

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістра за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Комп'ютерне конструювання мехатронних
систем» за спеціальністю 133 «Галузеве
машинобудування»

на тему «Удосконалення процесу відновлення робочої
поверхні валків чотиривалкової дробилки коксу
агломераційній фабрики»

Керівник роботи

Олена НАЛОБІНА

Консультант від бази практики

Олексій ДРОЗД

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Сергій БОРИСОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Володимир ОЖЕНКО

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>автоматизації виробництва та цифрових технологій</u>
Кафедра	<u>автоматизації, електро- та робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>133 Галузеве машинобудування</u>
ОПП	<u>Комп'ютерне конструювання мехатронних систем</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

_____ Світлана ГУРКОВСЬКА

«03» листопада 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Борисову Сергію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Удосконалення процесу відновлення робочої поверхні валків чотиривалкової дробилки коксу агломераційної фабрики

керівник роботи Налобіна Олена Олександрівна, професор, д.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 29.08. 2023 р. №137.1/29.08.2023

2. Термін подання роботи 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень тощо.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ (актуальність теми; наукова новизна та практичне значення; об'єкт, предмет та методи дослідження, апробація роботи). 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, аналіз існуючих конструкцій, патентної інформації). 2. Теоретичні дослідження (виклад проведених здобувачем теоретичних досліджень. Аналіз існуючого процесу відновлення і розробка удосконаленого процесу, концептуальна модель мехатронного комплексу, розрахунки параметрів робочого обладнання та вибір датчиків системи керування; алгоритм розробки системи керування. 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень параметрів коксу. Висновки. 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу Дробарка Д4Г 900x700. Технологічний процес відновлення робочої поверхні валків. Компонування РТК для відновлення валків. Представлення результатів теоретичного дослідження.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
<i>Економіки</i>	д.т.н., проф. Налобіна О.О.
<i>Нормоконтроль</i>	д.т.н., проф. Налобіна О.О.

7. Дата видачі завдання 03.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	25.12.2023 – 28.12.2023
2	Розділ 2. Теоретичні дослідження	25.12.2023 – 28.12.2023
3	Розділ 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень	28.12.2023 – 02.01.2024
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін	03. 01.2024 – 07.01.2024
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	07.01.2024 – 08.01.2024
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	08.01.204 – 10.01.2024
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.01.2024 – 16.01.2024
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	16.01.2024 – 24.01.2024

Здобувач

С. М. Борисов

_____ (підпис)

Керівник роботи

О. О. Налобіна

професор, докт.

_____ (підпис)

техн. наук

Анотація

Борисов Сергій Миколайович. Удосконалення процесу відновлення робочої поверхні валків чотиривалкової дробилки коксу агломераційної фабрики. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», ОПП «Комп'ютерне конструювання мехатронних систем», ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Кривий Ріг, 2024.

Мета роботи: вдосконалення процесу відновлення робочої поверхні валків дробарки шляхом розробки мехатронної системи для автоматизації процесу.

Для досягнення мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- проаналізувати науково-технічну літературу за темою досліджень;
- обґрунтувати концептуальну модель мехатронного комплексу;
- дослідити параметри коксу, що надходить до чотиривалкових дробарок в процесі подрібнення;
- виконати економічне обґрунтування запропонованих змін.

Об'єктом дослідження: робочий процес відновлення валків дробарки.

Предмет дослідження: чотиривалкова дробарка.

Методи досліджень: емпіричний для збору інформації; описовий; спостереження; експериментального дослідження.

Основні результати, отримані в роботі:

- на основі аналізу досвіду ремонту бандажів валків валкових дробарок зарубіжних та вітчизняних підприємств сформовано оперелік основних напрямків удосконалення даного процесу;

- запропоновано концептуальну модель процесу відновлення валків:

- проведено обрахунки силових і кінематичних параметрів процесу відновлення;

- розроблено програмний комплекс управління для керуючого пристрою;

- розроблено алгоритм завдання для розробки програмного забезпечення системи керування;

- експериментально досліджено параметри коксу, що надходить до чотиривалкових дробарок в процесі подрібнення;

- проведено економічне обґрунтування запропонованих змін, встановлено що економічний ефект складає 643500 грн/рік, при витратах на модернізацію розміром 507860 грн, інвестиції від

запровадження повернуться впродовж першого року експлуатації модернізованого механізму обробки бандажів.

Кваліфікаційна робота має 70 сторінок, 32 ілюстрації, 15 таблиць, 7 додатків, та 39 джерел у переліку посилань

Ключові слова: валкова дробарка, бандажі, валки, відновлення, мехатронна система, мехатронний комплекс.

Зміст

Вступ	7
Розділ 1. Аналіз предметної області	8
1.1 Аналіз конструкції дробарки	8
1.2 Аналіз досліджень дробарок і процесу відновлення валків	12
1.3 Аналіз патентної інформації	20
Розділ 2. Теоретичні дослідження.	26
2.1 Аналіз існуючого процесу відновлення	26
2.2 Проблематика.....	29
2.3 Концептуальна модель мехатронного комплексу	29
2.4 Розрахунок оптимальних параметрів подачі та глибину різання	32
2.5 Розрахунок приводу подачі супорта.	44
2.6 Розрахунок приводу зміни глибини різання	45
2.7 Вибір приводу подачі супорта.....	46
2.8 Вибір приводу зміни глибини різання.....	47
2.9 Уточнення параметрів приводів.....	49
2.10 Вибір датчиків для системи керування	49
2.11 Алгоритм для розробки програмного забезпечення системи керування	49
Розділ 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень	52
3.1 Дослідження параметрів коксу, що надходить до чотиривалкових дробарок в процесі подрібнення	52
Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін.....	60
4.1 Аналіз наявних витрат існуючої технології обточки	60
4.2 Аналіз необхідних витрат для модернізації механізму обточки бандажів	60
4.3 Аналіз ефективності модернізації механізму обточки бандажів.....	61
ВИСНОВКИ	64
Список використаних джерел	65
Додатки.....	70

Вступ

Процеси дроблення є широко поширеними й зустрічаються практично у всіх галузях виробничої діяльності. Найбільш широке застосування вони знаходять у гірничорудній, хімічній та металургійній промисловості.

При дробленні та подрібненні кам'яно-рудних матеріалів застосовують різні типи валкових дробарок. Дане обладнання має низку недоліків, наприклад: відносно невисока продуктивність, нерівномірний ступінь спрацьовування поверхонь робочих органів, що є причиною простоїв механічного устаткування технічного обслуговування; тощо.

Актуальність.

Таким чином, дослідження валкових дробарок з метою підвищення продуктивності, якості подрібненого продукту, зменшення ступеня спрацьовування робочих органів є актуальними науково-технічними завданнями виробничо-господарської діяльності, оскільки без постійного підвищення якості та ефективності роботи машин та агрегатів неможливе вдосконалення матеріально-технічної бази будь-якого підприємства.

Робота апробована на **Всеукраїнській науково-практичній конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення»**

<https://ukrlegprom.org/ua/news/galuzeva-naukovo-praktychna-konferenciya-v-luczkomu-ntu/>

Борисов С. До питання діагностування технічних об'єктів. Мат. Всеукраїнської науково-практичної конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення». М. Луцьк, Луцький НТУ. 29 березня 2023 р.
<https://drive.google.com/file/d/1gGkiePbgUvzfEo5jYa0BemeTBKYxkA4a/view>

Розділ 1. Аналіз предметної області

1.1 Аналіз конструкції дробарки

На одному з металургійних підприємств України (далі – МПУ) на агломераційній фабриці для подрібнення коксу використовуються чотиривалкові дробарки Д4Г 900x700, виробництва ІП «Укрбуддробмаш», м. Луганськ (Україна) [1].

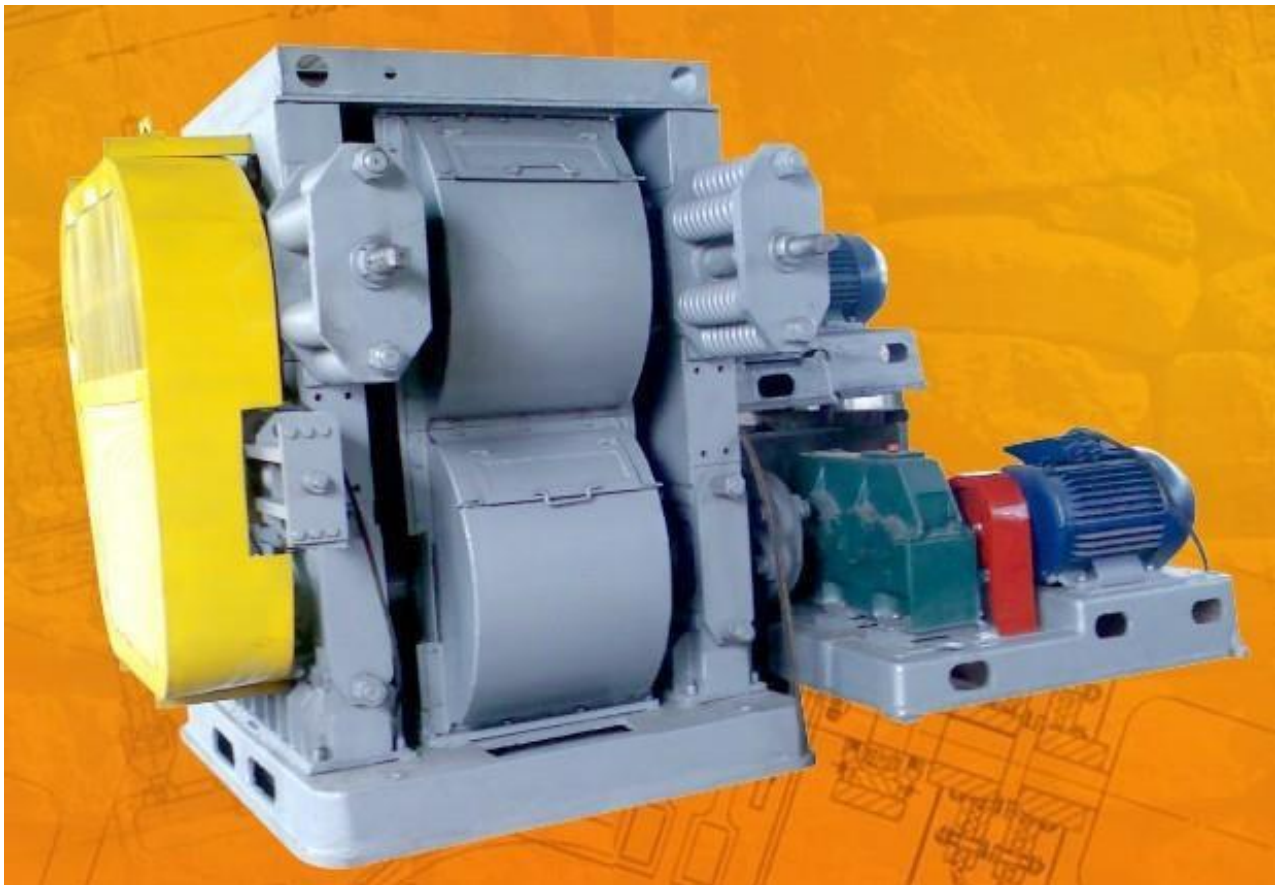


Рисунок 1.1 - Дробарка чотиривалкова Д4Г 900x700 (2)

Дробарка чотиривалкова Д4Г 900x700 призначена для подрібнення твердого палива (коксу) до фракції 0-3мм. Використовується в технологічному процесі отримання агломерату та окатишів.[1]

Завантаження виконується зверху, кокс попередньо дробиться верхньою парою валків, а остаточно подрібнюється нижньою парою валків.

Дробарка чотиривалкова Д4Г 900x700, виробництва ІП «Укрбуддробмаш», м. Луганськ (Україна) має наступні технічні характеристики (див. табл. 1.1) [1]:

Таблиця 1.1- Технічні параметри дробарки Д4Г 700х900 [1]

№ з/п	Найменування параметру	Норма
1.	Продуктивність при щілині між валками верхніми 10мм, нижніми 2,5мм, м ³ /год	До 26
2.	Розмір поступаючих кусків коксу, мм	До 50
3.	Вихід фракції помолу при подрібненні матеріалу, % 0-3 мм 3-5 мм	95 5
4.	Швидкість обертання валків, об/хв: - верхніх при подрібненні - нижніх при подрібненні - верхніх при обточці бандажів - нижніх при обточці бандажів	118,4 184,5 59,2 92,3
5.	Привід верхнього валка: Редуктор: - тип - передаточне число Електродвигун: - тип - число обертів, об/хв. - потужність, кВт	Ц2У-315Н-12,5-21У2 12,5 4АМУ250М8/4У2 740/1480 37/55
6.	Привід нижнього валка: Редуктор: - тип - передаточне число Електродвигун: - тип - число обертів, об/хв. - потужність, кВт	Ц2У-315Н-8-12У2 8 4АМУ250М8/4У2 740/1480 37/55
7.	Габаритні розміри, мм: - висота - ширина - довжина	2603 3335 4428
8.	Вага, кг	Не більше 34368

Чотиривалкова дробарка складається з наступних основних вузлів (див. рис. 1.2): зварної станини 1, двох пар валків 2, які закріплені в станині 1, двох приводів 3, що обертають стаціонарні валки, ремінної передачі 4, що обертає рухомі валки, які мають можливість при потраплянні негабаритного матеріалу, відхилитись завдяки пружинним амортизаторам 5. Проміжок між валками регулюється завдяки натискним гвинтам 6. Відновлення робочої поверхні валків виконується за допомоги механізму обточки бандажів 7, що закріплений на станині 1.

