичні та міцнісні розрахунки і числовий розрахунок у ANSYS; охорона праці; технологія машинобудування; висновки; перелік джерел інформації; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу:

1) технологічна схема виробництва цементу сухим способом (A1); 2) млин трубний з модернізацією футерівки, вигляд загальний (A1); 3) барабан трубного млина (A1); 4) головний привід (A1); 5) футерівка трубного млина, модернізована (A1); 6) плакат з результатами розрахунків у ANSYS.

6. Консультанти розділів проєкту*

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

7. Дата видачі завдання

Календарний план

[illegible]

Студент

Данил ГАМАНЧУК

Керівник проєкту

ДЕНИС ШВАЧКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

До дипломного проєкту

на тему:

«Лінія виробництва цементу з модернізацією трубного млина»

Виконав:

студент ФАПЕ, гр. ЛП-22 _____

Гаманчук Д. Ю.

Керівник: _____

доц., Ph.D. Швачко Д.Г.

Київ 2026

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт бакалавра на тему: «Лінія виробництва цементу з модернізацією трубного млина». Виконавець – студ. групи ЛП-22 Гаманчук Д.Ю., керівник – доцент, Ph.D. – Швачко Д.Г.

Дипломний проєкт (ДП) включає текстову і графічну частини. Текстова частина має 3 розділи і додатки., загальний обсяг – 58с., 19 іл., 4 табл., 18 джерел посилань. Графічна частина містить 6 креслень (загальний обсяг – чотири листа креслень формату А1, і один плакат з результатами розрахунків).

Об'єкт розробки – трубний млин $4 \times 13,5$ м. Мета розробки – модернізація футерівки барабана млина для підвищення її зносостійкості й довговічності та зменшення простоїв обладнання на ремонтно-монтажні роботи.

З цією метою було проведено аналіз літератури та патентів, що дозволило визначити напрямки модернізації та призвело до успішної розробки модернізованої футерівки для барабану млина. Були виконані параметричні та кінематичні розрахунки для базового та модернізованого млина, що підтвердили можливість використання модернізованої футеровки в конструкції базового млина. Розрахунки міцності модернізованого барабана (з використанням 3D-моделі) показують, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності модернізованого барабана збільшився на 1,03 порівняно з базовою моделлю, що дозволило підвищити надійність обладнання. Крім того, у розробленій конструкції покращено умови подрібнення матеріалів, а пружна опора знижує ударні навантаження на корпус барабана, а також концентрації напружень.

Розглянуто технологію виготовлення пристрою, використаного при проектуванні модернізованого барабана.

З урахуванням поліпшення механічних характеристик і підвищення продуктивності конструкцію модернізованого млина можна рекомендувати для цементних заводів.

ТРУБНИЙ МЛИН, БАРАБАН, ФУТЕРІВКА, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ПОМЕЛ КЛІНКЕРУ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ANSYS.

ABSTRACT

Bachelor's thesis on the topic: "Cement production line with modernisation of the tube mill". Author – student of group LP-22, D.Y. Hamanchuk; supervisor – Associate Professor, Ph.D. – D.G. Shvachko.

The thesis comprises a text section and a graphical section. The text section comprises 3 chapters and appendices; total length – 59 pages, 19 figures, 4 tables, 18 references. The graphical section contains 6 drawings (total length – four A1-format drawing sheets, and one poster with calculation results).

The subject of the project is a 4×13.5 m pipe mill. The aim of the project is to modernise the mill drum lining to improve its wear resistance and durability and to reduce equipment downtime for repair and maintenance work.

To this end, an analysis of the literature and patents was carried out, which enabled the identification of modernisation directions and led to the successful development of a modernised lining for the mill drum. Parametric and kinematic calculations were performed for the base and modernised mills, confirming the feasibility of using the modernised lining in the base mill's design. Strength calculations for the modernised drum (using a 3D model) show that the minimum safety factor of the modernised drum has increased by 1.03 compared to the base model, thereby enhancing the equipment's reliability. Furthermore, the developed design improves material grinding conditions, whilst the elastic support reduces impact loads on the drum housing as well as stress concentrations.

The manufacturing process for the device used in the design of the upgraded drum is discussed.

Given the improved mechanical characteristics and increased productivity, the design of the upgraded mill can be recommended for cement plants.

TUBE MILL, DRUM, LINING, MODERNISATION, CLINKER GRINDING, WEAR RESISTANCE, ANSYS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

D – внутрішній діаметр барабана, м;
 i – передаточне число приводу;
 L – робоча довжина барабана, м;
 N – потужність головного приводу, кВт;
 n – робоча частота обертання, об/хв;
 $n_{кр}$ – критична частота обертання, об/хв;
 n_z – запас міцності;
 ρ – насипна густина мелючих тіл, т/м³;
 $[\sigma]$ – допустиме напруження, МПа;
 ψ – коефіцієнт заповнення барабана мелючими тілами;
 ω – кутова швидкість обертання, рад/с.

Скорочення:

ПЗ – пояснювальна записка;

ТС – технологічна схема;

ВЗ – вид загальний;

СК – складальне креслення;

ПР – плакат результатів;

ANSYS – програмний комплекс скінченно-елементного аналізу.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ	10
1.1 Технологічна схема виробництва	10
1.2 Призначення та галузь застосування трубного млина	11
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЛИНА	12
3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ	13
4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД	15
4.1 Огляд варіантів модернізації футерівки трубного млина	15
4.2 Обґрунтування вибору модернізації футерівки	19
5 РОЗРАХУНКИ.....	21
5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки	21
5.2 Розрахунки на міцність і жорсткість	23
5.3 Числові розрахунки напружено-деформованого стану в ANSYS	24
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	29
7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	34
7.1 Технологія виготовлення деталі	35
7.2 Вибір та розрахунок пристосування для певної операції	45
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	48
ДОДАТКИ.....	50

					ЛП22.043111.000-70ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Гаманчук				Лінія виробництва цементу з мо- дернізацією труб- ного млина	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Швачко						8	58
Керівник						КПІ ім.І.Сікорського		
Н. Контр.								
Затверд.	Сокольський							

ВСТУП

Подрібнення – це технологічний процес, під час якого механічним шляхом матеріал переводять у дрібніші фракції. Він знаходить широке застосування в хімічній, гірничодобувній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості.

Відповідно до механізму руйнування розрізняють кілька основних способів дії на матеріал: злам, роздавлювання, стирання, розколювання та удар. У практичних установках ці способи поєднуються, проте конструктивно завжди переважає один із них, що визначається конструкцією подрібнювача.

Темою даного дипломного проєкту є трубний млин із модернізованою футерівкою, що входить до складу лінії з виробництва портландцементу сухим способом. Трубні млини призначені як для грубого, так і для тонкого подрібнення завдяки рухливим мелючим тілам, що вільно переміщаються всередині барабана й руйнують матеріал ударом та перетиранням.

Класифікація трубних млинів базується на таких ознаках: за конструкцією барабана (конічні або циліндричні; довгі або короткі; з внутрішніми перегородками чи без них); за організацією процесу (періодичної чи безперервної дії); за типом футерівки й формою мелючих тіл (кулі, циліндри або стрижні); за типом приводу (периферійний або центральний).

Серед головних переваг трубних млинів – висока та регульована тонкість подрібнення, ефективне перемішування матеріалу всередині барабана й надійність конструкції. До недоліків відносять значне споживання електроенергії, великі габарити й масу, високий пусковий момент та суттєвий рівень шуму й вібрацій.

Метою проєкту є модернізація футерівки млина для підвищення її зносостійкості й довговічності, що дає змогу зменшити кількість і тривалість зупинок обладнання на ремонтно-монтажні роботи.

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

1.1 Технологічна схема виробництва

На рисунку 1.1 наведено технологічну схему виробництва цементу сухим способом, до складу якої входить проєктований трубний млин.

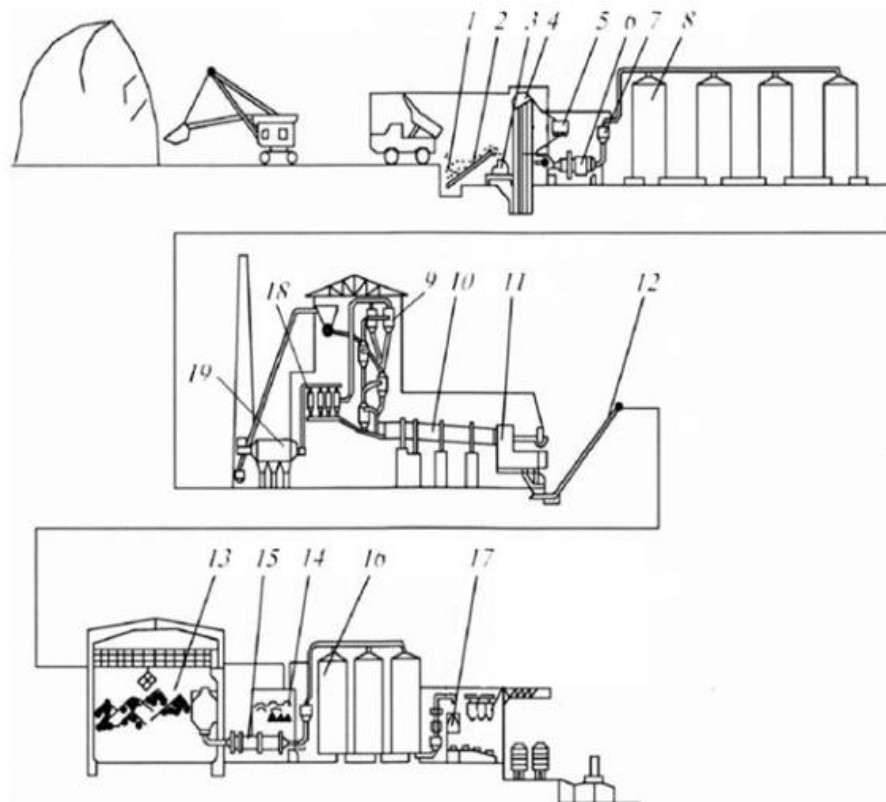


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва цементу сухим способом

Обладнання технологічної схеми (рисунок 1.1) позначено такими позиціями: 1 – кар’єр сировини; 2 – щоква дробарка; 3 – молоткова дробарка; 4 – сушильний барабан; 5 – сировинний млин; 6 – силоси усереднення сировинного борошна; 7 – циклонний теплообмінник (підігрівач); 8 – обертова піч; 9 – колосниковий холодильник; 10 – склад клінкеру; 11 – цементний (трубний) млин 4×13,5 м (проєктований апарат); 12 – силосний склад готового цементу.

Сировину (вапняк, глину та коригувальні добавки) видобувають у кар’єрі й подають на дроблення у щокві та молоткові дробарки. Подрібнену сировину висушують і направляють у сировинний млин, де її розмелюють до тонкого порошку – сировинного борошна. Борошно усереднюють у силосах для забезпечення сталого хімічного складу суміші.

Підготовлену сировинну суміш подають через циклонний теплообмінник (підігрівач) в обертову піч, де за температури близько 1450 °С вона спікається в клінкер. Гарячий клінкер охолоджують у колосниковому холодильнику й направляють на склад клінкеру.

На стадії помелу клінкер разом із гіпсовим каменем і добавками подають у цементний (трубний) млин $4 \times 13,5$ м, де подрібнюють до питомої поверхні готового цементу. Готовий продукт транспортують у силосний склад для зберігання й відвантаження. Позиції обладнання відповідають специфікації на кресленні технологічної схеми.

На відміну від мокрого способу, сухий не потребує витрат теплоти на випаровування води із сировинного шламу, тому є енергетично ефективнішим, хоча й висуває вищі вимоги до знепилювання.

1.2 Призначення та галузь застосування трубного млина

Трубний млин $4 \times 13,5$ м призначений для помелу клінкеру у відкритому циклі за сухим способом виробництва цементу. Трубний млин – це циліндрична дробарка-мішалка для тонкого подрібнення твердих матеріалів у порошок.

Млини цього типу широко використовують у цементній, будівельній, скляній, хімічній, гірничій та інших галузях промисловості. У цементному виробництві трубні млини служать для подрібнення клінкеру й добавок до порошку – це один із найпоширеніших апаратів для помелу цементу та сумішей. Подібні млини застосовують також для подрібнення гіпсу, вапна, вугілля, шлаків та інших матеріалів, коли потрібен високий ступінь дисперсності.

Працюючи у відкритому циклі, млин забезпечує максимальний ступінь подрібнення за один прохід матеріалу, що спрощує технологічну схему помелу.