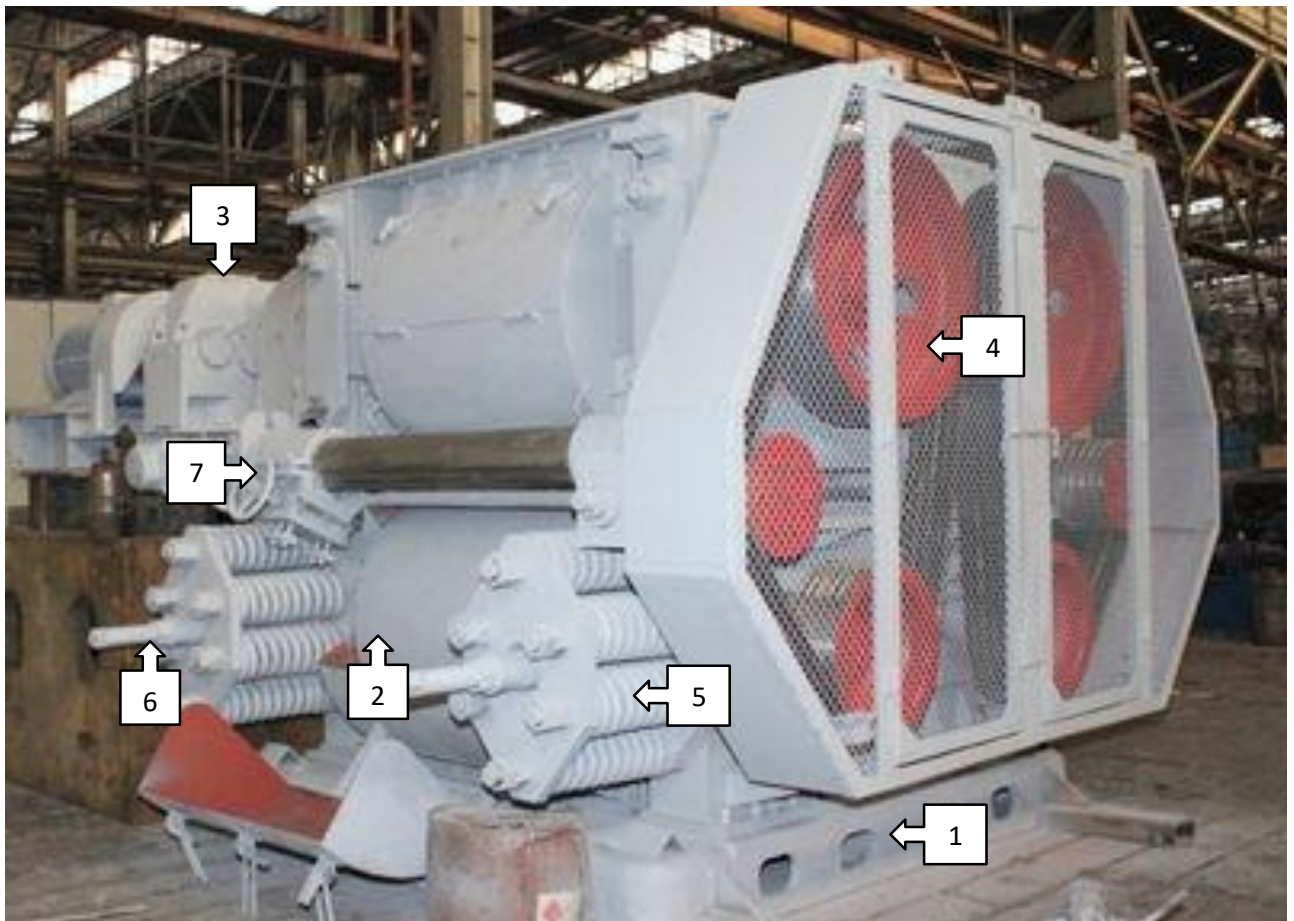


Рисунок 1.2- Чотиривалкова дробарка Д4Г 900x700 (3]

Механізм обточки бандажів валків призначений для відновлення робочої поверхні бандажів валків дробарки.

Механізм обточки бандажів складається (рис. 1.3): направляюча 1, що спирається на дві шарнірні опори 2, які закріплені до м/к станини дробарки. Супорт 3 приводиться в рух та пересувається вздовж направляючої 1, завдяки гвинтовій передачі (не показана), гвинт якої обертається від електродвигуна 6 через зубчасту-ремінну передачу 5, які закріплені на металевій пластині 7. На супорті 3 розташовано різцетримач 4, до якого закріплюють різець для обробки бандажів валків 8. Різцетримач 4 пересувається за допомогою гвинтової передачі (умовно не показано), гвинт 9, якої обертається вручну за допомогою гайкового ключа.

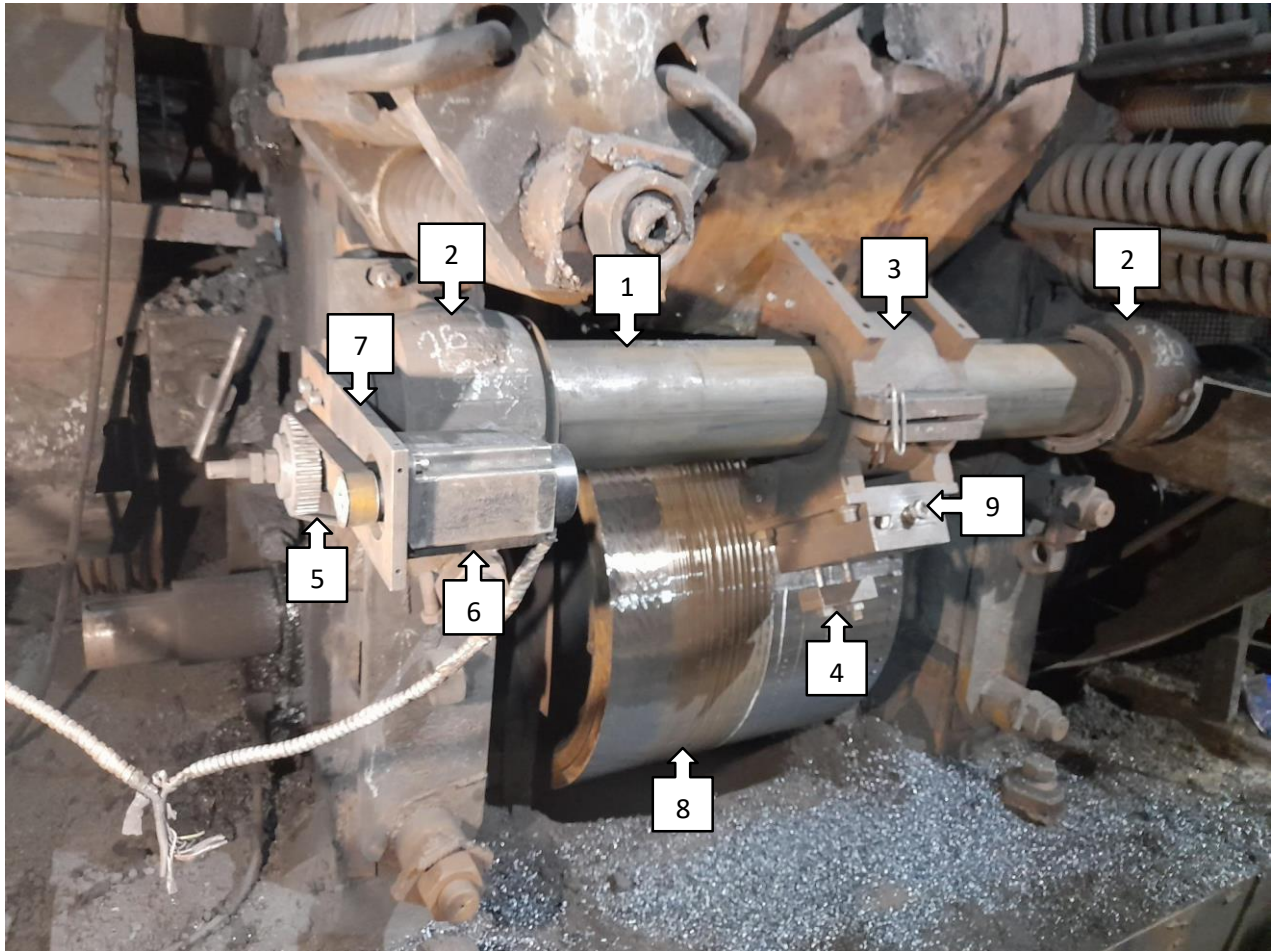


Рисунок 1.3 - Механізм обточки бандажів

Керування приводом пересування супорту механізму обточки бандажів виконується в ручному режимі за допомоги пульта керування (рис. 1.4):

Пульт керування дозволяє обирати напрямок пересування супорту (тумблер 2), швидкість пересування супорту регулюється регулятором обертів електродвигуна (регулятор 1), кнопка запуску (3).

Під час обробки бандажу оператор механізму вручну корегує швидкість пересування супорту.

Регулювання глибини різання виконується вручну, за допомоги гайкового ключа.



Рисунок 1.4- Пульт

1.2 Аналіз досліджень дробарок і процесу відновлення валків

Мікульонок, І. О., Карвацький, А. Я., Лелека, С. В., Іваненко, О. І. (4] розробили класифікацію валкових дробарок і млинів (рис. 1.5) для руйнування кускових і сипких матеріалів, оброблюваних на підприємствах хімічної, гірничорудної, будівельної, харчової та електродної галузей промисловості, а також у металургії. Виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій валкових дробарок і млинів, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Конструкції проаналізовано залежно від кількості валків, типу поверхні валків, форми валків, відносної швидкості робочої поверхні валків, можливості регулювання температури поверхні валків, наявності додаткових робочих органів, а також матеріалу поверхні валків (4].

Сумін М.А. (5] виконав огляд та аналіз процесу дроблення крихких матеріалів в одновалковій дробарці, при якому відбувається руйнування роздрібнювального шматка, в тому числі, і під дією дотичних напружень. На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено енергоефективність дробарок, у яких в подрібнювальному шматку виникають дотичні напруження, в порівнянні з відомими дробарками стиснення (5].

На підставі проведеного силового аналізу показано, що в одновалковій дробарці на шматок дробленого матеріалу діють як стискаючі сили, що викликають в шматку дію нормальних напружень і крутний момент, що викликає дію дотичних напружень, тобто, в шматку створюється складний напружений стан. Захоплення роздрібнюваного шматка в зазор між валком і щогою здійснюється, якщо (5]:

- кут тертя між шматком дробленого матеріалу і валком більше, ніж кут захоплення; (5]

- кут, на який відхилена від горизонталі рівнодіюча сили тертя між шматком і валком і сили нормального тиску більше, ніж кут тертя між подрібнювальним матеріалом і нерухомою щогою (5].

2. Розроблено математичну модель процесу руйнування крихкого матеріалу під дією складного напруженого стану. Визначено, що при дробленні матеріалу, що проходить в кілька стадій, руйнування відбувається послідовно по площинах максимальних дотичних напружень і відбувається до тих пір, поки розмір новостворених шматків не стане менше, ніж зазор між валком і щогою (5].

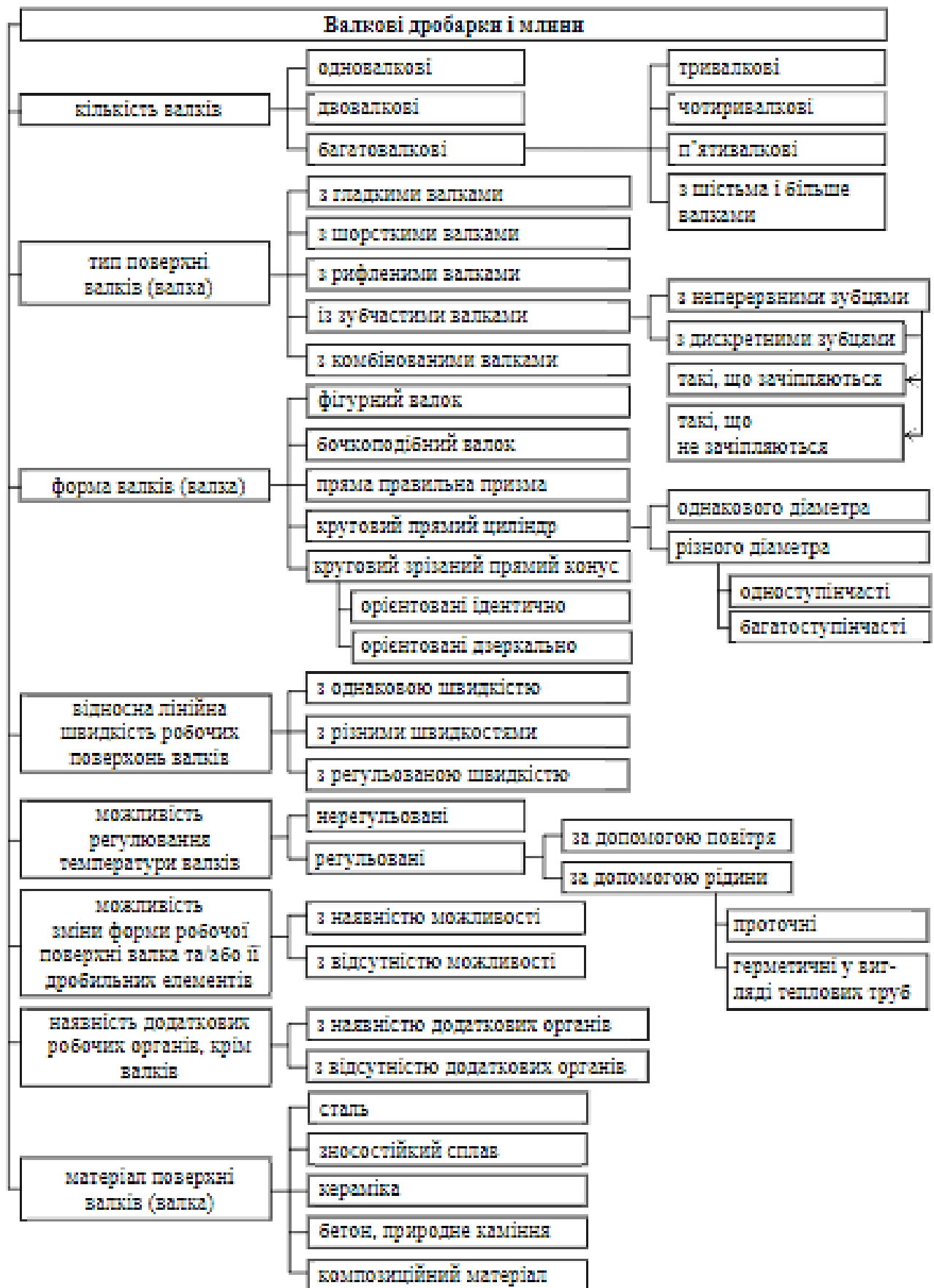


Рисунок 1.5 - Класифікація валкових дробарок і млинів [4].

3. Проведено порівняльний аналіз роботи дробарок стиснення, в результаті якого визначено, що продуктивність двовалкової дробарки більше, ніж продуктивність щокової і конусної дробарок при інших рівних умовах (однаковою мірою дроблення, зокрема ходів робочого органу і потужності приводу), відповідно, у двовалкових дробарок витрата енергії буде менше, ніж у щокових і конусних дробарок. Проведено порівняльний аналіз потужності приводу одно- і двовалкової дробарок. Установча потужність приводу одновалкової дробарки буде в 2 рази менше, ніж потужність двовалкової дробарки, відповідно, витрата енергії у одновалкової дробарки буде менше на ту ж величину. (5]

4. Експериментально підтверджено, що руйнування подрібнювального шматка відбувається по площині дії максимальних дотичних напружень. (5]

Визначено, що для дроблення шматка матеріалу, в якому створюється складний напружений стан, сила, необхідна для його руйнування, в 2,3 - 2,8 разів менше, ніж сила, що прикладається при стисненні. (5]

5. Встановлено, що для збільшення ступеня дроблення в одновалковій дробарці необхідно збільшувати коефіцієнт тертя між шматком дробленого матеріалу і валком і зменшувати його між шматком дробленого матеріалу і нерухомою щокою. Також для збільшення ступеня дроблення необхідно збільшувати діаметр валка і зменшувати зазор між валком і нерухомою щокою. (5]

Дане положення, визначене для одновалкової дробарки, не суперечить умові для двовалкової дробарки. (5]

Молдавський А.В. (6] виконав аналітичний огляд існуючих агрегатів для дроблення корисних копалин. На основі аналізу техніко-економічних показників обґрунтовано вибір конусної дробарки, як найбільш ефективної для поставленої задачі. Автором здійснено вибір двигуна та силового електрообладнання, виконана автоматизація технологічного процесу подрібнення руди. Спроектована схема керування електроприводами дробильного комплексу, складені алгоритми роботи програмного забезпечення контролера, що дає нам змогу виконувати всі операції в автоматичному режимі. Методами математичного моделювання отримано графіки перехідних процесів. [6]

Тітов А.А. (7] в своїй роботі проаналізував періодичний хвильовий профіль валків власної розробки (рис. 1.6), що дозволяє частково замінити руйнування шматків стиском на руйнування від навантажень зсуву та вигину, яке призводить до зменшення енергоспоживання під час дезінтеграції, а також до зниження переподрібнення матеріалу (7].

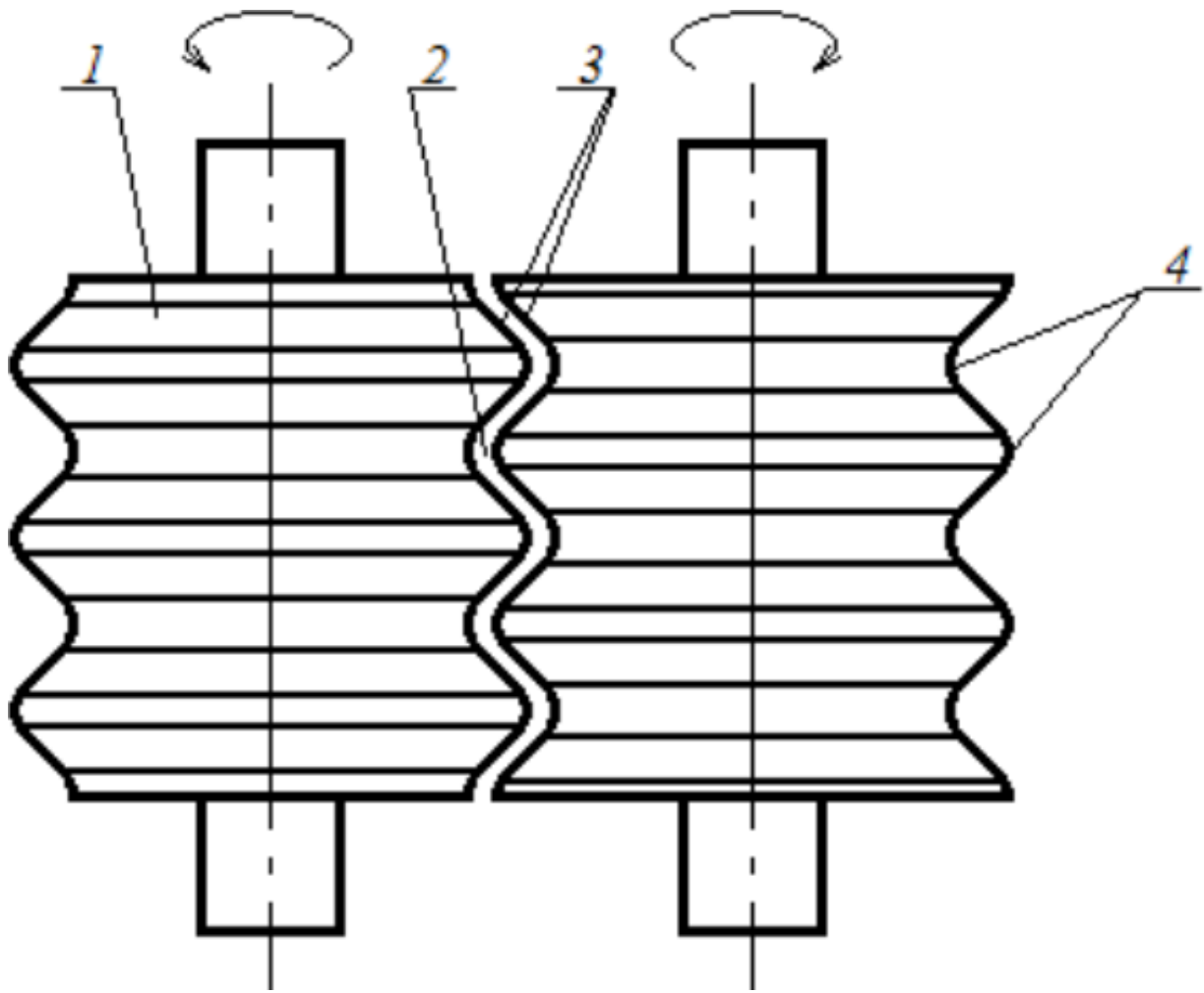


Рисунок 1.6 - Схема валків з періодичним хвильовим профілем (7): 1- бандаж; 2-постійний проміжок; 3-конічні ділянки; 4-скруглення

1. Конструкція валкової дробарки була модернізована за рахунок використання валків з періодичним хвильовим профілем. (7)

2. Досягається ефективно руйнування великих шматків шляхом часткової заміни сили стиснення для згинання та зсуву, а для дрібних деталей - для зсувних сил. (7)

3. Показано збільшення кута захоплення при затисканні деталі в порожнині профілю. (7)

4. Визначено, що виграш в силі при дробленні лускатих частинок в хвильові валкові дробарки в порівнянні з гладкими валками можуть досягати кілька десятків разів. (7)

5. Дробарки з періодичним хвильовим профілем валків покращать ефективність переробки дрібнозернистих порід. (7)

Огородніком М. С. і Борщиком М. С. [8] запропоновано модернізований варіант конструкції (рис. 1.7). Ця дробарка має валки 1 і 2. Валок 1 закріплений на валу 3, який обертається в нерухомих підшипниках 4. Його обертальний рух забезпечується від

електродвигуна 5 через редуктор 6. Валок 2 закріплений на валу 7 і кінематично пов'язаний через карданний вал 8, редуктор 9 з електродвигуном 10. Підшипники 11 валка 2 встановлені на пружинах 12 з можливістю їх стиснення при попаданні в робочий простір дробарки предметів, які не подрібнюються. [8]

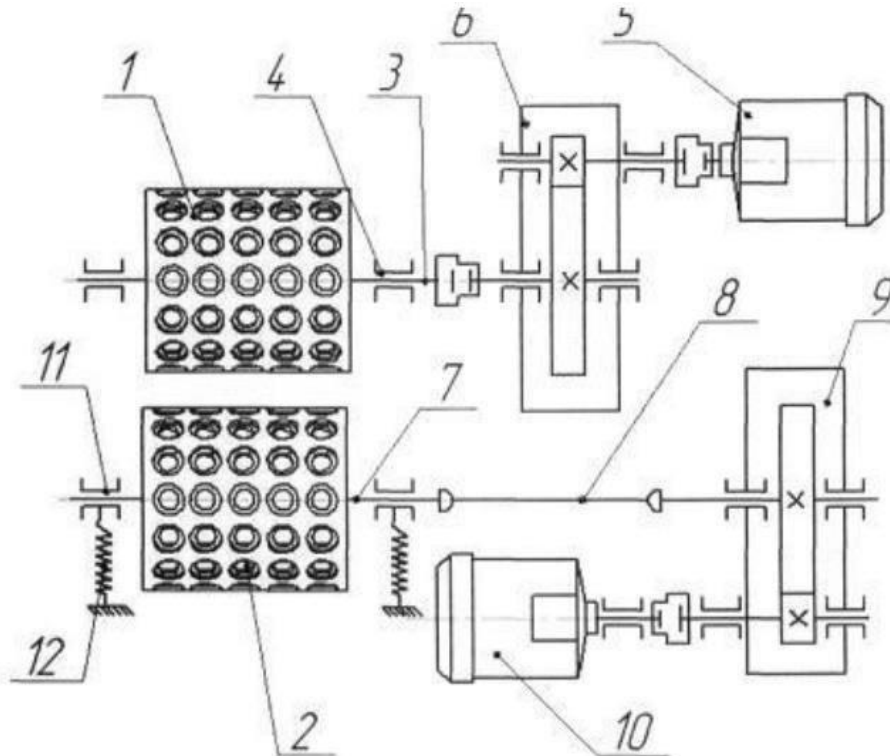


Рисунок 1.7 - Кінематична схема дробарки згідно (8)

Валкова дробарка працює наступним чином. Під час стиснення валками куска матеріалу його контакт поверхнею бандажу відбувається по двом кільцям гострими кромками. Прикладені при ньому зусилля створюють у матеріалі розвинуту схему нормальних і дотичних напружень по всьому об'єму матеріалу, що забезпечує процес селективного вибору площин з мінімальним опором руйнуванню. За рахунок створення раціональної схеми прикладання зусиль до матеріалу зменшуються енерговитрати на його подрібнення та збільшується термін роботи валків. (8)

Така конструкція валкової дробарки відрізняється від подібних тим, що містить два валки з гладкими бандажами, які встановлені на валах, один із яких обертається у нерухомих підшипниках, а другий у рухомих, яка відрізняється тим, що на робочій поверхні бандажів виконані заглиблення (рис. 1.8) у вигляді верхньої і нижньої впадин з діаметрами d_v і d_n , співвідношення розмірів яких становить $d_v:d_n = 1,8-2,3$, а глибини впадин беруть у залежності від величини діаметрів відповідно для верхньої h_v і нижньої h_n рівними (8):

$$h_v = (0,12-0,15)d_v \quad (1.1)$$

$$h_n = (0,15-0,20)d_n. \quad (1.2)$$

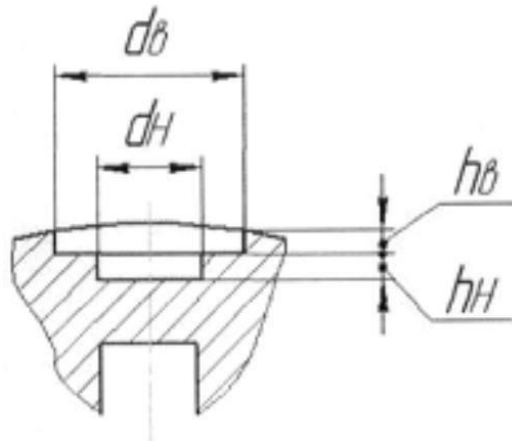


Рисунок 1.8- Конструкція і розміри западин згідно (8]

Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О. І., Воробйов О. М., Смирнов В.О., Божик Д.П (9] виклали теоретичні основи і технології процесів дроблення, подрібнення і грохочення корисних копалин. Розглянуті основні конструкції технологічного обладнання, його принцип дії і технологічні характеристики, монтаж і технічне обслуговування млинів. Викладені методи контролю крупності перероблюваної мінеральної сировини і базисні положення охорони навколишнього середовища у підготовчих цехах збагачувальних фабрик. Особлива увага приділена моделюванню процесів у проточній і розвантажувальній частині барабанного млина, питанням конструкції і напруженого стану барабанів млинів. Викладені питання теорії і практики створення дезінтеграторів відцентрового типу. Видання призначене для фахівців у галузі підготовки корисних копалин до збагачення, зокрема, дроблення, подрібнення, грохочення мінеральної сировини (9].

Тарасенко В.А. (10] дослідив закономірності робочого процесу шахтних валкових дробарок, вибору оптимальної структури і параметрів, що забезпечують зниження динамічних навантажень і підвищення технічного рівня дробильних машин. У статті запропоновано нове рішення актуальної наукової проблеми, яка полягає в розробці теорії робочих процесів валкових дробарок на основі створення імітаційної математичної моделі функціонування одновалкової дробарки (10].