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЛИНА

Основні технічні характеристики проєктованого трубного млина 4×13,5 м, отримані за результатами параметричних розрахунків (підрозділ 5.1), наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика трубного млина

Параметр	Значення
Тип млина	трубний, відкритий цикл, сухий помел
Матеріал, що подрібнюється	клинкер
Внутрішній діаметр барабана D, м	4,0
Робоча довжина барабана L, м	13,5
Критична частота обертання, об/хв	21,1
Робоча частота обертання, об/хв	15,8
Кутова швидкість, рад/с	1,65
Коефіцієнт заповнення ψ	0,3
Маса мелючих тіл, т	≈ 229
Продуктивність, т/год	≈ 107 *
Потужність головного приводу, кВт	3 200
Електродвигун	СДН-17-50-12, 500 об/хв
Тип приводу	периферійний, однобічний
Тип футерівки	двошарова хвиляста (модернізована)

* Продуктивність уточнюється за завданням на проєкт; за наявності заданої продуктивності лінії приймається вона.

3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

За конструкцією трубний млин являє собою подовжений горизонтальний циліндричний барабан, виготовлений зі сталевих листів зварюванням. Зсередини барабан облицьовано зносостійкими футерувальними плитами (броньфутерівкою) для захисту корпусу від стирання мелючими тілами й матеріалом.

З обох торців барабан закрито литими сталевими кришками з порожнистими цапфами, через які здійснюється завантаження й вивантаження матеріалу. Барабан спирається цапфами на корінні підшипники (опори) і приводиться в обертання від синхронного електродвигуна через редуктор і відкриту зубчасту передачу – зубчастий вінець, закріплений на барабані (рисунок 3.1).

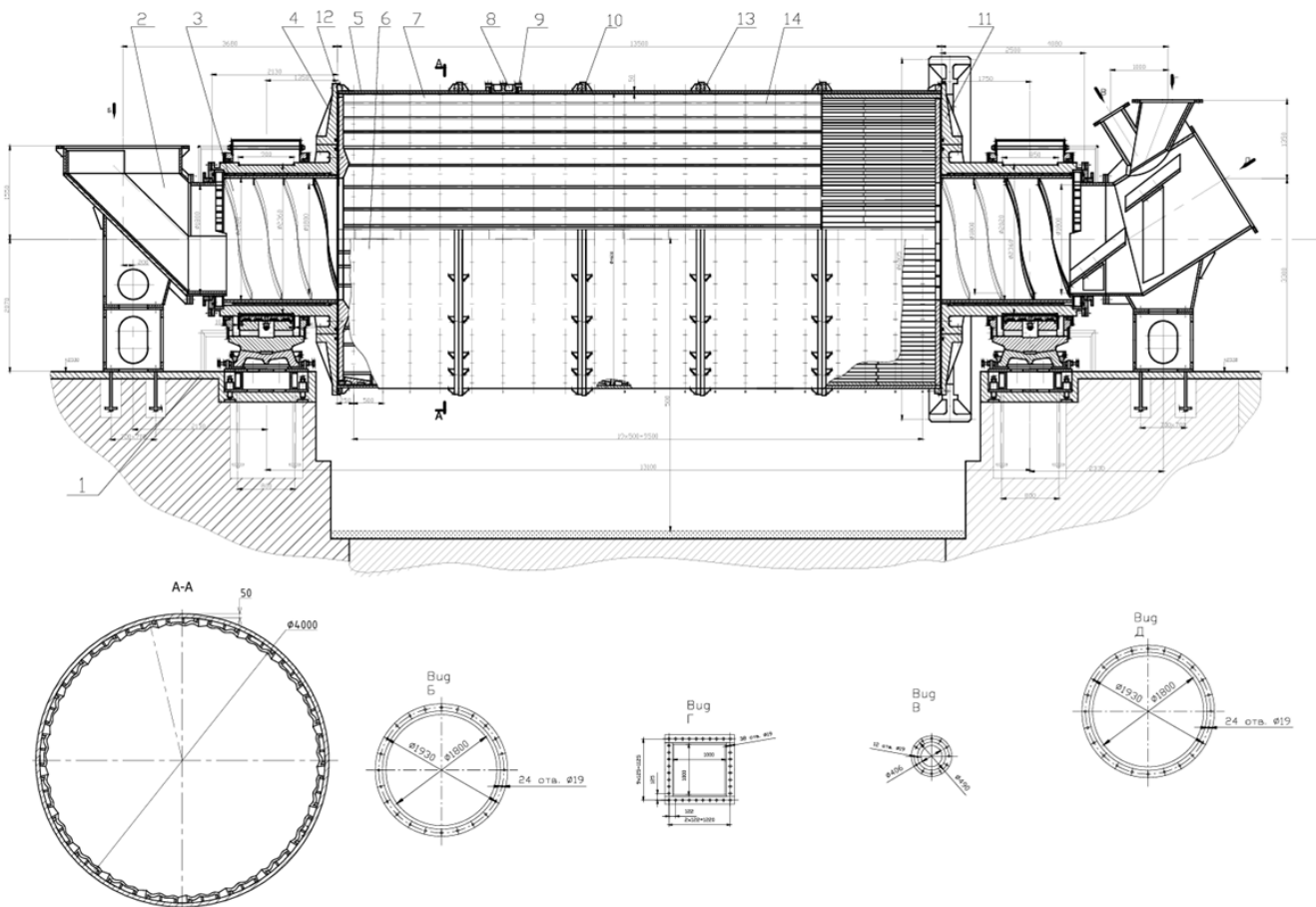


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд трубного млина

Усередині барабана розташовані робочі тіла – сталеві кулі (та/або короткі циліндри), які під час обертання перемішують і дроблять матеріал. Для підвищення ефективності помелу барабан може бути розділений щілинними чи гра-

тчастими перегородками на дві або більше камер, що дозволяє організувати ступінчастий помол: матеріал послідовно переходить з однієї камери в іншу через отвори в перегородках.

Принцип дії млина полягає в подрібненні матеріалу ударом і частковим стиранням вільно падаючих мелючих тіл. Під час обертання барабана мелючі тіла й матеріал піднімаються по внутрішній поверхні футерівки за рахунок сил тертя та інерції; досягнувши певної висоти, вони зриваються зі стінок і вільно падають по траєкторії, близькій до параболи. При падінні та переміщенні по внутрішній поверхні відбуваються ударні й тертєві взаємодії між частинками матеріалу, мелючими тілами й футерівкою, унаслідок чого матеріал дробиться й стирається.

Чим довше матеріал перебуває в млині й чим більше ударів він сприймає, тим дрібнішим є кінцевий продукт, проте це супроводжується зростанням енергоспоживання. Проектований млин працює у відкритому циклі, коли завантажений матеріал проходить через млин один раз, а потрібний ступінь помелу досягається за рахунок частоти обертання та кількості мелючих тіл.

4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД

4.1 Огляд варіантів модернізації футерівки трубного млина

З метою вибору раціонального варіанта модернізації футерівки виконано патентний пошук. Нижче розглянуто основні запатентовані рішення (зображення з патентів наведено на рисунках 4.1–4.5).

Джерело [1] (US4200242A). Описано футерівку барабана млина з прямокутних панелей із похилими робочими поверхнями, що спадають до осі від подаючого до розвантажувального кінця. Панелі встановлено з поздовжнім зсувом, а на передніх краях у напрямку обертання виконано ввігнуті направляючі поверхні. Така геометрія спрямовує великі кулі до торця подачі, поліпшує класифікацію зерен і підвищує ефективність помелу; вирізання ділянок під направляючі поверхні зменшує масу панелей і енергоспоживання приводу (рисунок 4.1)

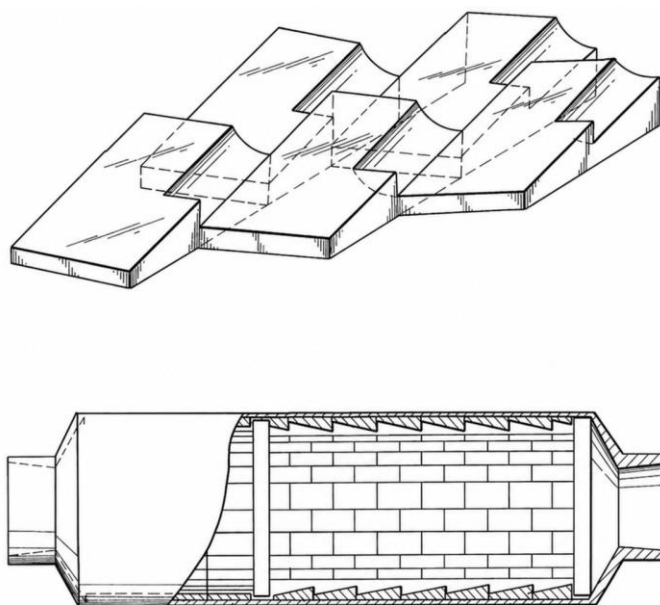


Рисунок 4.1 – Футерівка зі спеціальною формою, що знижує енергоспоживання

Джерело [2] (EP0164328B1). Запропоновано внутрішню футерівку з кільцевими жолобами та рифленими гребенями, що формують хвилястий профіль поверхні. Між кулями й футерівкою утворюється амортизуючий прошарок по-

дрібненої шихти, що забезпечує рівномірне подрібнення й діє як шумопоглинаючий шар, а гребені активізують перемішування. Завдяки цьому поліпшується помел і суттєво знижуються шум та інтенсивність зношування (рисунок 4.2).

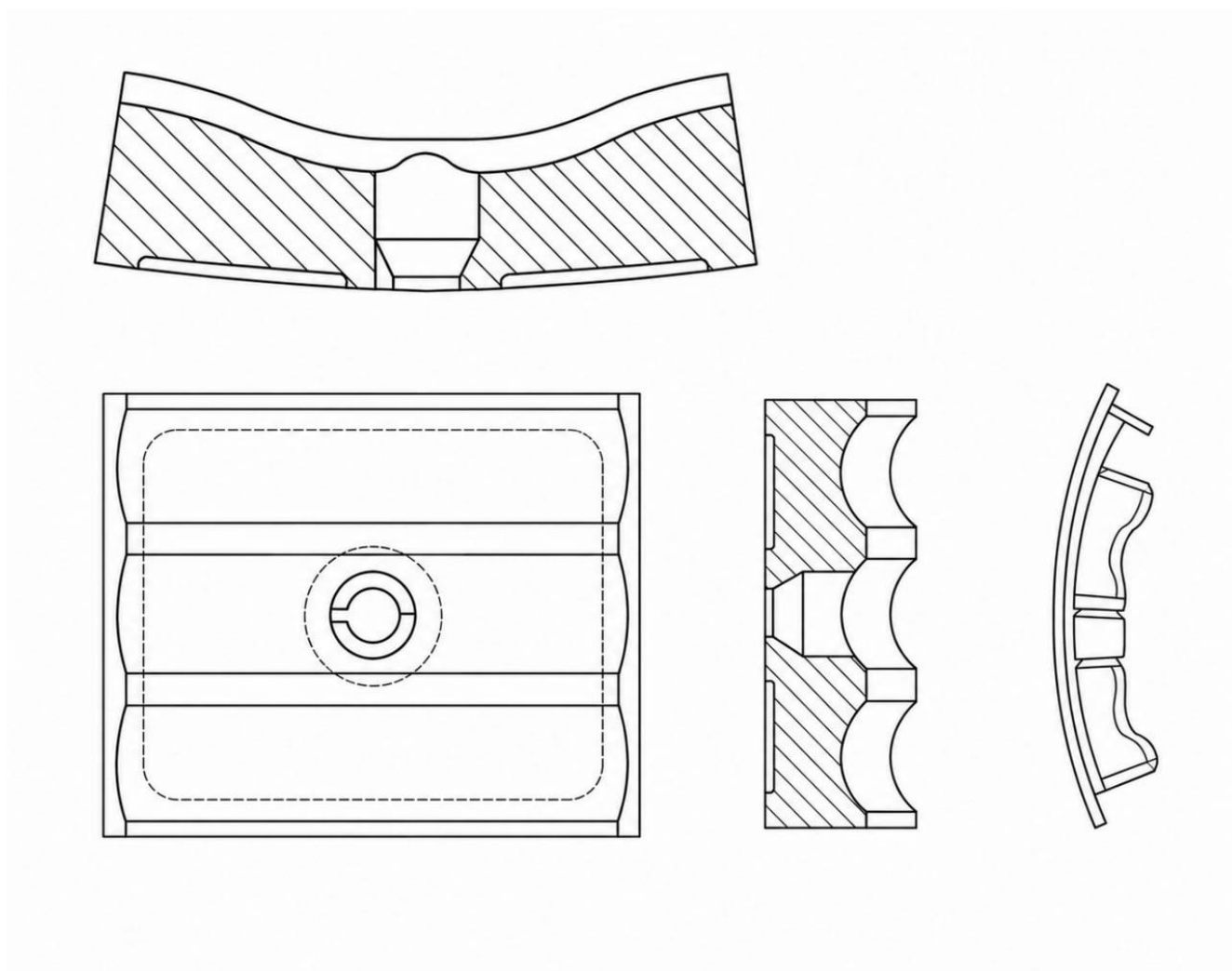


Рисунок 4.2 – Футерівка для кульових млинів з рівномірним зношуванням

Джерело [3] (US4609158A). Описано модульну футерівку з жорстких тримальних сегментів, змінних зносостійких вставок і клинів. Кожен сегмент має поздовжній канал, у який клиноподібно фіксується вставка; поперечні гребені запобігають поздовжньому зміщенню вставки. У разі зносу замінюють лише вставки, не знімаючи всю панель, що скорочує час простою при ремонті (рисунок 4.3).