Ернан Антікой, Едуард Гуаш та ін. (11] представили вдосконалений підхід до моделювання розподілу частинок за розміром продукту, отриманого в результаті подрібнення в валковій дробарці високого тиску, з метою використання в стандартних шліфувальних валках високого тиску (HPGR). Цей підхід використовує різні значення параметрів функції розподілу розривів для однієї умови стиснення

частинок і стану стиснення шару. Для експериментів було використано два матеріали; змінений Та-вмісний граніт і кальцієво-силікатна вольфрамова руда. Було проведено ряд експериментів з постійними робочими умовами, змінюючи при цьому обрану умову для вивчення впливу налаштування обладнання на модель. Матеріал подрібнювався за допомогою заздалегідь визначеної питомої сили пресування, змінюючи розмір частинок подачі, швидкість валка і статичний зазор. Четверта група експериментів була проведена зі зміною питомої сили натискання. Статичний зазор був ключовим фактором для контролю розміру частинок продукту. Представлено математичний підхід до прогнозування гранулометричного складу продукту, який показав хорошу відповідність у порівнянні з експериментальними даними. Це той випадок, коли використовується фракційний продукт з вузьким розміром частинок, але посадка стала напрочуд хорошою при багаторозмірному розподілі. Однак при зміні питомої сили пресування у випадку з кальцієво-силікатним матеріалом результати були не зовсім точними. Гіпотеза одночасного стиснення однієї частинки і стиснення шару для різних діапазонів розмірів і з різними параметрами функції розподілу була досліджена і підкріплена різними моделями, які обмінювали параметри стиснення шару на функцію розподілу стиснення однієї частинки, і навпаки [11].

Віктор Шейченко, Володимир Вольський та ін. [12] дослідили технологічний процес подрібнення рослинних залишків соняшнику та причинно-наслідкових зв'язків факторів, що формують систему якісних показників. Розроблено необхідні передумови для визначення раціональних режимів і параметрів валкової дробарки. Розроблено та виготовлено дослідний зразок валкової дробарки, в якій ріжучі ножі розташовані по всій ширині захвату в шаховому порядку, з можливістю зміни кута нахилу до осі обертання барабана в діапазоні 5...20°. Встановлено, що в разі правобічного розташування ріжучої кромки ножів найбільший сумарний рівень відсотка подрібнених стебел в межах 101\и150 мм при додатковому завантаженні масою 800 кг перевищував в 1,58 рази відповідні показники валка при додатковому навантаженні 600 кг. Найбільше габаритне значення відсотка подрібнених стебел в межах 0\и200 мм при додатковому завантаженні валка 800 кг було в 1,13 рази вище відповідних показників валка при додатковому навантаженні 600 кг. У діапазоні 0\и200 мм, при додатковому навантаженні на валок 600 кг, при лівосторонньому розташуванні ріжучої кромки ножів валка спостерігався більш високий сумарний відсоток подрібнених стебел в порівнянні з правостороннім розташуванням. При швидкості 7,45 км/год, 13,6 км/год кумулятивне значення відсотка подрібнених стебел перевищувало відповідні показники при правобічному розташуванні ножів у 1,09 рази, при швидкості 18,6 км/год – у 1,04 рази, при швидкості 22 км/год – у 1,04 раза відповідно. Відмічено, що при лівосторонньому розташуванні

ріжучої кромки ножів валка відсоток подрібнених стебел в межах 51\и100 мм, при додатковому навантаженні 600 кг, перевищував відповідні показники при додатковому навантаженні 800 кг. При швидкості 10,08 км/год вона була перевищена в 1,9 рази; при швидкості 13,6 км/год – у 1,44 рази; при швидкості 18,6 км/год – у 1,96 рази; при швидкості 22 км/год – у 1,99 рази відповідно (12].

Шувей Ву, Шуай Ван та ін. (13] у своєму дослідженні проаналізували режим руху дробильного валка та запропонували динамічну модель валка та модель потоку матеріалу. Крім того, за допомогою моделі руйнування встановлено розподіл частинок за розміром на рівні дроселя. На основі цих моделей запропоновано методику розрахунку продуктивності ексцентрикових валкових дробарок. Ефективність методу перевірено за допомогою лабораторного експерименту. Отримані результати свідчать про те, що запропонований метод розрахунку дозволяє ефективно оцінювати продуктивність ексцентрикових валкових дробарок (13].

Хольгер Лібервірт, Фальк Зільберманн, Пйотр Щеліна (14] представили результати досліджень, присвячені вивченню впливу міцності на стиск, швидкості валка, розподілу частинок матеріалу за розміром і одиничних великих великогабаритних шматків на пропускну здатність зубчастої двовалкової дробарки. Дослідно-промислова дробильна установка в кар'єрі була розгорнута для випробування дробарки вапняком, андезитом і діабазом. Авторами встановлено, що, на відміну від інших типів дробарок, на пропускну здатність 2-х валкових дробарок майже не впливає міцність на стиск матеріалу, що подається, тоді як розподіл частинок матеріалу за розміром або навіть окремі великі грудки можуть мати значний вплив (14].

Джихо Квон, Хічан Чо, Мьонвук Мун, Кіхон Кім (15] для представлення поведінки частинок і прогнозування гранулометричного складу продуктів руйнування вугілля двовалковою дробаркою побудували нову комбіновану модель обриву-агломерації. У моделі використовується комбінація окремих моделей для двох різних явищ - руйнування і агломерації, які відбуваються одночасно в процесі двовалкової дробарки. Таким чином, він здатний представляти складне зменшення і зростання розміру частинок в процесі роботи. Параметри моделі були оцінені на основі експериментальних даних однорозмірних випробувань на дроблення. Використовуючи ці параметри, на основі моделювання було спрогнозовано розподіл матеріалів за розмірами. Змодельовані результати показують досить близьку узгодженість з експериментальними результатами з прийнятним ступенем точності. (15].

Роббі Різкі Рукмана, Мелодія Лінгва Франка, Сафар Уддін. (16] виклали результати дослідження, яке полягає в тому, щоб з'ясувати кілька факторів, які впливають на продуктивність двовалкової дробарки, як технічні та і нетехнічні. Ці перешкоди призводять до того, що

двовалкова дробарка працює менше ніж оптимально, виробнича мета не була досягнута. Проаналізовано ефективність і продуктивність агрегату для того, щоб підвищити продуктивність агрегату, збільшити значення ККД. Метод дослідження підкріплюється бібліотечними матеріалами, які можуть підтримувати дослідницькі цілі, пов'язані з розумінням принципів роботи інструментів та методів розрахунку (16].

Авторами отримані наступні висновки: Висновки проведеного дослідження такі: глиняний камінь вологістю > 25% гальмує обертання дво валкової дробарки в процесі відновлення, і валкова дробарка не працює оптимально, а високий вміст води може призвести до того, що матеріал прилипне або сформує покриття на живильнику. Це призводить до зменшення продуктивності подвійного котка дробарки до зменшення (16].

Баоцян Ван, Гофа Ван, Хун Ван, Йонг Дін, Тонг Чен (17] провели порівняння поведінки вугілля при руйнуванні його промисловою просіювальною дробаркою і валковими дробарками зі звичайними зубами. Для кожного порівняння використано два види вугілля, близько 10 тон, проаналізовано споживану енергію та розмірний розподіл продукції. Встановлено, що через відмінності в швидкості обертання валка і розподіл зубів на валку, продукт руйнування демонструє менший вихід частинок +50 мм і дрібної фракції –6 мм, а також більший вміст частинок –50 + 6 мм. Авторами доведено достовірність отриманих експериментальних результатів і наголошено на ефективності руйнування грубих частинок та економії енергії за умови застосування валкових дробарок зі звичайними зубами (17].

1.3 Аналіз патентної інформації

Баттергем Робін Джон (18] запропонував удосконалений метод боротьби зі спрацьовуванням валків дробарок. Потреба в удосконаленні пояснюється втратами пропускної здатності, яка викликана простоем валкової дробарки для перекидання валків. Час простою для переналагодження валків може бути значним періодом, враховуючи великий розмір валків дробарки, які зазвичай використовуються в гірничодобувній промисловості, і такі питання, як вирівнювання змінних валків, які необхідно вирішити, щоб відновити роботу валкової дробарки зі змінними валками (18].

Згідно з цим винаходом передбачений валковий вузол дробарки для використання в гірничодобувній промисловості, що включає (18]:

- а) один або більше одного валка для подрібнення матеріалу, що подається, рулон або валки мають зовнішню поверхню, сформовану із зносостійкого матеріалу;

в) засіб, такий як зварювальний вузол, для нанесення твердого наплавленого матеріалу на поверхню валка або валків під час обертання валка або валків під час операції дроблення.

Вузол валкової дробарки (рис. 1.9), включає в себе пару протилежно обертових валків 3, при цьому один валок закріплений, а інший валок підтримується для поперечного переміщення і підпружинений за допомогою засобу (не показано) для створення постійного тиску на матеріал, що подається вниз через бункер 7 в область притискання 9 валків. (18]

Під час обертання валків у протилежних напрямках матеріал, що подається через бункер 7, спрямовується вниз через область притискання 9, матеріал подрібнюється під дією тиску, що чиниться валками 3, коли він рухається через область затискача 9. (18]

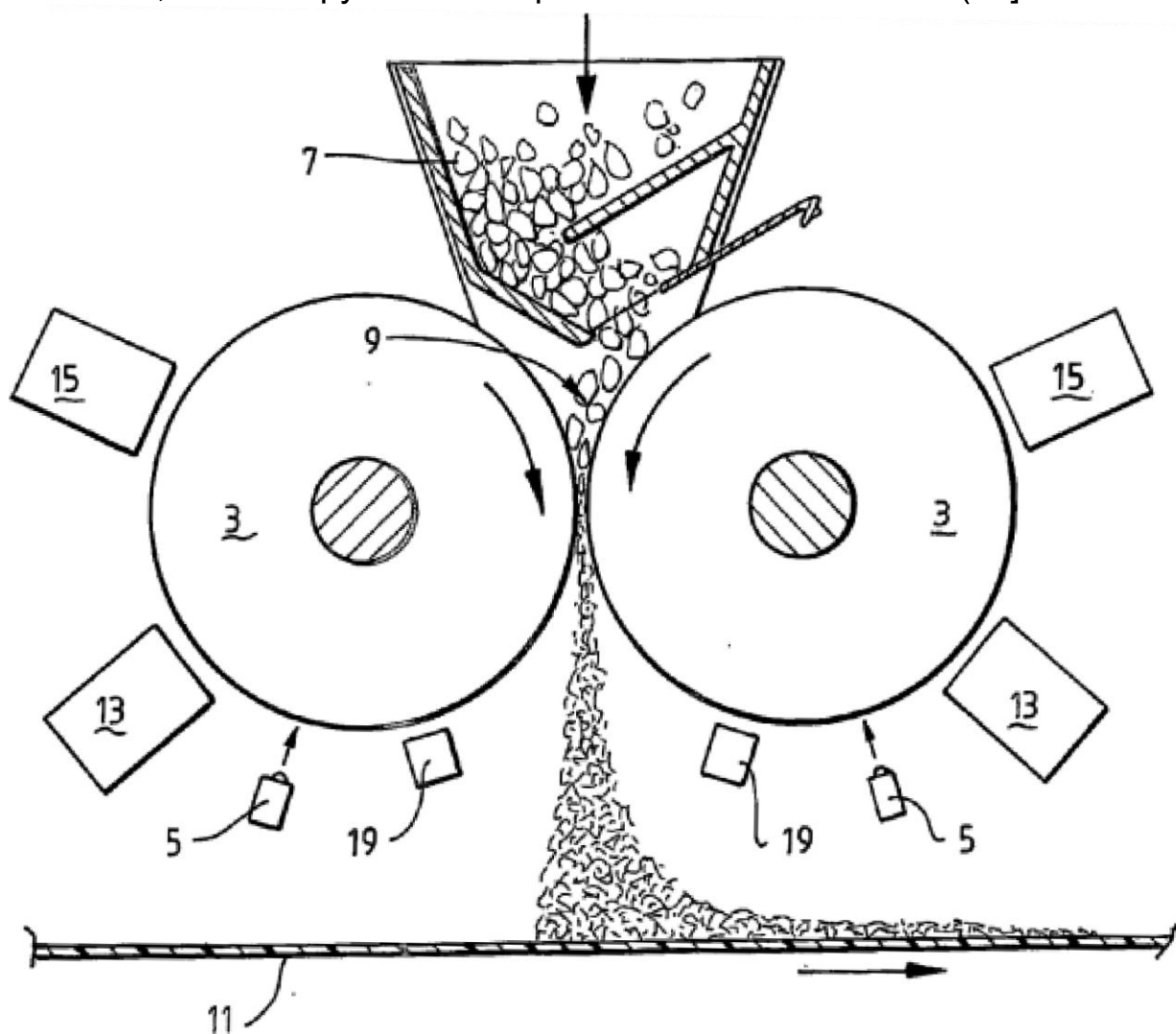


Рисунок 1.9- Схема корисної моделі дробарки (18]

Подрібнений матеріал переходить вниз з області прищіпки 9 на транспортер 11 і транспортером передається для подальшої переробки відповідно до вимог даної гірничої операції. (18]

Вузол валкової дробарки включає також вузли 19 для очищення поверхонь валків 3. Очисні вузли 19 розташовуються безпосередньо за течією від області прищіпки 9 у напрямку обертання валків. Відповідні очисні вузли включають щітки та скребки (не показані), які підтримують контакт з валками 3. (18]

Вузол валкової дробарки включає в себе також засоби контролю валків у вигляді оптичних систем виявлення 5, розташованих після очисних вузлів 19 для контролю поверхонь валків 3 і для визначення зносу валків 3 до такої міри, що валки вимагають ремонту. Оптичними системами виявлення може бути будь-яка відповідна система для виявлення валків на всю ширину 3, наприклад, лазерна система (не показана), встановлена на спеціально розробленій рамі, влаштованій таким чином, щоб мінімізувати вібрації. (18]

Вузол валкової дробарки також включає в себе засоби осадження у вигляді дугових зварювальних вузлів 13, розташованих нижче оптичних систем виявлення 5 для нанесення шарів твердого наплавленого матеріалу на поверхні валків для ремонту валків 3 при обертанні валків назад в область притискання 9. (18]

Зварювальні вузли 13 реагують на оптичні системи виявлення 5 і працюють для осадження твердого наплавленого матеріалу на секціях валків, які, як визначено, зношені настільки, що ремонт є необхідним. (18]

Зварювальний вузол 13 для кожного валка 3 включає дугову зварювальну головку (не показано), яка несе електрод, і каретку (не показано), яка підтримує головку для переміщення по ширині і по дузі окружності валка 3 для нанесення твердого наплавленого матеріалу на зношені ділянки валка 3. (18]

Як правило, твердим наплавним матеріалом є сплав, який має властивість утворювати крихкий наліт на поверхнях валків 3. (18]

Відповідно, вузол валкової дробарки включає в себе також станції термічної обробки 15, розташовані нижче зварювальних вузлів 13 для термічної обробки наплавленого матеріалу на валках 3 наплавленого матеріалу для підвищення в'язкості наплавленого матеріалу. Станція термічної обробки 15 для кожного валка 3 включає в себе пальник з підігрівом, який підтримується для переміщення по ширині і по дузі окружності валка 3 для вибіркової термічної обробки наплавленого матеріалу. (18]

Перевагами даної конструкції є:

- автоматизований мехатронний комплекс з відновлення поверхні бандажів валків дробилки;
- висока точність контролю рівню зношування та пошкодження поверхні бандажів;
- відновлення поверхні бандажу без зупинки обладнання на ремонт.

Недоліки:

- складність мехатронного комплексу;
- висока вартість системи;
- високі вимоги до чистоти поверхні бандажу та швидкості обертання;
- висока твердість поверхні бандажу знижує зчеплення з матеріалом, в умовах подрібнення дрібної фракції.

Райнхард Гіземанн, Харзевінкель; Річард Ерпельдінг та ін. (19] запропонували встановлення контрольних приладів для визначення та оцінки стану спрацьовування обертової поверхні. Потреба викликана тим, що об'єкт ремонтується через заздалегідь визначені проміжки часу, передчасний ремонт або обслуговування неможливі, і тому передчасний вихід обладнання з ладу та простої установки є критичними. На основі стану обертової поверхні валків прогнозується подальший знос та застосовують знижені параметри роботи дробарки зі зниженою продуктивністю, щоб не допустити подальшого надмірного швидкісного зносу та дробарка працювала до наступного технічного обслуговування. (19]

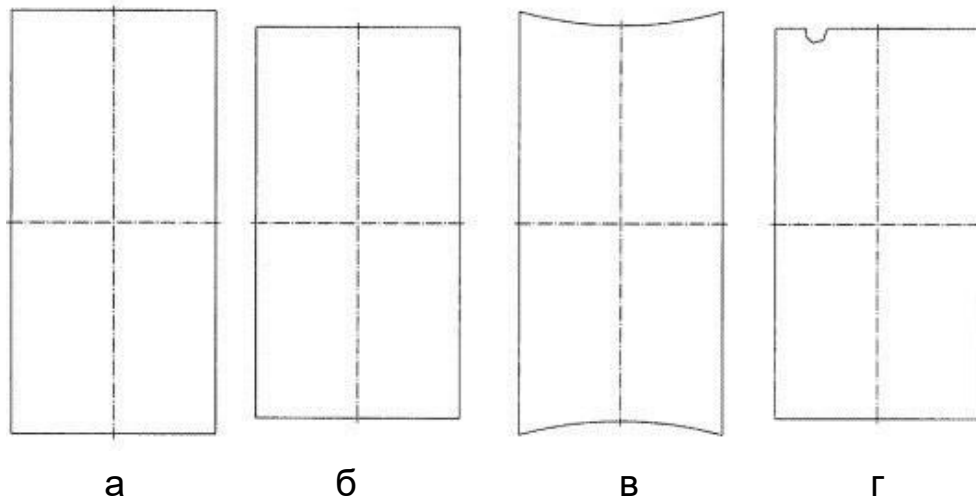


Рисунок 1.10 - Види спрацьовування валків (19]

На основі аналізу зносу валків (рис. 1.10), визначається тип зносу (б, в, г) при порівнянні з новим валком (а), та визначають необхідні зміни в роботі дробарки (19]:

- зміна налаштувань ступеня просіювання та/або стадії дроблення.
- зміна кількості води, що розпорошується в об'ємний матеріал.
- зміна контактного тиску принаймні одного шліфувального валка.
- зміна кількості подачі об'ємного матеріалу, що підлягає подрібненню.
- зміна швидкості обертання валків.

Переваги: висока надійність роботи обладнання, відсутність передчасних виходів з ладу, зниження навантаження на привод та елементи дробарки, простота конструкції.

Недоліки: непрогнозоване зниження продуктивності дробарки, зниження якості подрібненого матеріалу, через непроектні налаштування дробарки, складність при визначенні прогнозованого зносу та необхідних параметрів дробарки.

Лі Чжоувей, Шуай Чжункуй та ін. [20] запропонували встановити беззнімний ремонтний токарний верстат для обробки валків двовалкової дробарки. Потреба виникла через те, що робоча поверхня валків легко піддається корозії та стиранню, а єдиним способом відремонтувати валки є демонтаж всієї машини та транспортування валків на професійну фабрику для ремонту, що не тільки забирає час, збільшує витрати на ремонт, але й затримує графік роботи.

Ремонтний токарний верстат (рис. 1.11) представляє собою супорт, що здатен пересуватись вздовж вісі валка, на якому закріплено різцетримач, який здатен пересуватись поперек вісі валка. Привод пересування виконується вручну обертанням штурвалу.

По черзі обробляється один валок, потім вони змінюються місцями і обробляється другий валок.

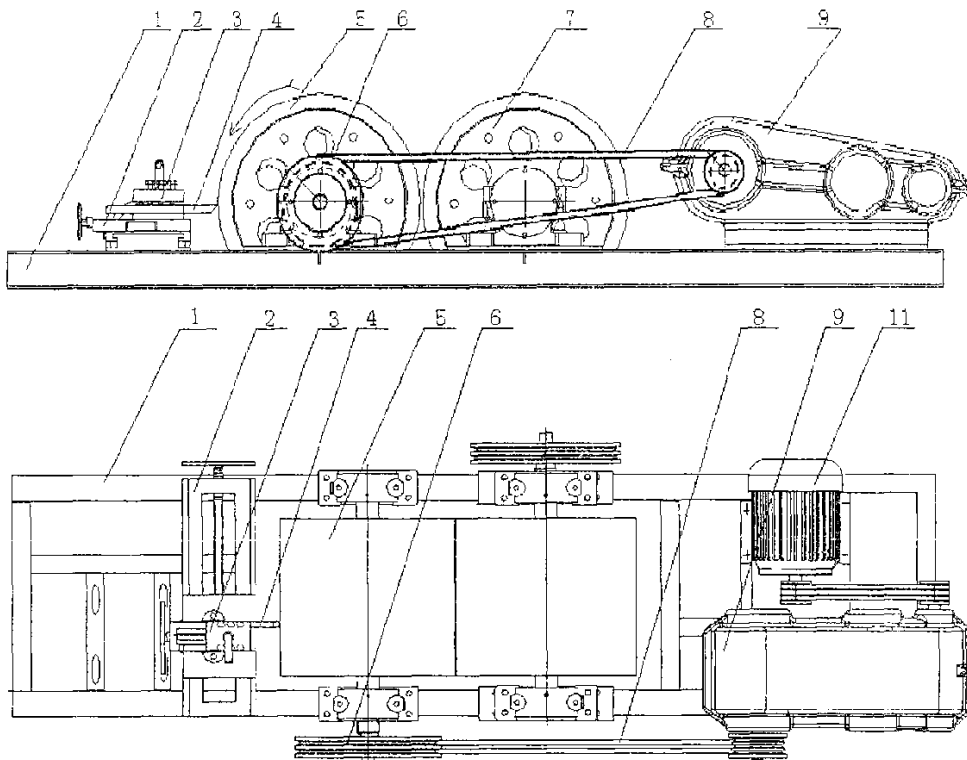


Рисунок 1.11- Незнімний ремонтний токарний верстат (20): 1- база верстата, 2- тримач для ножів, 3- нерухомий ніж, 4- токарний інструмент, 5- лівий валок, 6- лівий роликовий шків, 7- правий валок, 8- приводний ремінь, 9- коробка уповільнення, 11- мотор.

Переваги: простота конструкції, висока точність обробки.

Недоліки: для обробки другого валку необхідно валки переставляти, низька продуктивність через ручний привод подачі різця та супорта механізму обробки.

Висновки до розділу 1

На основі аналізу досвіду ремонту бандажів валків валкових дробилок зарубіжних та вітчизняних підприємств, можна стверджувати:

- доцільно проводити обробку бандажів валків, безпосередньо на обладнанні.
- для підвищення продуктивності, необхідно запровадити мехатронний комплекс;
- для керування мехатронним комплексом, необхідно розробити програмовану систему керування;
- для коректної роботи системи керування та підвищення якості обробки, необхідно мехатронний комплекс оснастити набором датчиків;
- впровадження системи керування дозволить проводити обробку двох валків одночасно;
- впровадження мехатронного комплексу з програмним керуванням зменшить час простою дробилки як мінімум вдвічі.

Розділ 2. Теоретичні дослідження.

2.1 Аналіз існуючого процесу відновлення

У шихтовому відділенні аглофабрики розташовано п'ять чотиривалкових дробилок для подрібнення коксової дрібноти.

Для підтримки якості подрібнення, кілька разів на зміну відбирається проба розсіву коксу, що подрібнено на дробилці, у випадку якщо фракція розсіву більше 3 мм складає більше 7%, оператор дробилок виконує регулювання проміжку між нижньою парою валків.

Приблизно 1 раз на добу, по черзі одну з дробарок зупиняють, оглядають поверхню бандажу на наявність дефектів (рис. 2.1) та визначають ступінь зносу бандажу вручну за допомогою лінійки (рис. 2.2). При виявленні дефектів, нерівномірному зносу: знос переважно в середній частині бандажу (рис. 2.2), або хвилеподібному (рис. 2.2) приймається рішення про виконання обточування бандажів нижньої пари валків за допомогою механізму обточки бандажів.