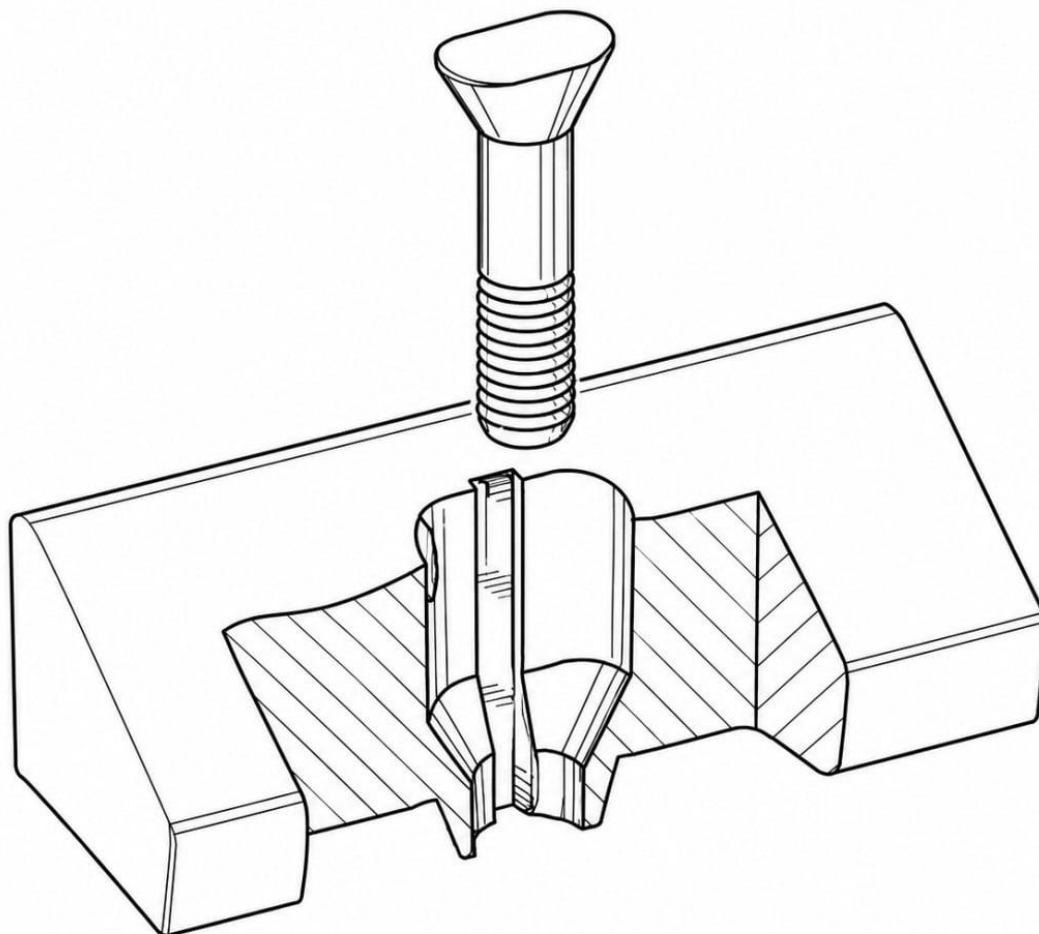


Рисунок 4.3 – Композитна футерівка з тримальних сегментів

Джерело [4] (US20160303574A1). Стосується композитної футерівки з керамічними елементами, що встановлюються без основного болтового кріплення. Чергуються керамічні зносостійкі панелі з хвилястою поверхнею та сталеві самофіксувальні панелі. Маса керамічних панелей становить близько 40 % від металевих, а термін служби у 4–6 разів перевищує ресурс звичайних металевих вставок (рисунок 4.4).

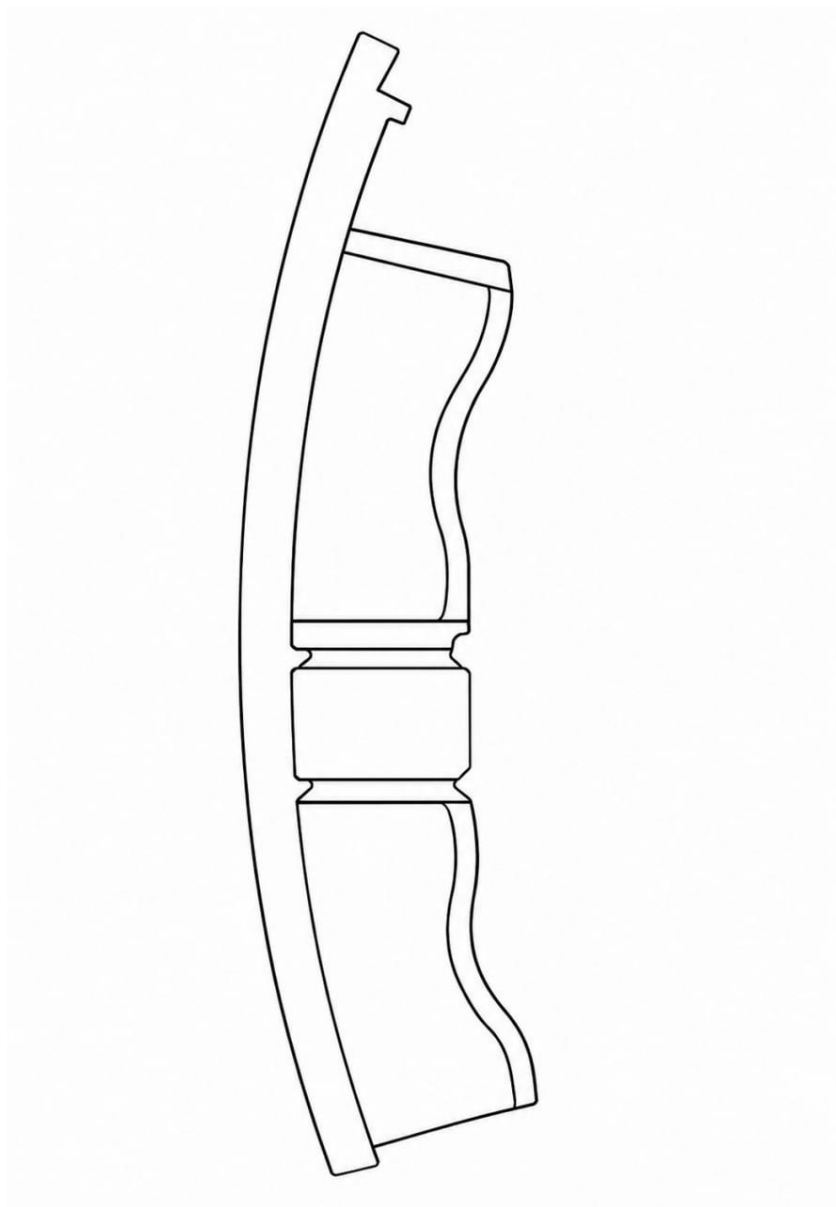


Рисунок 4.4 – Композитна футерівка з керамічними елементами

Джерело [5] (CN101947489A). Описано футерівку з похилими градуйованими ребрами на днищі панелей, виконаними під кутом $95\text{--}120^\circ$ до площини панелі. Похилі ребра спрямовують частину дрібних куль до отвору розвантаження, зменшують «рамповий ефект» на вході й підвищують ефективність подрібнення, майже не піддаючись стиранню (рисунок 4.5).

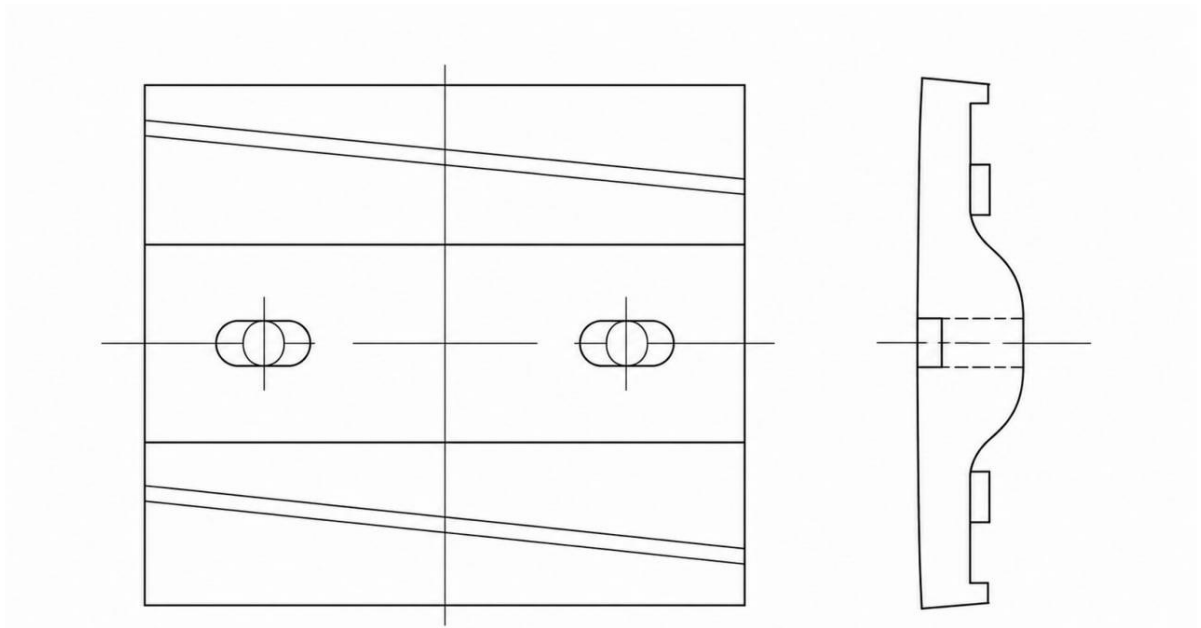


Рисунок 4.5 – Футерівка з градуйованими похилими ребрами

Порівняльний аналіз розглянутих технічних рішень за критеріями зносостійкості, ремонтпридатності, маси та впливу на енергоспоживання й шум наведено в таблиці розглянутих патентів (додаток А). Спільним недоліком металевих рішень (патенти US 4200242 А, EP 0164328 В1, US 4609158 А, CN 101947489 А) залишаються велика маса футерувальних плит, значний рівень шуму та обмежений ресурс. Натомість композитна (полімерно-керамічна) футерівка за патентом US 2016/0303574 А1 забезпечує меншу масу, нижчий рівень шуму та більший термін служби, тому її обрано за прототип для подальшої модернізації.

4.2 Обґрунтування вибору модернізації футерівки

Існуючі конструкції трубних млинів характеризуються спільною проблемою – інтенсивним зношенням бронефутерівки, що зумовлює вимушені зупинки обладнання й усього технологічного процесу. З метою скорочення часу та періодичності ремонтно-монтажних робіт за результатами патентного аналізу обрано варіант модернізації у вигляді двошарової хвилястої футерівки.

Обрана конструкція поєднує жорсткий зносостійкий робочий шар, що безпосередньо контактує з матеріалом, із пружною (демпфуючою) опорною основою.

Робочий шар має хвилястий профіль, що активізує перемішування завантаження й підвищує ефективність помелу, а пружна основа знижує ударні навантаження на корпус барабана й концентрацію напружень. Завдяки цьому збільшується зносостійкість і термін служби футерувальних плит, зменшуються деформації корпусу та підвищується запас міцності (рисунок 4.6). Робочу поверхню футерівки виконано хвилястою радіусом $R1179$ мм; плити встановлюються на внутрішній поверхні барабана діаметром $\varnothing 4000$ мм.



Рисунок 4.6 – Обрана двошарова хвиляста футерувальна плита

Працездатність модернізованої конструкції підтверджено розрахунком напружено-деформованого стану барабана в середовищі ANSYS (підрозділ 5.3), який показав зниження рівня напружень і деформацій порівняно з базовою металевією футерівкою за достатнього запасу міцності.

5 РОЗРАХУНКИ

У цьому розділі наведено параметричні, кінематичні та міцнісні розрахунки трубного млина, а також числовий (скінченно-елементний) аналіз напружено-деформованого стану барабана з базовою та модернізованою футерівкою. Принаймні один із розрахунків виконано із застосуванням мови програмування; лістинг програми та вихідні дані наведено в додатках.

5.1 Параметричні та кінематичні розрахунки

Метою параметричного та кінематичного розрахунку є визначення основних геометричних і режимних параметрів млина: критичної та робочої частоти обертання барабана, кутової швидкості, маси мелючих тіл, продуктивності та потужності головного приводу.

Вихідні дані для розрахунку прийнято за кресленням загального вигляду млина: внутрішній діаметр барабана $D = 4,0$ м, робоча довжина $L = 13,5$ м, коефіцієнт заповнення барабана мелючими тілами $\psi = 0,3$. За результатами розрахунку отримано: критична частота обертання $n_{кр} = 21,1$ об/хв; робоча частота обертання $n = 15,8$ об/хв (приймається $0,75$ від критичної); кутова швидкість $\omega = 1,65$ рад/с; маса завантаження мелючих тіл ≈ 229 т; Стандартний коефіцієнт корисної дії $\approx 0,9$; потужність головного приводу $N = 3200$ кВт, що забезпечується синхронним електродвигуном СДН-17-50-12. Підсумкові значення зведено в таблиці 2.1.

Критична частота обертання барабана, за якої мелючі тіла починають обертатися разом із барабаном (центрифугування), визначається залежно від внутрішнього діаметра барабана:

$$n_{кр} = 42,3 / \sqrt{D} = 42,3 / \sqrt{4,0} \approx 21,1 \text{ об/хв,}$$

де $D = 4,0$ м – внутрішній діаметр барабана.

Робочу частоту обертання приймають у межах $(0,70 \dots 0,80)$ від критичної; для проєктованого млина прийнято коефіцієнт $0,75$:

$$n = 0,75 \cdot n_{кр} = 0,75 \cdot 21,1 \approx 15,8 \text{ об/хв.}$$

Відповідна кутова швидкість обертання барабана:

$$\omega = \pi \cdot n / 30 = 3,14 \cdot 15,8 / 30 \approx 1,65 \text{ рад/с.}$$

Внутрішній об'єм барабана:

$$V = \pi \cdot D^2 \cdot L / 4 = 3,14 \cdot 4,0^2 \cdot 13,5 / 4 \approx 169,6 \text{ м}^3.$$

Масу завантаження мелючих тіл визначають через коефіцієнт заповнення барабана $\psi = 0,3$ та насипну густину сталевих мелючих тіл $\rho = 4,5 \text{ т/м}^3$:

$$G = \psi \cdot V \cdot \rho = 0,3 \cdot 169,6 \cdot 4,5 \approx 229 \text{ т.}$$

Необхідна швидкість обертання млина від головного двигуна: 15,8 об/хв

Необхідна швидкість обертання млина від допоміжного двигуна: 0,19 об/хв (приймається як 1,2% від робочої швидкості)

Крутний момент на осі млина від головного двигуна: 2022 кН/м

Крутний момент на осі млина від допоміжного двигуна: 2831 кН/м

Коефіцієнт корисної дії відкритої зубчастої передачі: 0,96

Коефіцієнт корисної дії головного редуктора: 0,98

Коефіцієнт корисної дії допоміжного приводу: 0,94

Підсумковий коефіцієнт корисної дії головного приводу: 0,941

Підсумковий коефіцієнт корисної дії допоміжного приводу: 0,902

Підсумковий крутий момент на осі млина головного приводу: 2148,8 кН/м

Підсумковий крутий момент на осі млина допоміжного приводу:

3138,6 кН/м

Розрахунок потужності двигуна:

$$N = \frac{0,45 \cdot \pi \cdot g \cdot D_0 \cdot m_{\text{мол}}}{\eta_y} = \frac{0,45 \cdot 3,1416 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 229000 \cdot 0,2633}{0,9} \\ = 3716980 \text{ Вт}$$

Розрахунок продуктивності:

$$P_p = 6,45 \cdot V \cdot \sqrt{D} \cdot \left(\frac{m_{\text{мол}}}{V} \right)^{0,08} \cdot q \cdot K \\ = 6,45 \cdot 169,65 \cdot \sqrt{4} \cdot \left(\frac{229}{169,65} \right)^{0,08} \cdot 0,04 \cdot 0,65 = 58,3 \text{ т/год}$$

За розрахованим значенням потужності двигуна необхідно здійснити вибір підходящої моделі, згідно з отриманими даними можна використати синхронний трифазний двигун СТД-5000-2Р УХЛ4. Підсумкові значення параметрів зведено в таблиці 2.1.

Один із наведених розрахунків реалізовано у вигляді програми (її лістинг, вихідні дані та результати наведено в Додатку В), що дає змогу швидко перераховувати параметри млина за зміни вихідних даних.

5.2 Розрахунки на міцність і жорсткість

У підрозділі виконано перевіірочні розрахунки на міцність і жорсткість основних елементів конструкції млина: барабана, торцевої кришки та її болтового з'єднання, цапфи. Для кожного елемента визначено діючі напруження та порівняно їх із допустимими, обчислено коефіцієнти запасу міцності.

Перевіірочні розрахунки на міцність виконано для основних навантажених елементів конструкції: корпусу (барабана), болтового з'єднання торцевої кришки та цапфи. Розрахункові навантаження визначено за масою завантаження мелючих тіл і власною вагою обертових частин, отриманими в підрозділі 5.1.

==

Вихідні дані. Маса завантаження мелючих тіл $G = 229$ т; орієнтовна маса корпусу з кришками ≈ 67 т, маса футерівки ≈ 60 т. Сумарна сила ваги, що діє на барабан як на балку на двох опорах (цапфах), становить:

$$W = (G + m_k + m_f) \cdot g = (229 + 67 + 60) \cdot 9,81 \approx 3492 \text{ кН.}$$

Розрахунок корпусу (барабана). Барабан розглядаємо як балку на двох опорах прольотом $L = 13,5$ м під дією рівномірно розподіленого навантаження від сили W . Максимальний згинальний момент:

$$M = W \cdot L / 8 = 3492 \cdot 13,5 / 8 \approx 5893 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Корпус – тонкостінна труба із зовнішнім діаметром $D_o \approx 4,1$ м (внутрішній $\varnothing 4000$ мм, товщина стінки $t = 50$ мм). Осьовий момент опору перерізу:

$$W_x = \pi(D_o^4 - D_v^4) / (32 \cdot D_o) \approx 0,637 \text{ м}^3.$$

Нормальне напруження згину в корпусі:

$$\sigma = M / W_x = 5893 \cdot 10^2 / 0,637 \approx 9,3 \text{ МПа.}$$

Для матеріалу корпусу (сталь 09Г2С, $[\sigma] = 170 \text{ МПа}$) умова міцності виконується: $\sigma = 9,3 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 170 \text{ МПа}$ із значним запасом.

Розрахунок болтового з'єднання торцевої кришки. Кришку прикріплено до фланця барабана 64 болтами (32 призонні в отворах $\pi 70\text{H}7$ і 32 в отворах $\pi 67$). Опорна реакція, що передається через одну цапфу та кришку, $R = W/2 \approx 1746 \text{ кН}$ сприймається болтами на зріз. Зусилля на один болт:

$$Q = R / z = 1746 / 64 \approx 27,3 \text{ кН.}$$

Напруження зрізу в болті меншого діаметра ($d = 67 \text{ мм}$, площа $A = \pi d^2/4 \approx 3526 \text{ мм}^2$):

$$\tau = Q / A = 27,3 \cdot 10^3 / 3526 \approx 7,7 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження зрізу для болтів класу міцності 5.8 $[\tau] \approx 110 \text{ МПа}$; умова $\tau = 7,7 \text{ МПа} \leq [\tau]$ виконується. Призонні болти додатково сприймають поперечне навантаження, що підвищує надійність з'єднання.

Розрахунок цапфи. Цапфу розглядаємо як консольний вал, навантажений опорною реакцією $R = 1746 \text{ кН}$ з плечем $a \approx 0,5 \text{ м}$ від середини підшипника до площини кришки. Згинальний момент:

$$M_{\text{ц}} = R \cdot a = 1746 \cdot 0,5 \approx 873 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Для цапфи діаметром $d_{\text{ц}} = 1,0 \text{ м}$ момент опору $W_{\text{ц}} = \pi d_{\text{ц}}^3/32 \approx 0,098 \text{ м}^3$; напруження згину:

$$\sigma_{\text{ц}} = M_{\text{ц}} / W_{\text{ц}} = 873 \cdot 10^2 / 0,098 \approx 8,9 \text{ МПа.}$$

Для матеріалу цапфи (сталеве литво 35Л, $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$) умова міцності $\sigma_{\text{ц}} \leq [\sigma]$ виконується із значним запасом.

5.3 Числові розрахунки напружено-деформованого стану в ANSYS

Розрахунок напружено-деформованого стану барабана з футерівкою виконано в програмному комплексі ANSYS (Static Structural із попереднім тепловим розрахунком Steady-State Thermal, версія R19.2). Розв'язано зв'язану задачу: спершу визначено температурне поле барабана, після чого температури передано в структурний розрахунок як теплове навантаження. Обидва варіанти

– з базовою металевою футерівкою (Б) та з модернізованою двошаровою хвилястою футерівкою (А) – розраховано за однакових граничних умов, що дає змогу коректно порівняти результати.

Геометричну модель і скінченно-елементну сітку барабана наведено на рисунку 5.1. Сітку згенеровано переважно з гексаедричних елементів; загальна кількість скінченних елементів моделі становить 10208.

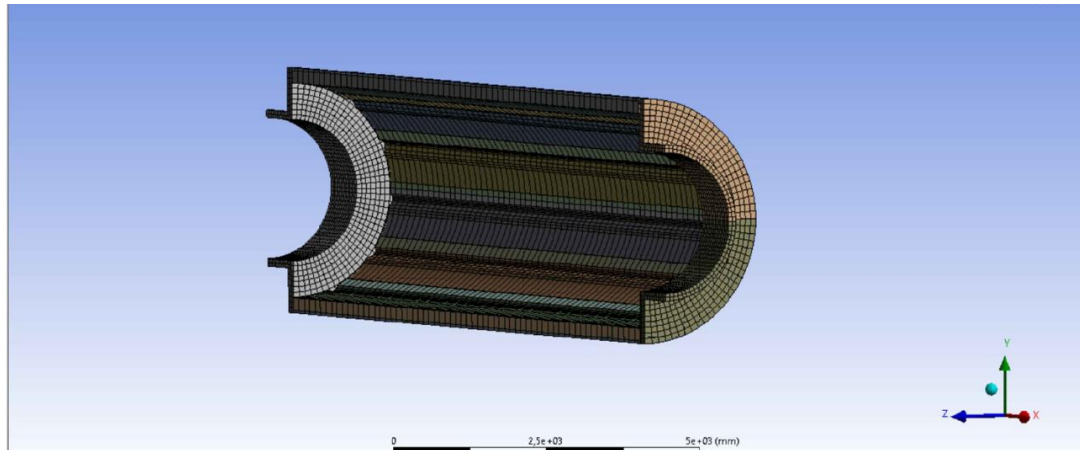


Рисунок 5.1 – Розрахункова сітка та геометрія моделі барабана

Схему теплового навантаження моделі показано на рисунку 5.2. Теплообмін задано умовами конвекції на внутрішній і зовнішній поверхнях барабана з відповідними коефіцієнтами тепловіддачі та температурами середовища, що відповідають умовам помелу клінкеру.