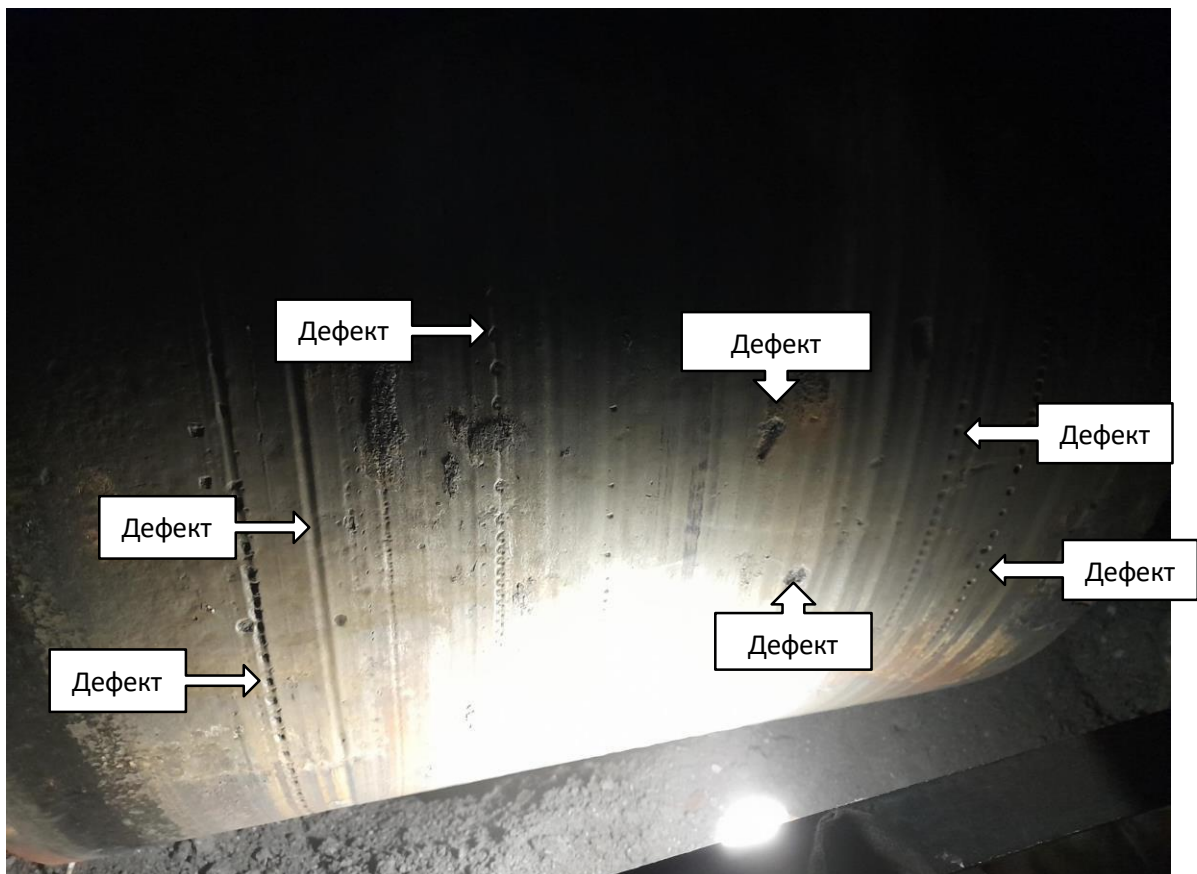


Рисунок 2.1- Огляд поверхні бандажу

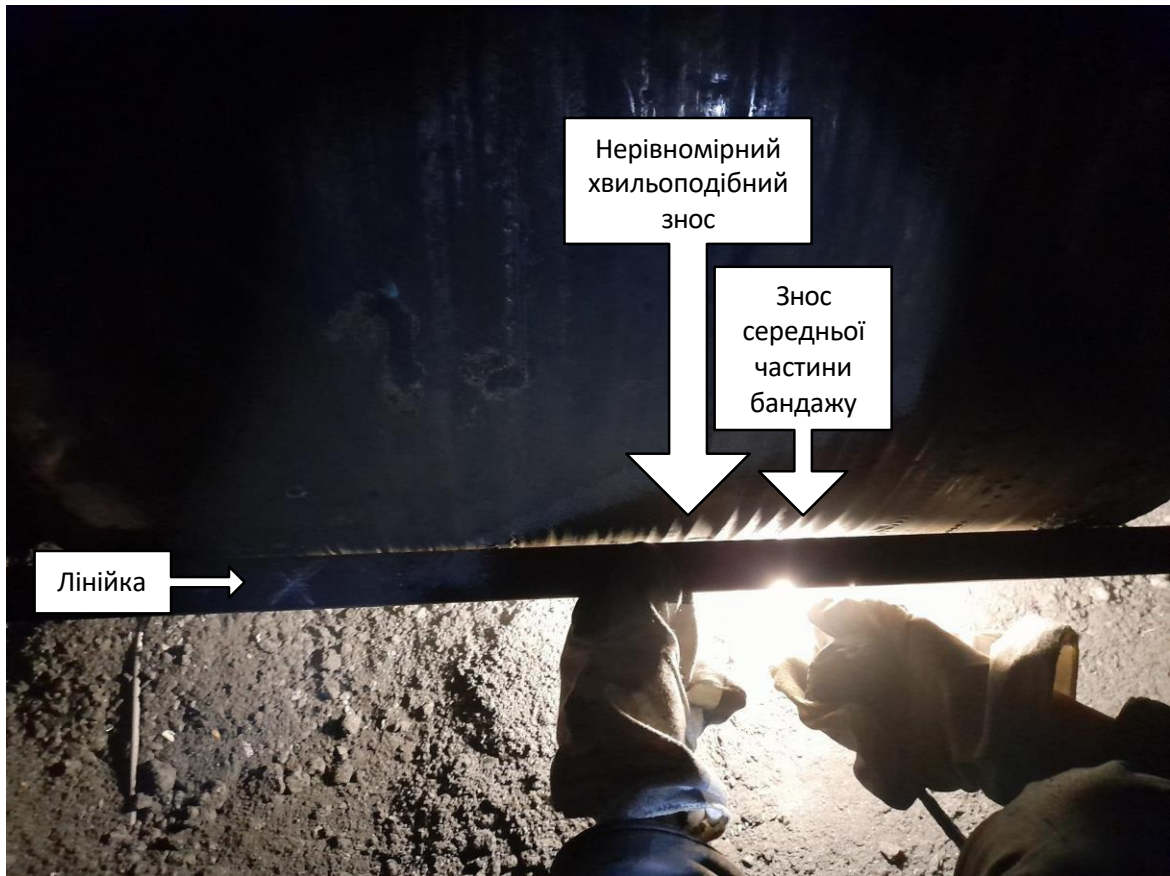


Рисунок 2.2- Визначення зносу бандажу за допомогою лінійки

Оператор механізму обточки бандажів визначає конусність бандажу (рис. 2.3).

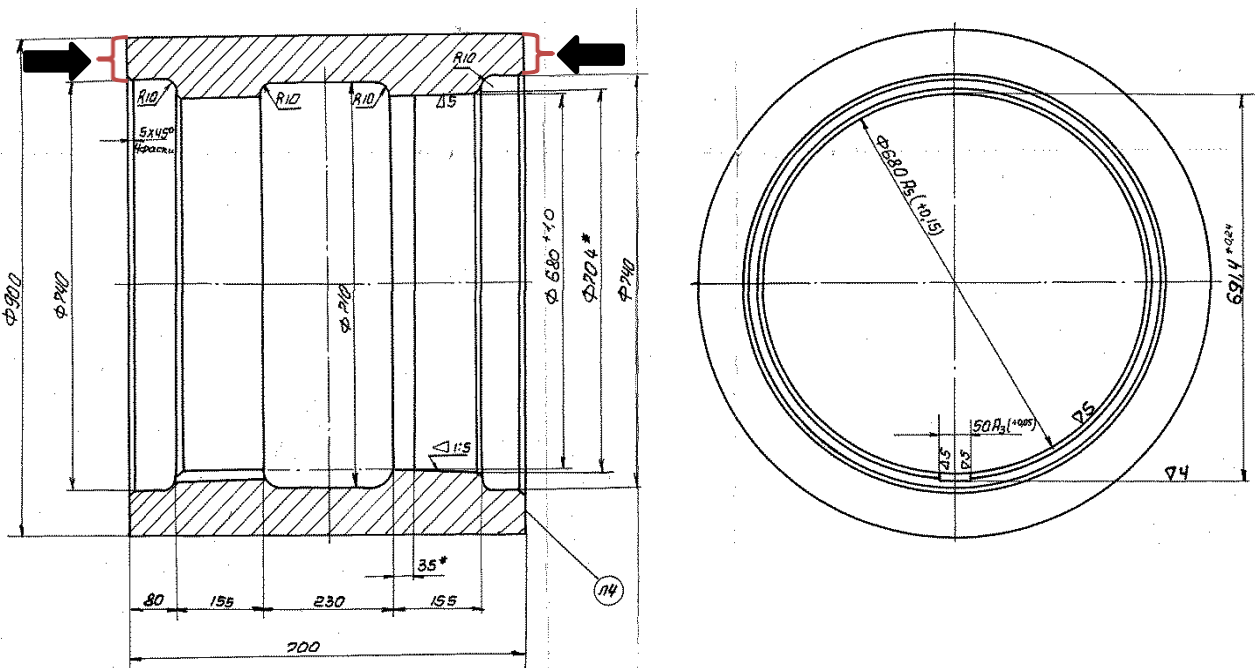


Рисунок 2.3 - Схема визначення конусності бандажу

Обточка починається з тієї сторони бандажу, де більша товщина.

Оператор встановлює різець в різцетримач, та фіксує за допомогою болтів, вручну за допомоги гайкового ключу регулює глибину різання, обертаючи гвинт гвинтової передачі різцетримача.

Обточка виконується при зупиненій подачі матеріалу, та увімкненому приводу обертання валків.

Оператор встановлює на пульті керування напрям подачі супорту, швидкість подачі та вмикає процес чорнової обточки.

Під час обточки оператор вручну регулює швидкість подачі, візуально визначаючи навантаження на привід подачі супорту, в залежності від навантаження швидкість збільшується або зменшується.

Таким чином під час чорнової обточки, вдається вирівняти поверхню та отримати циліндричну форму бандажу (рис. 2.4).

Після чорнової обробки, оператор прикладає до поверхні бандажу лінійку та визначає остаточну глибину різання для усунення дефектів поверхні бандажу.

Під час наступної обточки різець проходить вздовж всього бандажу. Після усунення дефектів, оператор перевіряє стан поверхні за допомогою лінійки та набору щупів, нерівномірність поверхні більше 0,3мм недопустима.

Валки обробляються аналогічно, по черзі.

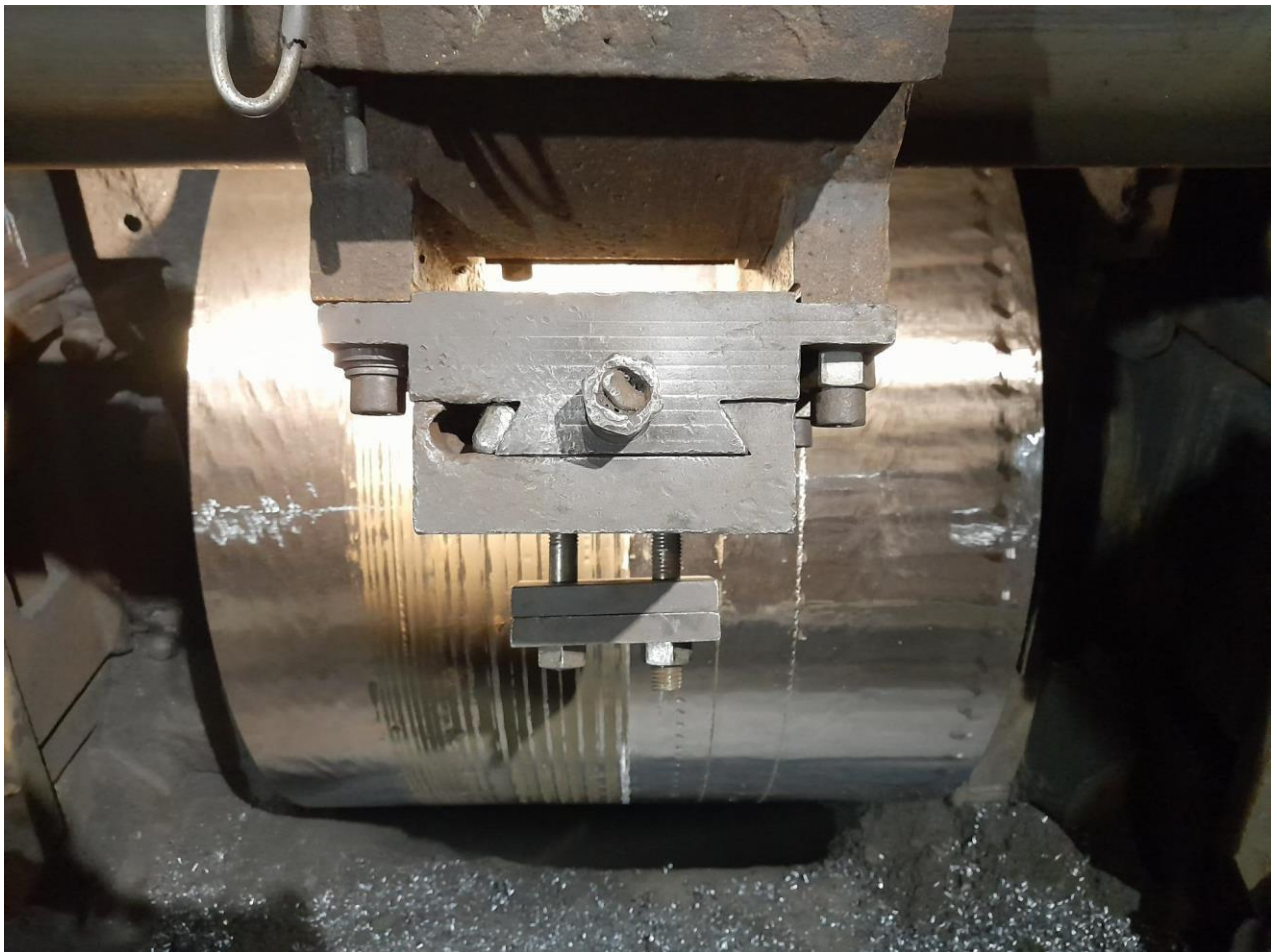


Рисунок 2.4- Завершення чорнової обточки бандажу

Періодичність обробки нижньої пари валків, орієнтовно 1 раз на тиждень.

Заміна нижньої пари валків виконується при зменшенні діаметру бандажу на 100мм. Заміна виконується орієнтовно 1 раз на 6 місяців.

Проточка бандажів нижніх валків за допомоги механізму проточки бандажів вимагає близько 6 годин та 2 працівника, через велику кількість ручної праці.

Вартість роботи одного працівника орієнтовно 275 грн./год.

2.2 Проблематика

При аналізі можна визначити наступні недоліки існуючої системи:

- Проточка бандажів вимагає постійного втручання двох працівників: один керує приводом з пульта керування, інший який знаходиться безпосередньо в небезпечній зоні обертання бандажів контролює процес обточки та подає команди.
- Визначення та налаштування параметрів обточки бандажів виконується вручну та переважно ґрунтуються на основі досвіду.
- Неможливо виконувати обробку більше одного бандажу не збільшуючи чисельність персоналу.
- Не оптимальні параметри приводу.

2.3 Концептуальна модель мехатронного комплексу

Для усунення перевищених вище недоліків, пропонується оснастити існуючий механізм обточки бандажів мехатронним комплексом (рис. 2.5), що буде складатись з:

- привода переміщення супорту (2), який через гвинтову передачу буде пересувати супорт вздовж вісі валка;
- привода зміни глибини різання (3), який через гвинтову передачу буде пересувати різець поперек вісі валка;
- керуючої програми (4), що забезпечить взаємодію приводів та контроль процесу обробки валків;
- керуючого пристрою (1), що забезпечить керування приводами, відповідно до керуючої програми.

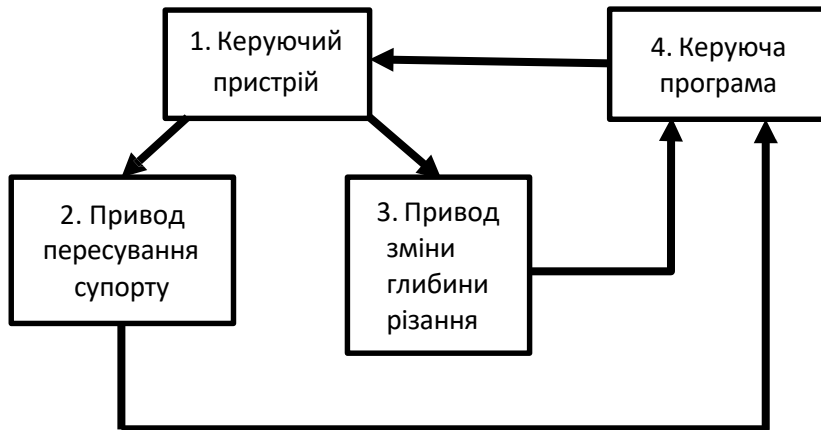


Рисунок 2.5 - Концептуальна модель мехатронного комплексу

Для впровадження мехатронного комплексу, необхідно:

- розрахувати зусилля різання, що з’являються під час обточки бандажів;
- на основі розрахованого зусилля різання, розрахувати оптимальні параметри переміщення супорту та глибини різання;
- виходячи з оптимальних параметрів переміщення супорту та глибини різання, розрахувати необхідну потужність приводів;
- на основі розрахунків параметрів приводів, обрати з каталогів приводи;
- обрати керуючий пристрій, що забезпечить керування цими приводами;
- розробити програмний комплекс управління для керуючого пристрою.

Розглянемо складові зусилля різання
Для визначення зусилля різання, розглянемо існуючу схему
обточки (рис. 2.6):

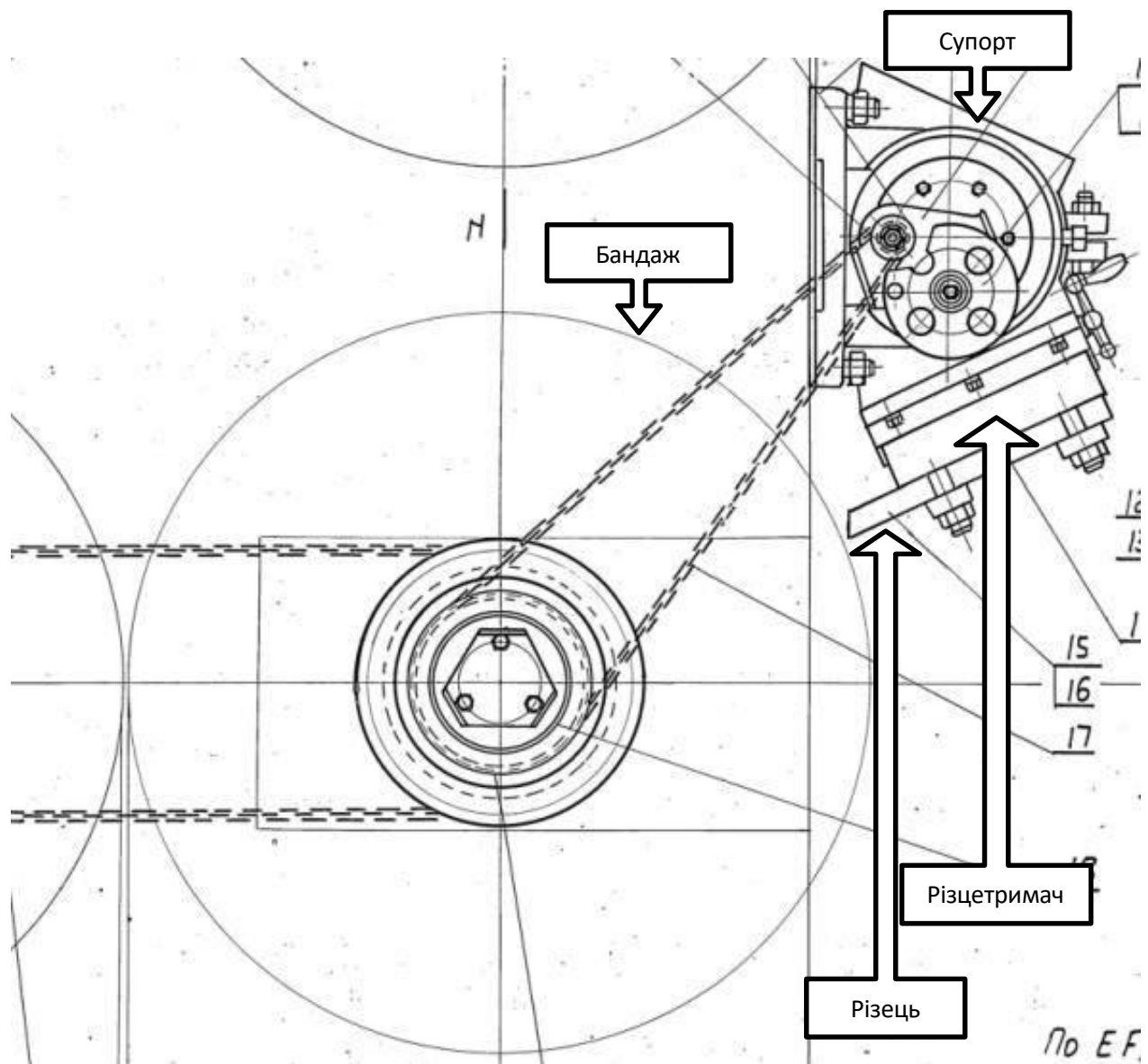


Рисунок 2.6 - Схема існуючого механізму обточки бандажів
Зусилля різання розглянемо на рис. 2.7.

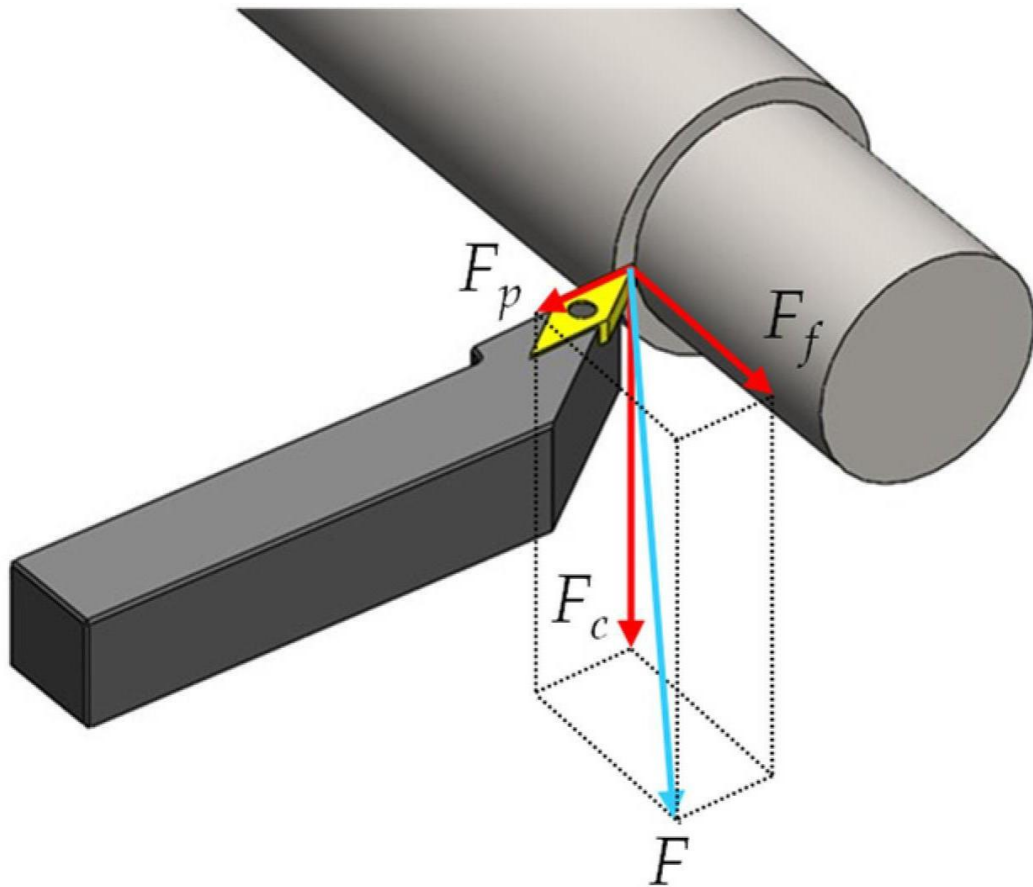


Рисунок 2.7- Складові зусилля різання [21]

До складу зусилля різання входять (тангенціальна F_c , радіальна F_p та осьова F_f сили).

2.4 Розрахунок оптимальних параметрів подачі та глибини різання

При зовнішньому повздовжньому та поперечному точінні, розточуванні, відрізання, прорізання та фасонному точінні тангенціальну (F_c), осьову (F_f) та радіальну (F_p) складові розраховують за формулою (22, с. 105]:

$$F_c (F_f, F_p) = C_p \cdot t^{xp} \cdot s_{yp} \cdot v^{np} \cdot K_p \quad (2.1)$$

де, C_p – табличний коефіцієнт.

t – глибина різання, мм.

x_p – табличний коефіцієнт.

s – подача супорту, мм/об.

y_p – табличний коефіцієнт.

v – швидкість різання, м/хв.

η_p – табличний коефіцієнт.

K_p – коректувальний коефіцієнт, що враховує геометричні параметри різця.

Швидкість різання, розраховується за формулою [22, с. 99]:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3.14 \cdot 940 \cdot 92.3}{1000} = 272.4 \frac{\text{м}}{\text{хв.}} \quad (2.2)$$

де, $\pi = 3,14$ – число Пі.

$D = 940$ мм – діаметр бандажу згідно креслення поданого в додатку В.

$n = 92,3$ об/хв. – частота обертання валка при обробці, згідно характеристик дробилки (1).

Коректуючий коефіцієнт, що враховує геометричні параметри різця, визначається множенням ряду коефіцієнтів та рахується за формулою (22, с. 105):

$$K_p = K_{MP} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{r p} = 1,24 \cdot 0,89 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,214 \quad (2.3)$$

де, $K_{\varphi p} = 0,89$ – коефіцієнт, що враховує головний кут різця [22, с. 331].

$K_{\gamma p} = 1,1$ - коефіцієнт, що враховує передній кут різця [22, с. 331].

$K_{\lambda p} = 1,0$ - коефіцієнт, що враховує кут нахилу головного леза різця (22, с. 331).

$K_{r p} = 1,0$ - коефіцієнт, що враховує радіус при вершині різця [22, с. 331].

K_{MP} – коефіцієнт, що враховує вплив механічних властивостей деталі що обробляється на зусилля різання.

Коефіцієнт, що враховує вплив механічних властивостей деталі що обробляється на зусилля різання та розраховується за формулою (22, с. 324]:

$$K_{MP} = \left(\frac{\sigma_B}{75}\right)^{n_p} = \left(\frac{99,9}{75}\right)^{0,75} = 1,24 \quad (2.4)$$

де, $\sigma_B = 980 \text{ Н/мм}^2 = 99,9 \text{ кг/мм}^2$ – міцність на розрив [23] для матеріалу бандажу (Сталь 65Г) згідно креслення (додаток А).

$n_p = 0,75$ – коефіцієнт, що враховує матеріал деталі та різця (22, с. 324].

Враховуючи те, що конструкція дробарки, не дозволяє змінювати швидкість різання та потужність приводу обертання валків, потрібно визначити оптимальні параметри глибину різання та подачі супорту, для цього розрахуємо максимальну тангенціальну складову зусилля різання для існуючого приводу.

Обертальний момент бандажу валка розраховується за формулою [22, с. 106]:

$$T = \frac{N \cdot \eta \cdot 6120}{v} = \frac{37 \cdot 0,85 \cdot 6120}{272,4} = 706,6 \text{ кгс} \quad (2.5)$$

де, $N = 37 \text{ кВт}$ – потужність електродвигуна приводу обертання валків при обробці, згідно характеристик дробилки (таблиця 1.1).

$\eta \approx 0,85$ – коефіцієнт корисної дії.

Порахуємо тангенціальну складову зусилля різання за формулою (2.1) :

$$F_c = 300 \cdot t^{1,0} \cdot s^{0,75} \cdot 272,4^{0,15} \cdot 1,214 \quad (2.6)$$

де, $C_p = 300$ – коефіцієнт для тангенціальної складової [22, с. 329].

t – глибина різання, мм.;

$x_p = 1,0$ – коефіцієнт для тангенціальної складової [22, с. 329].

s – подача супорту, мм/об.

$y_p = 0,75$ - коефіцієнт для тангенціальної складової [22, с. 329].

v – швидкість різання, м/хв.

$n_p = -0,15$ - коефіцієнт для тангенціальної складової [22, с. 329].

K_p – коректувальний коефіцієнт, що враховує геометричні параметри різця.

Розрахуємо осьову складову за формулою (2.1):

$$F_f = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{n_p} \cdot K_p = 339 \cdot t^{1,0} \cdot s^{0,5} \cdot 272,4^{0,4} \cdot 1,214 \quad (2.7)$$

де, $C_p = 339$ – коефіцієнт для осьової складової [5, с. 329].

t – глибина різання, мм.

$x_p = 1,0$ – коефіцієнт для осьової складової [5, с. 329].

s – подача супорту, мм/об.

$y_p = 0,5$ - коефіцієнт для осьової складової [5, с. 329].

v – швидкість різання, м/хв.

$n_p = -0,4$ - коефіцієнт для осьової складової [5, с. 329].

K_p – коректуючий коефіцієнт, що враховує геометричні параметри різця.

Розрахуємо радіальну складову за формулою (2.1):

$$F_p = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{n_p} \cdot K_p = 243 \cdot t^{0,9} \cdot s^{0,6} \cdot 272,4^{0,3} \cdot 1,214 \quad (2.8)$$

де, $C_p = 243$ – коефіцієнт для радіальної складової [5, с. 329].

t – глибина різання, мм.

$x_p = 0,9$ – коефіцієнт для радіальної складової [5, с. 329].

s – подача супорту, мм/об.

$y_p = 0,6$ - коефіцієнт для радіальної складової [5, с. 329].

v – швидкість різання, м/хв.

$n_p = -0,3$ - коефіцієнт для радіальної складової [5, с. 329].

K_p – коректуючий коефіцієнт, що враховує геометричні параметри різця.

Отримані функції (2.6; 2.7; 2.8) неможливо розв'язати математичним шляхом, тому що є дві невідомі змінні. Для розв'язання цього рівняння, необхідно зробити ряд припущень:

- розрахунок проводити для найбільш навантаженого режиму точіння (чорнове).
- глибина точіння не повинна перебільшувати 3мм.

Відповідно до рекомендацій для чорнового точіння, при обробці легованої деталі діаметром 940 мм, значення подачі супорту повинні знаходитись в діапазоні 1,2-;1,8 мм. Крім того слід врахувати неоднорідність поверхні, та використати до значень подачі супорту коефіцієнт 0,85 (22, с. 326).

Розрахуємо рекомендовані значення подачі супорту:

$$1,2 \cdot 0,85 \div 1,8 \cdot 0,85 \approx 1,0 \div 1,5 \quad (2.9)$$

Розрахуємо за формулами (2.6; 2.7; 2.8) для кожного рекомендованого значення подачі супорту та глибини точіння тангенціальну, вісьову та радіальні складові та зведемо дані до таблиць 2.1; 2.2; 2.3.