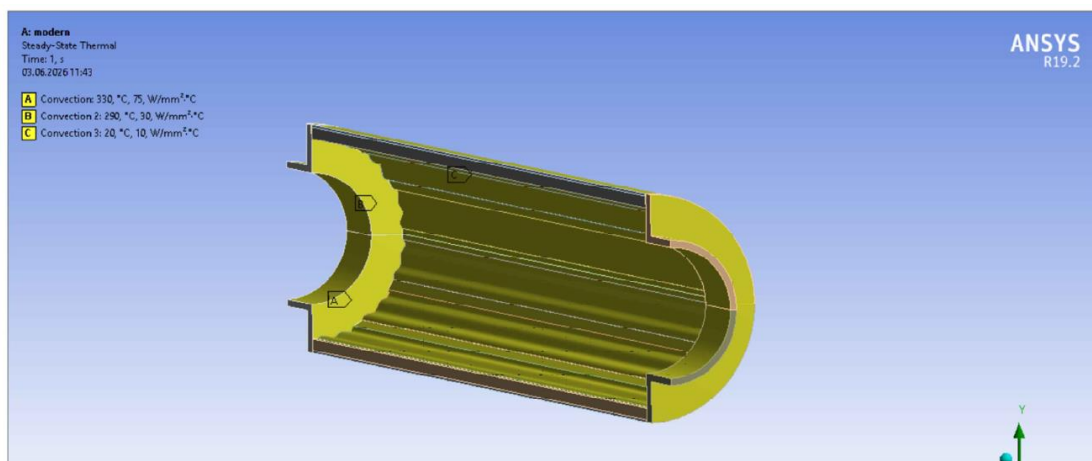


Рисунок 5.2 – Схема теплового навантаження моделі млина

Схему закріплення та силового навантаження наведено на рисунку 5.3. У розрахунку враховано: власну вагу конструкції (Standard Earth Gravity), обертання барабана (Rotational Velocity), гідростатичний тиск завантаження мелю-

чих тіл і матеріалу на футерівку (Hydrostatic Pressure), а також закріплення барабана в опорах (Cylindrical Support) із обмеженням переміщень у відповідних напрямках.

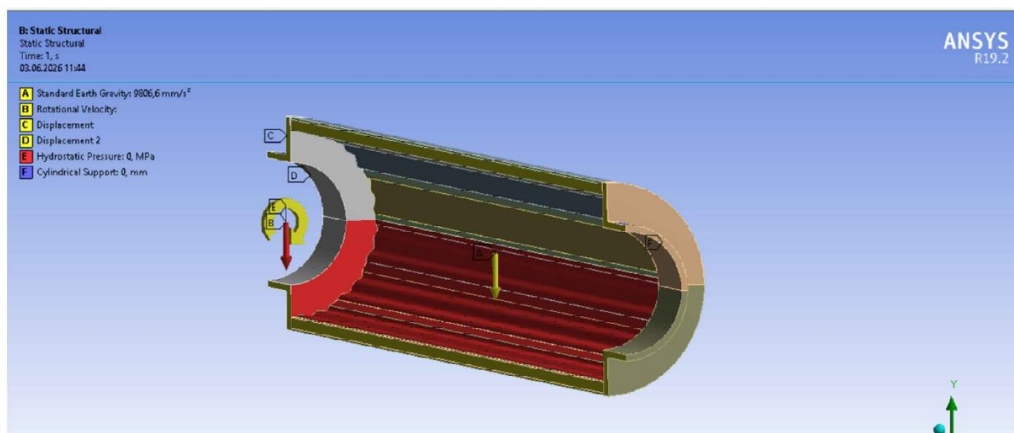


Рисунок 5.3 – Схема закріплення та силового навантаження моделі млина

Результатом теплового розрахунку є поле температур барабана (рисунок 5.4) та поле густини теплового потоку (рисунок 5.5). Максимальна температура моделі становить близько 429,5 °C, мінімальна – близько -21,1 °C; максимальна густина теплового потоку зменшується з 0,688 Вт/мм² для базової конструкції до 0,528 Вт/мм² для модернізованої. Розподіл температур використано як вихідні дані для структурного розрахунку.

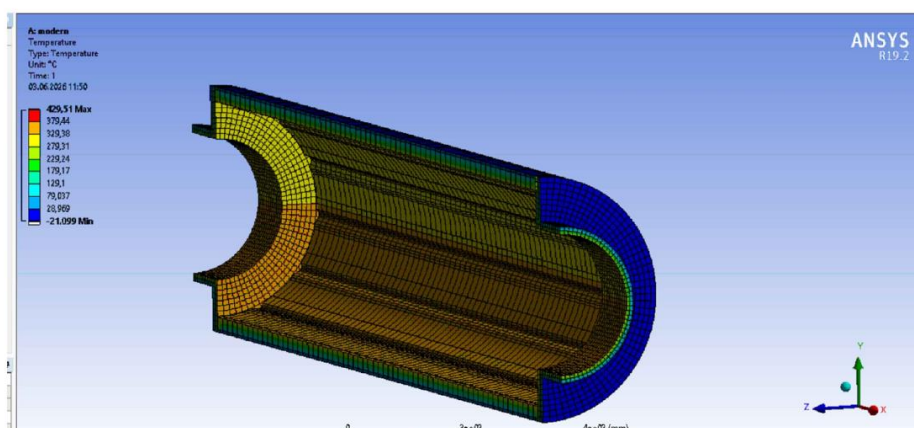


Рисунок 5.4 – Поле температур млина

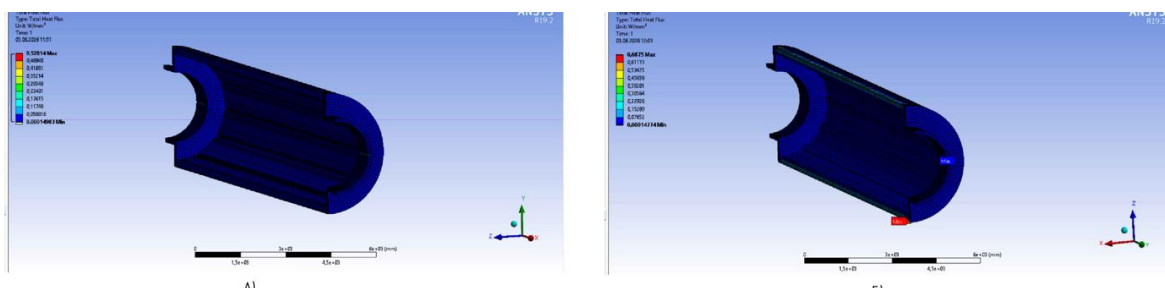


Рисунок 5.5 – Поле густини теплового потоку (А – модернізована, Б – базова конструкція)

Результати структурного розрахунку – поля результуючих переміщень, еквівалентних напружень за Мізесом і запасу міцності – для обох конструкцій наведено на рисунках 5.6–5.8. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом знижуються з 566,3 МПа (базова) до 457,2 МПа (модернізована), а максимальні результуючі переміщення зростають з 4,53 мм до 8,22 мм, що зумовлено наявністю пружного демпфуючого шару футерівки.

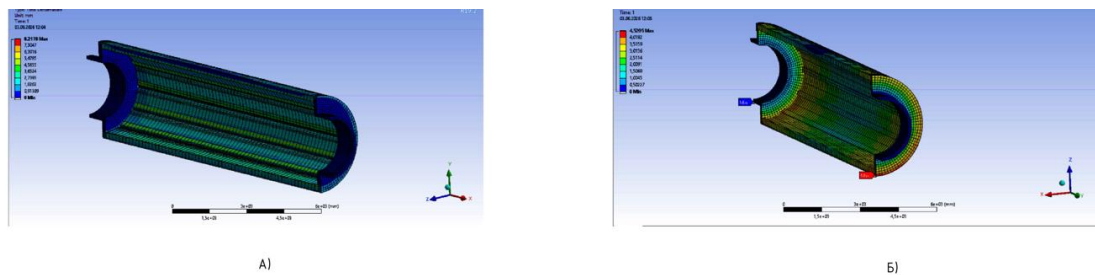


Рисунок 5.6 – Поле результуючих переміщень (А – модернізована, Б – базова конструкція)

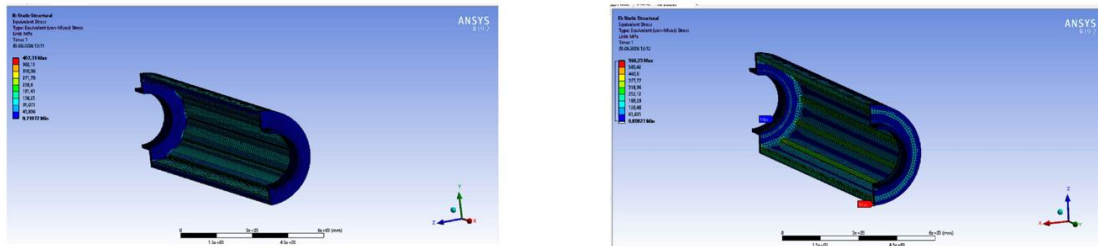


Рисунок 5.7 – Еквівалентні напруження за Мізесом (А – модернізована, Б – базова конструкція)

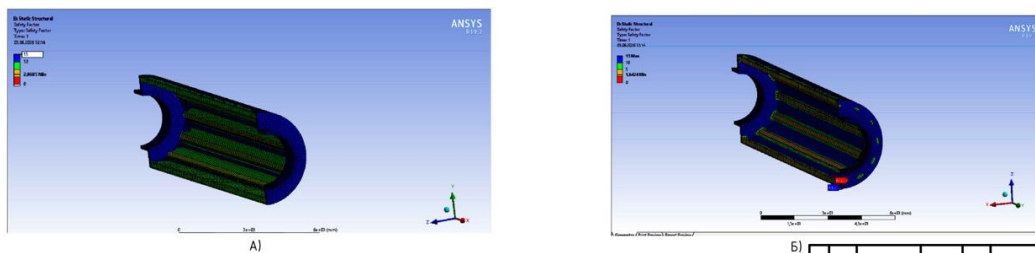


Рисунок 5.8 – Поле запасу міцності млина (А – модернізована, Б – базова конструкція)

Як видно з поля запасу міцності, мінімальний коефіцієнт запасу міцності зростає з 1,64 для базової конструкції до 2,67 для модернізованої. Порівняння кількісних результатів двох варіантів зведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння результатів розрахунку базової та модернізованої конструкцій

Показник	Базова (Б)	Модернізована (А)
Максимальна густина теплового потоку, Вт/мм ²	0,688	0,528
Максимальні результуючі переміщення, мм	4,53	8,22
Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом, МПа	566,3	457,2
Мінімальний запас міцності	1,64	2,67

Порівняння результатів свідчить, що застосування модернізованої двошарової хвилястої футерівки знижує рівень максимальних еквівалентних напружень у корпусі барабана (з 566,3 до 457,2 МПа) та підвищує мінімальний запас міцності (з 1,64 до 2,67). Дещо більші пружні переміщення модернізованої конструкції зумовлені демпфуючим шаром, який перерозподіляє навантаження й знижує концентрацію напружень. Це підтверджує працездатність модернізованої конструкції та обґрунтовує доцільність її впровадження. Результати числового розрахунку винесено на плакат графічної частини.

Таким чином, номінальні напруження в основних елементах конструкції значно нижчі за допустимі, а отже умови міцності виконуються. Локальні максимальні напруження в зонах концентрації (галтелях, отворах, місцях закріплення) є вищими за номінальні, де мінімальний запас міцності модернізованої конструкції становить 2,67, що підтверджує достатню міцність і жорсткість конструкції.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Згідно з темою дипломного проєкту «Лінія з виробництва портландцементу з модернізацією трубного млина».

Охорона праці охоплює правові, організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи, спрямовані на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі праці, запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням, пожежам і аваріям. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» обладнання, що проєктується, повинно забезпечувати безпечні та нешкідливі умови його експлуатації обслуговним персоналом.

Проектований трубний млин $4 \times 13,5$ м установлюється в цеху помелу цементного заводу площею 100 м^2 . Керування й контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор з пульта, розташованого у виробничому приміщенні цеху. Нижче проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі чинники, що супроводжують експлуатацію млина, і наведено заходи щодо їх усунення або зниження до допустимого рівня.

6.1 Виявлення та аналіз шкідливих і небезпечних факторів

Під час роботи й обслуговування трубного млина на персонал діють такі небезпечні та шкідливі виробничі чинники: рухомі та обертові частини обладнання (барабан, зубчастий вінець, привід); підвищений рівень шуму й вібрації; підвищена запиленість повітря робочої зони цементним і клінкерним пилом; небезпека ураження електричним струмом; недостатня освітленість робочої зони; пожежна небезпека. Кожен із чинників і відповідні заходи безпеки розглянуто нижче.

6.2 Повітря робочої зони

Параметри мікроклімату робочої зони (температура, відносна вологість і швидкість руху повітря) нормуються згідно з ДСН 3.3.6.042-99. Роботу оператора віднесено до категорії легких фізичних робіт (Ia), під час яких енерговитрати становлять 105-140 Вт (90-120 ккал/год.). У холодний період року передбачено опалення приміщення, у теплий — припливно-витяжну вентиляцію, що

підтримує оптимальні параметри: температуру 22–24 °С, відносну вологість 40–60 % і швидкість руху повітря до 0,2 м/с.

Основним шкідливим чинником є запиленість повітря цементним пилом, гранично допустима концентрація якого становить 6 мг/м³ згідно з Наказом № 52 Міністерства охорони здоров'я від 14.01.2020 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць». Для зниження запиленості технологічне обладнання герметизують, а у вузлах завантаження й вивантаження влаштовують місцеву аспірацію з очищенням повітря в циклонах і рукавних фільтрах; у цеху діє також загальнообмінна вентиляція. Завдяки цим заходам фактична концентрація пилу не перевищує допустимої.

6.3 Виробничий шум і вібрація

Робота млина супроводжується підвищеним рівнем шуму й вібрації, джерелами яких є удари мелючих тіл, зубчаста передача та електродвигун. Допустимий рівень звуку на робочих місцях становить 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99), параметри вібрації нормуються за ДСН 3.3.6.039-99. Для зниження шуму й вібрації застосовують: установлення млина на віброізовьованому фундаменті; звукоізоляцію та звукопоглинання; своєчасне змащування й балансування обертових вузлів; дистанційне керування з ізовьованого пульта оператора; засоби індивідуального захисту органів слуху (протишумові навушники, наприклад модель Sizam Optimum III 2750 SNR, що знижує шум на 27 дБ або Delta Plus Interlagos INTERLIGHT для зниження шуму на 26 дБ; також можна використовувати вкладки, як наприклад Compass E-1002 на 29 дБ чи Trident 1100 SNR на 37 дБ).

6.4 Електробезпека

Виробниче приміщення, де встановлено млин і пульт керування, згідно з ПУЕ належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Живлення електропривода (двигун СДН-17-50-12) здійснюється від трифазної мережі напругою 380/220В частотою 50 Гц. Причинами ураження

можуть бути дотик до струмовідвідних частин, пробій ізоляції на корпус та помилкове ввімкнення обладнання.

Для захисту персоналу передбачено: захисне заземлення (занулення) корпусів електрообладнання згідно з ПУЕ; ізоляцію та огороження струмовідвідних частин; блокування, що знеструмлюють привід при відкритті огорож; автоматичне вимкнення пошкодженої ділянки; застосування запобіжних і сигналізаційних пристроїв. Опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом.

Згідно ДСТУ 7239:2011 «Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту», як засоби індивідуального захисту під час технічного обслуговування та ремонтних робіт на електроустановках персонал зобов'язаний використовувати діелектричні рукавиці (клас 00 або 0, до 500 В), захисні окуляри, монтажний інструмент з ізольованими рукоятками (клас 1000 В). Спеціальне взуття також має використовуватись згідно з ДСТУ EN 50321-1:2022 «Засоби індивідуального захисту ніг. Робота під напругою. Взуття захисне від електричного струму. Частина 1. Ізоляційне взуття та галоші (EN 50321-1:2018, IDT)».

На підлозі перед розподільчим щитом та пультом керування має бути постелений діелектричний гумовий килимок.

6.5 Освітлення

Для безпечного виконання робіт і обслуговування млина передбачено природне (бічне, крізь вікна) та штучне освітлення. Нормована освітленість робочої зони за ДБН В.2.5-28:2018 для робіт середньої точності становить не менше

200 лк. Штучне освітлення виконують світильниками LED, що застосовуються у виробничих приміщеннях зі стелями вище 6 м (наприклад, світильник для високих стель Highbay Philips BY235P G2 LED HB 200W/NW PSU WB IP65 чи промисловий світильник Highbay Philips BY235P G2 LED HB 200W/NW PSU NB IP65); передбачено також аварійне освітлення для безпечної евакуації та продовження роботи в разі вимкнення основного. Клас зорових робіт у такому разі є допустимим згідно з Наказом № 248 Міністерства охорони здоров'я від

08.04.2014 Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу».

6.6 Пожежна безпека

Оскільки цементний пил у певних концентраціях є горючим, в повітрі робочої зони можливе утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» приміщення цеху за віднесено до категорії Б (вибухопожежонебезпечне), з класом пожежі Е (електроустановки під напругою) та А (тверді горючі речовини).

Пожежну безпеку забезпечують дотриманням вимог ПУЕ до електрообладнання; улаштуванням блискавкозахисту; наявністю первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники, пожежні крани) та автоматичної пожежної сигналізації; утриманням вільними евакуаційних шляхів і виходів; проведенням інструктажів з пожежної безпеки.

Згідно ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» обрано порошкові вогнегасники марок ВП-5 та ВП-9 (для гасіння пилу та електроустановок під напругою до 1 000 В) у кількості не менше двох одиниць; вуглекислотні вогнегасники ВВК-5 або ВВК-8 для гасіння електрообладнання без його пошкодження. Згідно загальних норм НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» їхнє розміщення має бути на відстані не більше 20 м від можливого осередку займання. Максимально допустима відстань від вогнегасника до можливого осередку займання для приміщень категорії Б становить 30 м. Загальна кількість вогнегасників на площу 100 м² становить 2 ВП-5 (зарядом 5 кг) і 1 ВВК-5.

Пожежний інвентар має включати ящики з піском об'ємом 0,5 м³; пожежні відра; азбестові покривала; совкові лопати; пожежні крани з рукавами.

На видному місці має бути розміщений план пожежної евакуації, а розподільчий щит оснащений автоматичним вимикачем із можливістю дистанційного керування від сигналу системи виявлення загоряння.

Дотримання наведених заходів забезпечує безпечні та нешкідливі умови праці обслуговуючого персоналу.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Призначення та опис виробу

Напівмуфта є деталлю, яка слугує частиною приводу млина за допомогою з'єднання двигуна та редуктора між собою. Її ескіз зображено на рисунку 7.1.

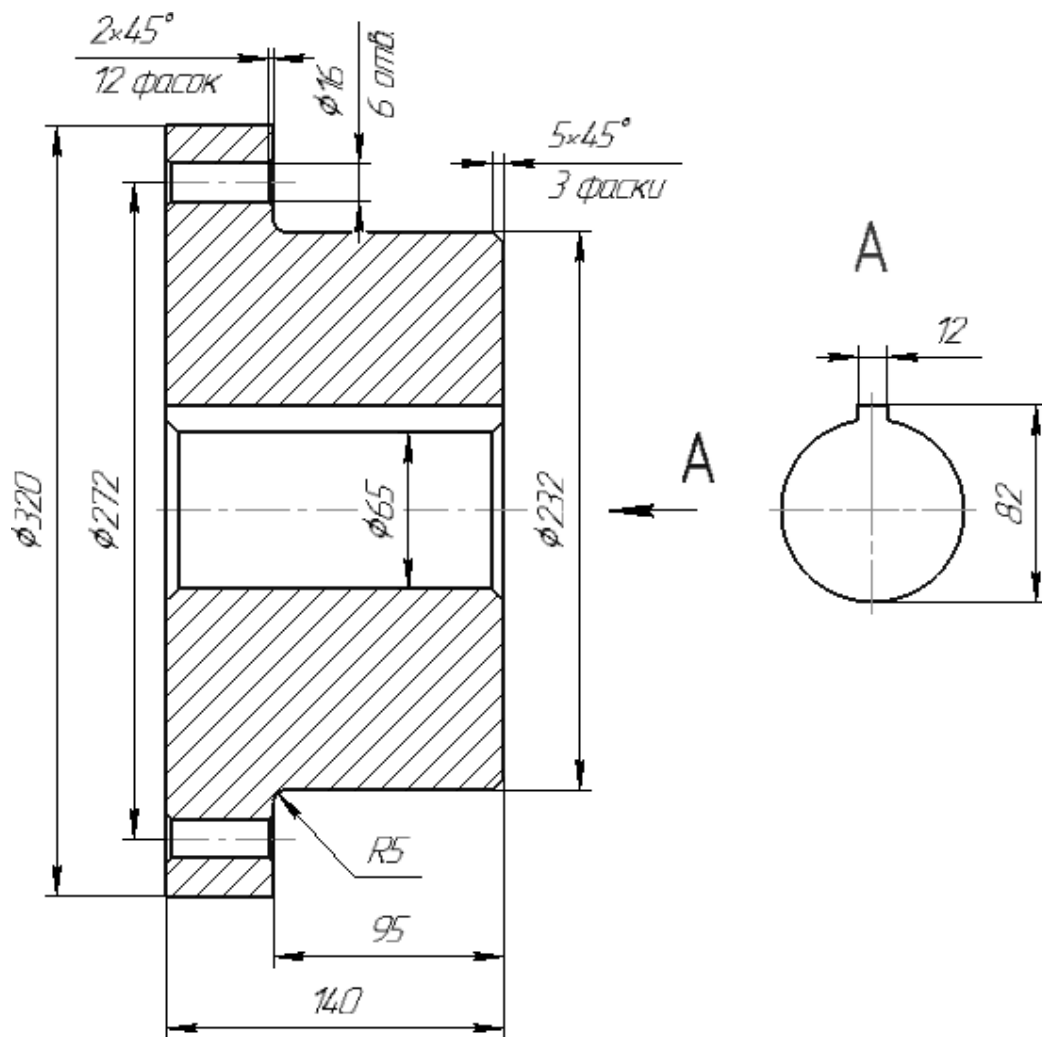


Рисунок 7.1 – Ескізне креслення напівмуфти

Використаний матеріал: сірий чавун СЧ 15 (ГОСТ 1412–85).

Деталь можна описати як просту геометричну конструкцію, за рахунок чого у виготовленні є дуже простою, а також це спрощує її монтаж і демонтаж. Сама деталь коригується під час процесу вирізання. Її заготовка зображена на рисунку 7.2.

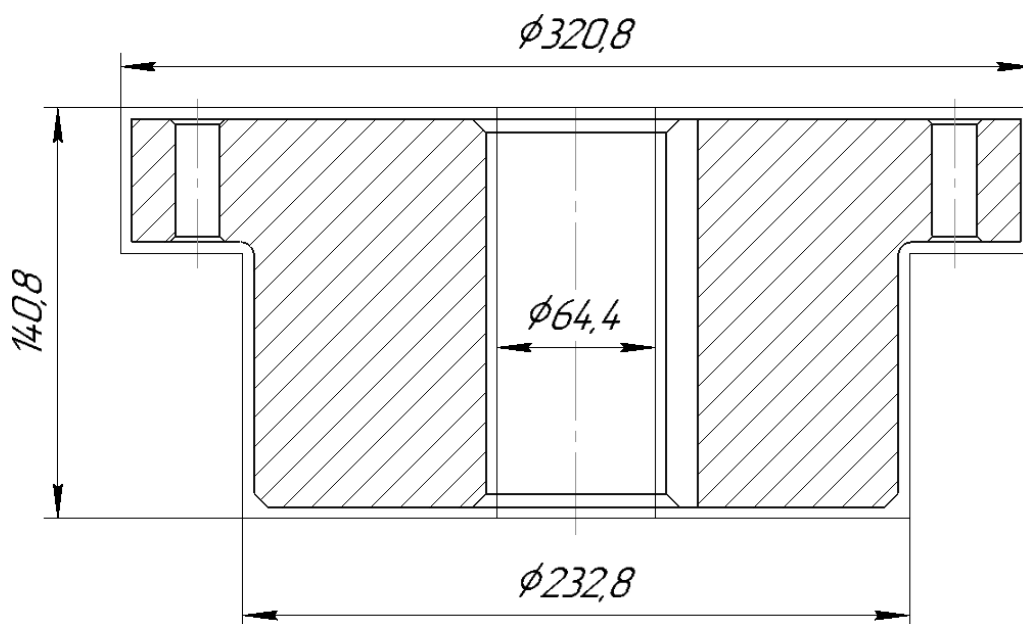


Рисунок 7.2 – Креслення заготовки напівмуфти

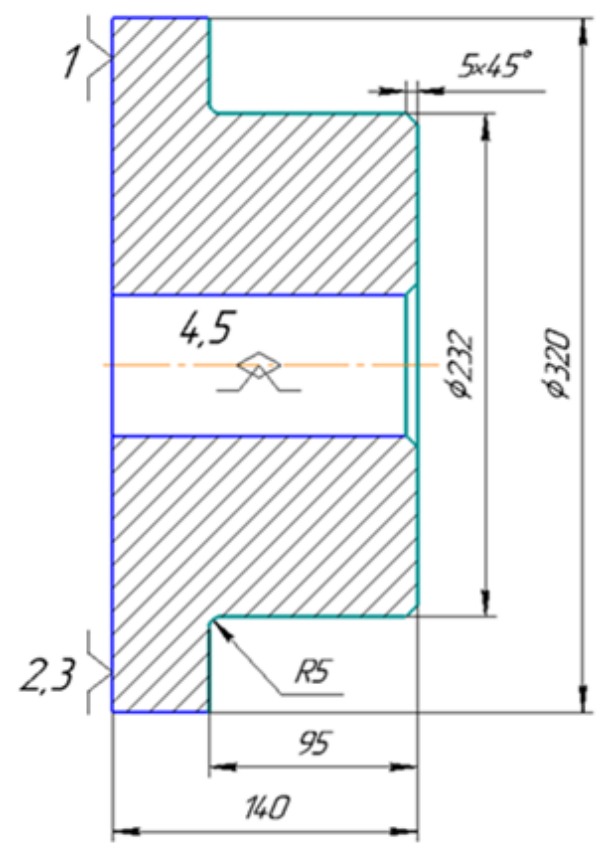
7.1 Виготовлення виробу та технологічний процес

Процес виготовлення напівмуфти включає в себе протяжні, токарні, та сведильні етапи. Цей опис знаходиться в кодах ОК, МК, КЕ.

[illegible]

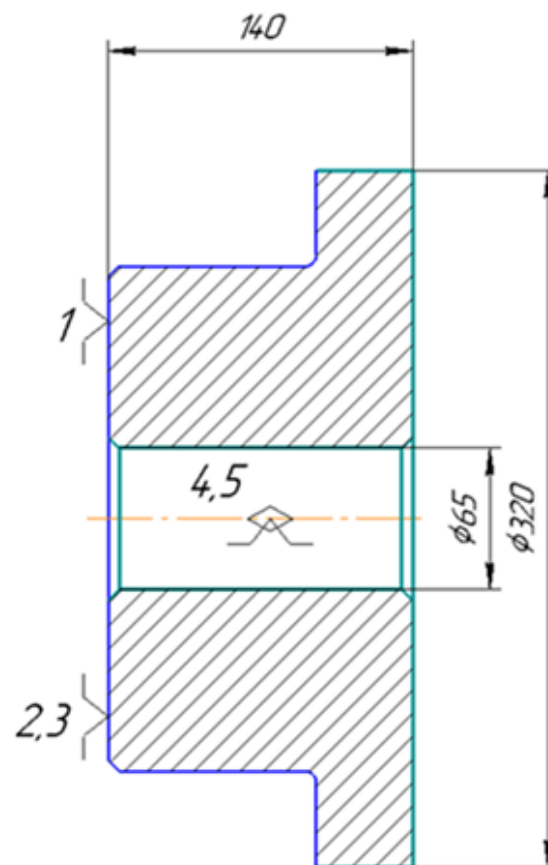
ГОСТ 3.555-84 Форма 7

Дубл.										
Взамін.										
Підпис								Зм	Ар	Недок.
								Підпис	Дата	
Розробив	Гаманчук				НТУУ "КПІ", ФАПІЕ				005	
Перевірів	Борщук									
Н. контр.					НАНАПІВМУФТА				Н	



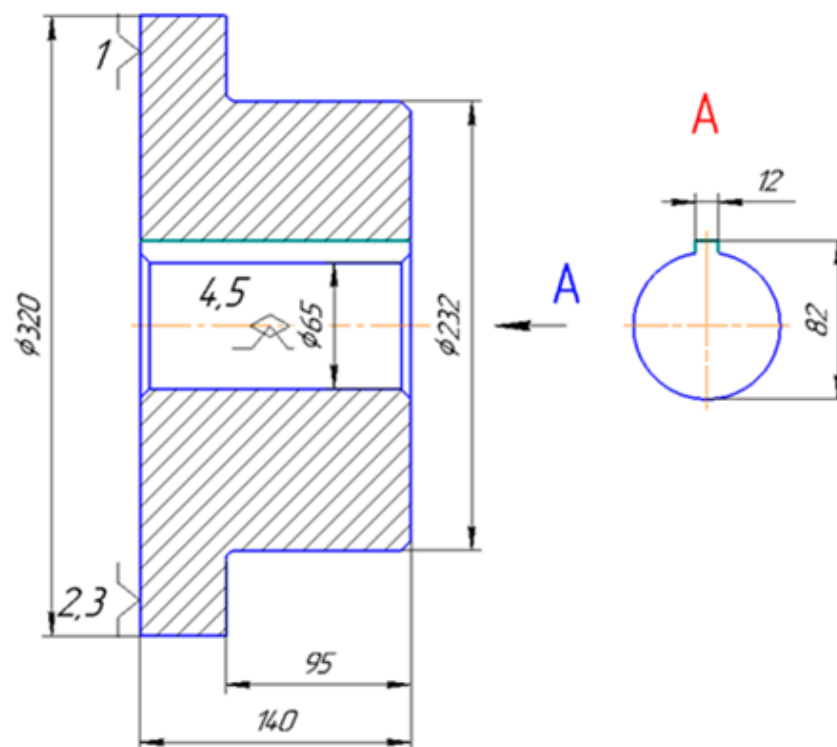
ГОСТ 3.555-84 Форма 7

Дубл.										
Взамін.										
Підпис								Зм	Ар	Недок.
								Підпис	Дата	
Розробив	Гаманчук			НТУУ "КПІ", ФАПІЕ				010		
Перевірів	Борщук									
Н. контр.				НАНАПІВМУФТА				Н		



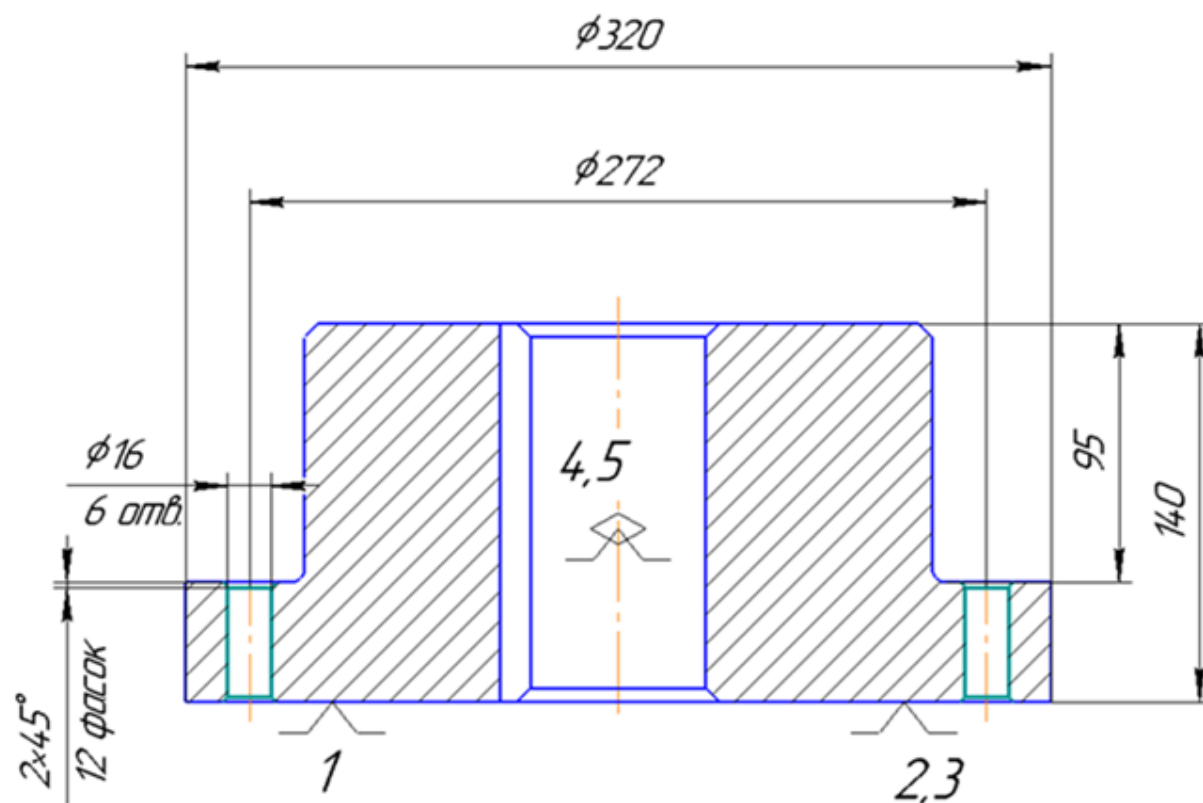
ГОСТ 3.555-84 Форма 7

Дубл.										
Взамін.										
Підпис										
Розробив	Гаманчук			НТУУ "КПІ", ФАПІЕ				015		
Перевірів	Борщук									
				НАНАПІВМУФТА						
Н. контр.										Н



ГОСТ 3.555-84 Форма 7

Дубл.										
Взамін.										
Підпис										
Розробив	Гаманчук			НТУУ "КПІ", ФАПІЕ						
Перевірів	Борщук								020	
Н. контр.									Н	



ГОСТ 3.1404-86

Форма 2

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

--	--	--	--	--

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

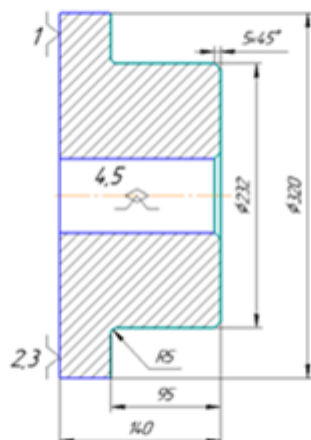
Розробив	Гаманчук		
Перевірів	Борщик		
Н. контр.			

НТУУ "КПІ",
ФАПІЕ

НАПІВМУФТА

Н

005



Назва операції

Матеріал

Токарна

СЧ 15 ГОСТ 1412-85

Твердість

ОВ

МД

Профіль і розміри

МЗ

Коод

кє

Обладнання, пристрій ЧПК

Позначення програми

Токарно-гвинторізний верстат 16К20

То

Тд

Тп.з

Тшт.

МОР

Емульсія

Р		ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1. Точити Ø232 начорно, начисто;								
T02	2. Підрізати торці;								
O3	3. Зняти фаски.								
O04									
T05									
T06									
P07									
O8									
O9									
O10									

ОК

Обробка різанням

ГОСТ 3.1404-86

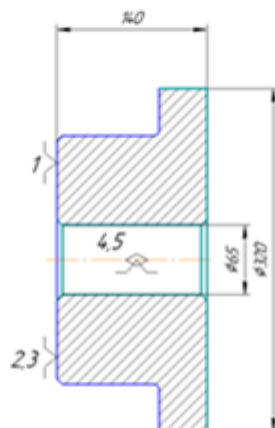
Форма 2

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

--	--	--	--	--

Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата

Розробив	Гаманчук			НТУУ "КПІ", ФАПІЕ			
Перевірів	Борщук						
Н. контр.				НАПІВМУФТА	Н		010



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

Р		ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1. Розточити Ø65 начорно, начисто.								
T02	2. Точити Ø320 начорно, начисто;								
O03	3. Підрізати торець Ø320;								
O04	4. Зняти фаски.								
T05									
T06									
P07									
O08									
O09									
O10									

OK

Обробка різанням

[illegible]

ГОСТ 3.1404-86

Форма 2

Дубл.																			
Взамін.																			
Підпис																			
Розробив	Гаманчук																		
Перевірів	Борищук																		
Н. контр.																			
				НТУУ "КПІ", ФАПІЕ															
								НАПІВМУФТА				Н				020			
				Назва операції				Матеріал											
				Вертикально-свердлильна				СЧ 15 ГОСТ 1412-85											
				Твердість		ОВ		МД		Профіль і розміри		МЗ		Коод					
						кг													
				Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми											
				Вертикально-свердильний верстат 2Н125															
То		Тд		Тп.з		Тшт.		МОР											
								Емульсія											
P																			
P01	1. Свердлити 6 отворів Ø16;																		
T02	2. Розвернути 6 отворів Ø16;																		
O03	3. Розвернути 6 отворів Ø16;																		
O04	4. Зняти фаски.																		
T05																			
T06																			
P07																			
O08																			
O09																			
O10																			
OK	Обробка різанням																		

7.2 Опис та застосування приладу під час обробки виробу

На рисунку 7.3 зображено кондуктор, що представляє собою засіб для збірки напівмуфти для висверлення необхідних отворів.

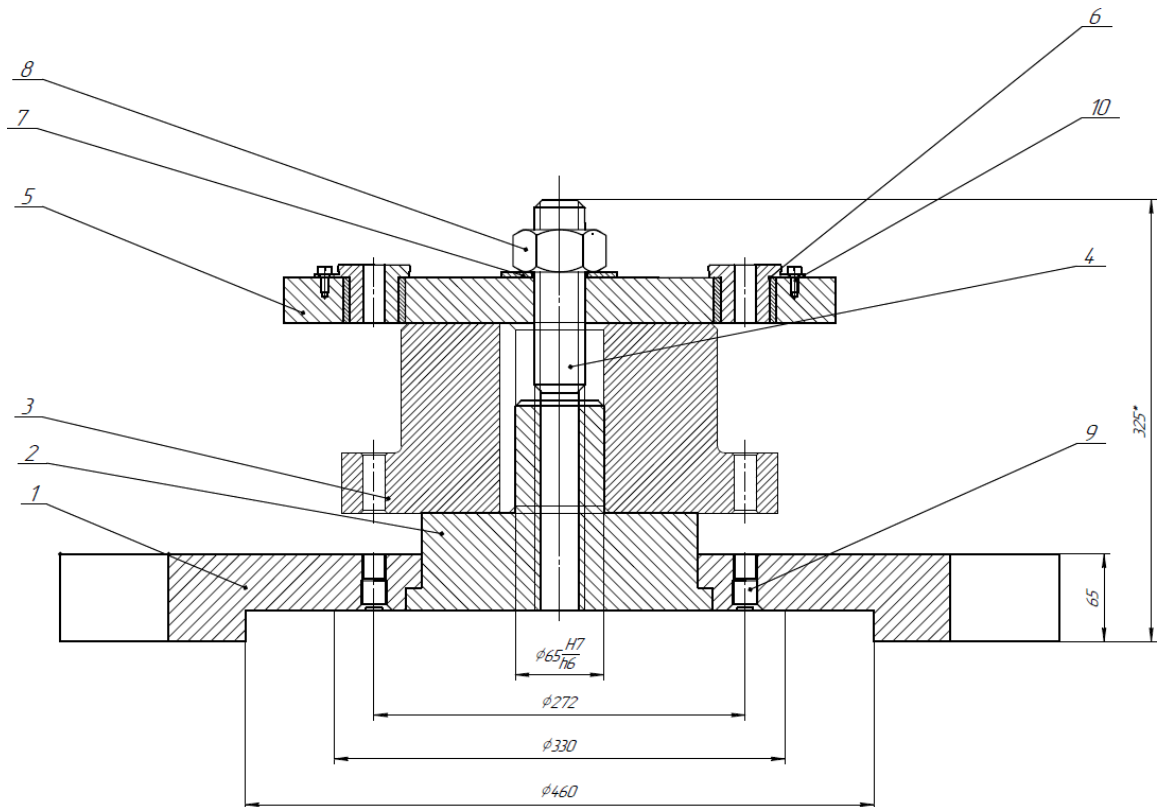


Рисунок 7.3 – Креслення кондуктора

Сам пристрій можна описати як конструкція з готовими помітками для отворів, куди прикріплюється виріб. Після його прикріплення кондуктор разом із виробом зафіксовуються на станку для сверління і через вже готові отвори в кондукторі свердла центруються для точності в роботі. Таким чином забезпечується точність виробу під час його виготовлення.

Сам виріб 3 встановлюється на палець 2, що є зібраним на болтах 9 на основі станини 1. Кондукторна плита 5, на якій знаходяться швидкозамінні втулки 6 кріпиться на шпильку 4. Фіксуються виріб з кондуктором за допомогою гайки 8.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті модернізовано трубний млин $4 \times 13,5$ м для помелу клінкеру у відкритому циклі за сухим способом виробництва цементу та виконано модернізацію його футерівки з метою підвищення зносостійкості й довговічності.

За результатами параметричних розрахунків (підрозділ 5.1) визначено основні характеристики млина: критична частота обертання 21,1 об/хв, робоча — 15,8 об/хв, кутова швидкість 1,65 рад/с; потужність головного приводу 3 200 кВт, що забезпечується синхронним електродвигуном СДН-17-50-12 з периферійною однобічною передачею.

Виконано перевірочні розрахунки на міцність основних елементів конструкції (підрозділ 5.2): барабана, торцевої кришки та її болтового з'єднання, цапфи. Усі елементи задовольняють умови міцності з потрібними запасами, що підтверджує працездатність конструкції за заданих навантажень.

На основі літературно-патентного огляду обґрунтовано вибір модернізації у вигляді двошарової хвилястої футерівки, яка поєднує жорсткий зносостійкий робочий шар із пружною демпфуючою основою. Хвилястий профіль активізує перемішування завантаження й підвищує ефективність помелу, а пружна основа знижує ударні навантаження та концентрацію напружень у корпусі барабана.

Розрахунком напружено-деформованого стану барабана в середовищі ANSYS (підрозділ 5.3) підтверджено ефективність модернізації: порівняно з базовою металевою футерівкою рівень напружень і деформацій корпусу знижено за збереження достатнього запасу міцності (мінімальний запас міцності зростає з 1,64 для базової до 2,67 для модернізованої конструкції, а максимальні напруження знижуються з 566 до 457 МПа). Це дає змогу підвищити довговічність футерувальних плит і барабана та зменшити кількість і тривалість зупинок обладнання на ремонтно-монтажні роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Гур'єва Л.Н. Технологія виробництва матеріалів і виробів будівельного призначення [Електронний ресурс] / КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. – 188с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66516>
2. Пат. US 4200242 А Європейське патентне відомство, МПК В02С 17/22. Елемент зносостійкого футерування для розмольного млина (Wear liner element for a grinding mill) / Bradley G. ; заявник і патентовласник Bradken Resources Pty Ltd. – № EP20863110А ; заявл. 11.09.2020 ; опубл. 20.07.2022. Пат. EP 0164328 В1. Lining for ball mills : європ. пат. Опубл. 1989.
3. Пат. EP 0164328 В1 Всесвітня організація інтелектуальної власності (BOIB), МПК В02С 17/22. Спосіб та апарат для вторинної переробки композитного футерування млинів (Method and apparatus for recycling composite mill liners) / Moro J. ; заявник і патентовласник Metso Outotec Chile SpA. – № РСТ/IB2023/059813 ; заявл. 29.09.2023 ; опубл. 02.05.2024. Пат. US 2016/0303574 А1. Composite mill liner : заявка США. Опубл. 2016.
4. Пат. US 4609158 А США, МПК В02С 17/22. Вузол футерування млина із захисними елементами проти адгезії (Mill liner assembly with anti-adhesion protective elements) / McInerney T. ; заявник і патентовласник Tega Industries Limited. – № US16/482,109 ; заявл. 30.01.2018 ; опубл. 06.09.2022.
5. Пат. Composite grinding mill liner : пат. US 20160303574 А1 Сполучені Штати Америки (США). № US06/600,534 ; заявл. 10.06.2020 ; опубл. 13.10.2022.
6. Пат. Liner for ball mills : пат. CN 101947489 А Китай. № EP85890079А ; заявл. 08.09.2017 ; опубл. 11.10.2018.
7. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами).
8. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
9. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

- 10.ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
- 11.Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Київ : Міненерго України, 2017. 617 с.
12. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия.
13. ANSYS, Inc. ANSYS User's Guide Documentation. (Theory Guide, User Guide, Tutorial Guide), v.13, 2011. Режим доступу : ansys.com.
- 14.Карвацький А. Я. Джерела енергії і енергозбереження-2. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання. Текст лекцій для студентів напряму підготовки «Машинобудування». — К. : НТУУ «КПІ». — 212 с.
- 15.Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів : моногр. / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. — К. : НТУУ «КПІ», 2012. — 352 с.
16. Щербина В.Ю., Гондляр О.В., Сівецький В.І. Іжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Механічне обладнання для виробництва в'язучих будівельних матеріалів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. — 147 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45720>
- 17.Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів : моногр. / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович та ін. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 103 с.
- 18.ДСТУ 9183:2022. ДСТУ 9183:2022 Цементи. Загальні технічні умови. На заміну ДСТУ Б.В.2.7-112-2002 ; чинний від 2023-01-01. Вид. офіц. 2022.
- 19.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>
- 20.Рудопомольні апарати самоподрібнення (млини і дезінтегратори) : Навчальний посібник / М.І. Сокур, В.С. Білецький, Д.П. Божик, С.В. Чоботарьов. — Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2023. — 252 с. ISBN 978-617-639-417-4

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця розглянутих патентів

№	Номер патенту	Назва	Суть технічного рішення
1	US 4200242 A	Mill liner	Похилі панелі з ввігнутими направляючими поверхнями; спрямування великих куль до торця подачі, поліпшення класифікації та зниження енергоспоживання.
2	EP 0164328 B1	Lining for ball mills	Кільцеві жолоби та рифлені гребені (хвилястий профіль); рівномірне подрібнення, шумопоглинання та зниження зношування.
3	US 4609158 A	Mill lining	Модульна футерівка з тримальних сегментів і змінних зносостійких вставок; заміна вставок без зняття панелі, скорочення простоїв.
4	US 2016/0303574 A1	Composite mill liner	Композитна футерівка з керамічними самофіксувальними елементами; маса ~40 % від металевої, ресурс у 4–6 разів вищий.
5	CN 101947489 A	Mill lining with graded ribs	Похилі градуйовані ребра на днищі панелей; спрямування дрібних куль до розвантаження, підвищення ефективності помелу.

Додаток Б

Специфікації до графічної частини

Графічна частина дипломного проєкту складається з таких аркушів формату А1:

1) Технологічна схема виготовлення цементу сухим способом; 2) Млин трубний з модернізацією футерівки. Вигляд загальний (ЛП22.043111.000-703В); 3) Барабан трубного млина; 4) Завантажувальна частина (32 отв. $\varnothing 70H7$, 32 отв. $\varnothing 67$); 5) Головний привід (ЛП22.043111.00.002-70СК); 6) Футерівка трубного млина, модернізована (ЛП72.111112.006.04-70СК); 7) Результати розрахунків базової та модернізованої конструкцій (плакат)

[illegible]

[illegible]

Додаток В

Лістинг програми розрахунку на ЕОМ

Для автоматизації параметричного розрахунку трубного млина (підрозділ 5.1) складено програму мовою C++. Програма за заданими вихідними даними (діаметр, довжина, коефіцієнт заповнення, насипна густина мелючих тіл) обчислює критичну та робочу частоти обертання, кутову швидкість, внутрішній об'єм барабана та масу завантаження. Це дає змогу швидко перераховувати параметри за зміни вихідних даних.

Текст програми (мова C++):

```
#include <iostream>
#include <cmath>
using namespace std;

int main() {
    // Вихідні дані
    double D = 4.0;    // внутрішній діаметр барабана, м
    double L = 13.5;   // робоча довжина барабана, м
    double psi = 0.3;  // коефіцієнт заповнення
    double rho = 4.5;  // насипна густина мелючих тіл, т/м^3
    double k = 0.75;   // частка робочої частоти від критичної
    const double PI = 3.14159265;

    double n_kr = 42.3 / sqrt(D);    // критична частота, об/хв
    double n = k * n_kr;             // робоча частота, об/хв
    double omega = PI * n / 30.0;    // кутова швидкість, рад/с
    double V = PI * D * D * L / 4.0; // об'єм барабана, м^3
    double G = psi * V * rho;        // маса завантаження, т

    cout << "n_kr = " << n_kr << " об/хв" << endl;
    cout << "n = " << n << " об/хв" << endl;
    cout << "omega = " << omega << " рад/с" << endl;
    cout << "V = " << V << " м^3" << endl;
    cout << "G = " << G << " т" << endl;
    return 0;
}
```

Результат виконання програми:

```
n_kr = 21.15 об/хв
n = 15.86 об/хв
omega = 1.661 рад/с
V = 169.646 м^3
G = 229.02 т
```

Таблиця В.1 – Результати розрахунку за програмою

Параметр	Значення
Критична частота обертання $n_{кр}$, об/хв	21,15
Робоча частота обертання n , об/хв	15,86
Кутова швидкість ω , рад/с	1,661
Внутрішній об'єм барабана V , м ³	169,65
Маса завантаження мелючих тіл G , т	229,02

Отримані значення збігаються з результатами ручного розрахунку (підрозділ 5.1) та з даними таблиці 2.1, що підтверджує коректність розрахунку.

Додаток Г

Особисті досягнення студента

Додаток Д

Результати перевірки на плагіат