Таблиця 2.1- Розрахунок тангенціальної складової

t	s	Fc	s	Fc	s	Fc	s	Fc	s	Fc	s	Fc
1	1	156,9	1,1	168,5	1,2	179,9	1,3	191,0	1,4	201,9	1,5	212,6
1,1	1	172,6	1,1	185,4	1,2	197,9	1,3	210,1	1,4	222,1	1,5	233,9
1,2	1	188,3	1,1	202,2	1,2	215,8	1,3	229,2	1,4	242,3	1,5	255,2
1,3	1	204,0	1,1	219,1	1,2	233,8	1,3	248,3	1,4	262,5	1,5	276,4
1,4	1	219,6	1,1	235,9	1,2	251,8	1,3	267,4	1,4	282,7	1,5	297,7
1,5	1	235,3	1,1	252,8	1,2	269,8	1,3	286,5	1,4	302,9	1,5	319,0
1,6	1	251,0	1,1	269,6	1,2	287,8	1,3	305,6	1,4	323,1	1,5	340,2
1,7	1	266,7	1,1	286,5	1,2	305,8	1,3	324,7	1,4	343,3	1,5	361,5
1,8	1	282,4	1,1	303,3	1,2	323,8	1,3	343,8	1,4	363,5	1,5	382,8
1,9	1	298,1	1,1	320,2	1,2	341,8	1,3	362,9	1,4	383,6	1,5	404,0
2	1	313,8	1,1	337,0	1,2	359,7	1,3	382,0	1,4	403,8	1,5	425,3
2,1	1	329,5	1,1	353,9	1,2	377,7	1,3	401,1	1,4	424,0	1,5	446,5
2,2	1	345,1	1,1	370,7	1,2	395,7	1,3	420,2	1,4	444,2	1,5	467,8
2,3	1	360,8	1,1	387,6	1,2	413,7	1,3	439,3	1,4	464,4	1,5	489,1
2,4	1	376,5	1,1	404,4	1,2	431,7	1,3	458,4	1,4	484,6	1,5	510,3
2,5	1	392,2	1,1	421,3	1,2	449,7	1,3	477,5	1,4	504,8	1,5	531,6
2,6	1	407,9	1,1	438,1	1,2	467,7	1,3	496,6	1,4	525,0	1,5	552,9
2,7	1	423,6	1,1	455,0	1,2	485,7	1,3	515,7	1,4	545,2	1,5	574,1
2,8	1	439,3	1,1	471,8	1,2	503,6	1,3	534,8	1,4	565,4	1,5	595,4
2,9	1	455,0	1,1	488,7	1,2	521,6	1,3	553,9	1,4	585,6	1,5	616,7
3	1	470,7	1,1	505,5	1,2	539,6	1,3	573,0	1,4	605,8	1,5	637,9

Нижче подано графіки зміни зусиль.

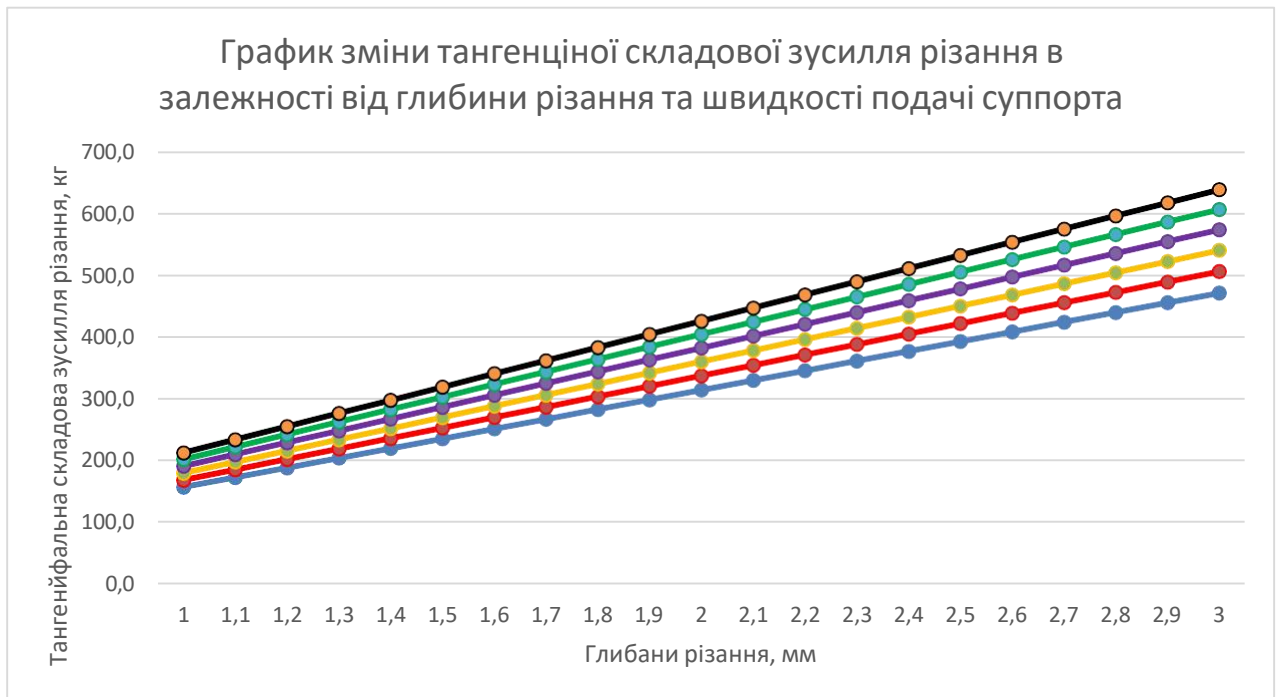


Рисунок 2.8- Графік зміни тангенціальної складової зусилля різання в залежності від глибини різання та швидкості подачі супорта: **Подача 1,0 мм** **Подача 1,1 мм** **Подача 1,2 мм** **Подача 1,3 мм** **Подача 1,4 мм** **Подача 1,5 мм**.

З рисунку 2.8 можна побачити, що величина тангенціальної складової зусилля різання прямо пропорційна величині подачі супорта та глибині різання.

Значення тангенціальної складової зусилля різання при глибині різання 3 мм та подачі супорта 1,5 мм/об складає 637,9 кгс.

Розрахуємо похибку за формулою:

$$\Delta = \frac{(T, F_c)}{T} \cdot 100\% = \frac{(706,6, 637,9)}{706,6} \cdot 100\% = 9,72\% \quad (2.10)$$

Таблиця 2.2- Розрахунок радіальної складової

t	s	Fp	s	Fp	s	Fp	s	Fp	s	Fp	s	Fp
1	1	45,8	1,1	45,8	1,2	47,9	1,3	49,8	1,4	51,7	1,5	53,5
1,1	1	50,4	1,1	50,4	1,2	52,6	1,3	54,8	1,4	56,9	1,5	58,9
1,2	1	55,0	1,1	55,0	1,2	57,4	1,3	59,8	1,4	62,0	1,5	64,2
1,3	1	59,6	1,1	59,6	1,2	62,2	1,3	64,8	1,4	67,2	1,5	69,6
1,4	1	64,1	1,1	64,1	1,2	67,0	1,3	69,7	1,4	72,4	1,5	74,9
1,5	1	68,7	1,1	68,7	1,2	71,8	1,3	74,7	1,4	77,5	1,5	80,3
1,6	1	73,3	1,1	73,3	1,2	76,6	1,3	79,7	1,4	82,7	1,5	85,6
1,7	1	77,9	1,1	77,9	1,2	81,4	1,3	84,7	1,4	87,9	1,5	91,0
1,8	1	82,5	1,1	82,5	1,2	86,1	1,3	89,7	1,4	93,0	1,5	96,3
1,9	1	87,1	1,1	87,1	1,2	90,9	1,3	94,6	1,4	98,2	1,5	101,7
2	1	91,6	1,1	91,6	1,2	95,7	1,3	99,6	1,4	103,4	1,5	107,0
2,1	1	96,2	1,1	96,2	1,2	100,5	1,3	104,6	1,4	108,5	1,5	112,4
2,2	1	100,8	1,1	100,8	1,2	105,3	1,3	109,6	1,4	113,7	1,5	117,7
2,3	1	105,4	1,1	105,4	1,2	110,1	1,3	114,6	1,4	118,9	1,5	123,1
2,4	1	110,0	1,1	110,0	1,2	114,9	1,3	119,5	1,4	124,1	1,5	128,4
2,5	1	114,5	1,1	114,5	1,2	119,6	1,3	124,5	1,4	129,2	1,5	133,8
2,6	1	119,1	1,1	119,1	1,2	124,4	1,3	129,5	1,4	134,4	1,5	139,1
2,7	1	123,7	1,1	123,7	1,2	129,2	1,3	134,5	1,4	139,6	1,5	144,5
2,8	1	128,3	1,1	128,3	1,2	134,0	1,3	139,5	1,4	144,7	1,5	149,8
2,9	1	132,9	1,1	132,9	1,2	138,8	1,3	144,4	1,4	149,9	1,5	155,2
3	1	137,5	1,1	137,5	1,2	143,6	1,3	149,4	1,4	155,1	1,5	160,5

Нижче подано графіки зміни зусиль.

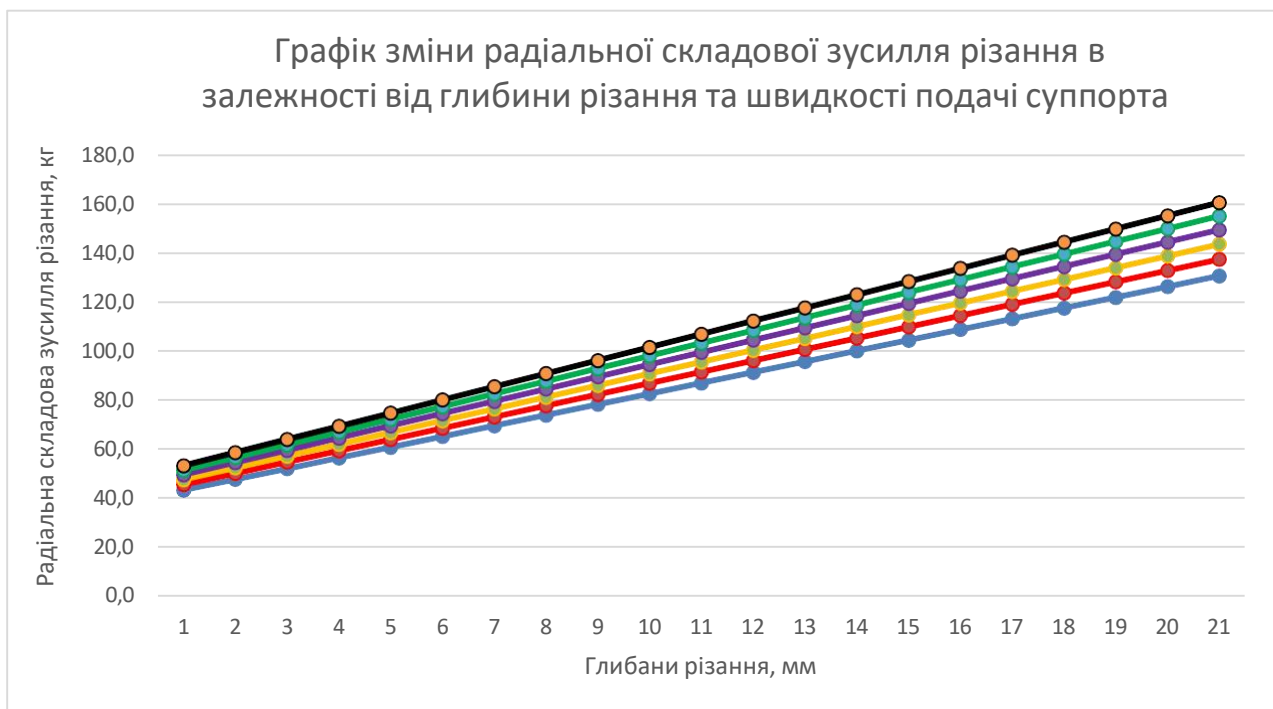


Рисунок 2.9 - Графік зміни радіальної складової зусилля різання в залежності від глибини різання та швидкості подачі супорта: **Подача 1,0 мм** **Подача 1,1 мм** **Подача 1,2 мм** **Подача 1,3 мм** **Подача 1,4 мм** **Подача 1,5 мм**

З рисунку 2.9 можна побачити, що величина радіальної складової зусилля різання прямо пропорційна величині подачі супорта та глибині різання.

Таблиця 2.3 - Розрахунок осьової складової

t	s	Ff	s	Ff	s	Ff	s	Ff	s	Ff	s	Ff
1	1	54,8	1,1	58,0	1,2	61,1	1,3	64,1	1,4	67,0	1,5	69,8
1,1	1	59,7	1,1	63,2	1,2	66,6	1,3	69,8	1,4	73,0	1,5	76,1
1,2	1	64,5	1,1	68,3	1,2	72,0	1,3	75,5	1,4	78,9	1,5	82,3
1,3	1	69,3	1,1	73,4	1,2	77,4	1,3	81,2	1,4	84,8	1,5	88,4
1,4	1	74,1	1,1	78,5	1,2	82,7	1,3	86,8	1,4	90,7	1,5	94,5
1,5	1	78,9	1,1	83,5	1,2	88,0	1,3	92,3	1,4	96,5	1,5	100,6
1,6	1	83,6	1,1	88,5	1,2	93,2	1,3	97,8	1,4	102,3	1,5	106,6
1,7	1	88,3	1,1	93,5	1,2	98,5	1,3	103,3	1,4	108,0	1,5	112,6
1,8	1	92,9	1,1	98,4	1,2	103,7	1,3	108,8	1,4	113,7	1,5	118,5
1,9	1	97,6	1,1	103,3	1,2	108,8	1,3	114,2	1,4	119,4	1,5	124,4
2	1	102,2	1,1	108,2	1,2	114,0	1,3	119,6	1,4	125,0	1,5	130,3
2,1	1	106,8	1,1	113,0	1,2	119,1	1,3	125,0	1,4	130,6	1,5	136,2

2,2	1	111,3	1,1	117,9	1,2	124,2	1,3	130,3	1,4	136,2	1,5	142,0
2,3	1	115,9	1,1	122,7	1,2	129,3	1,3	135,6	1,4	141,8	1,5	147,8
2,4	1	120,4	1,1	127,5	1,2	134,3	1,3	140,9	1,4	147,3	1,5	153,5
2,5	1	124,9	1,1	132,2	1,2	139,3	1,3	146,2	1,4	152,8	1,5	159,3
2,6	1	129,4	1,1	137,0	1,2	144,3	1,3	151,4	1,4	158,3	1,5	165,0
2,7	1	133,9	1,1	141,7	1,2	149,3	1,3	156,7	1,4	163,8	1,5	170,7
2,8	1	138,3	1,1	146,4	1,2	154,3	1,3	161,9	1,4	169,2	1,5	176,4
2,9	1	142,7	1,1	151,1	1,2	159,2	1,3	167,1	1,4	174,7	1,5	182,1
3	1	147,2	1,1	155,8	1,2	164,2	1,3	172,3	1,4	180,1	1,5	187,7

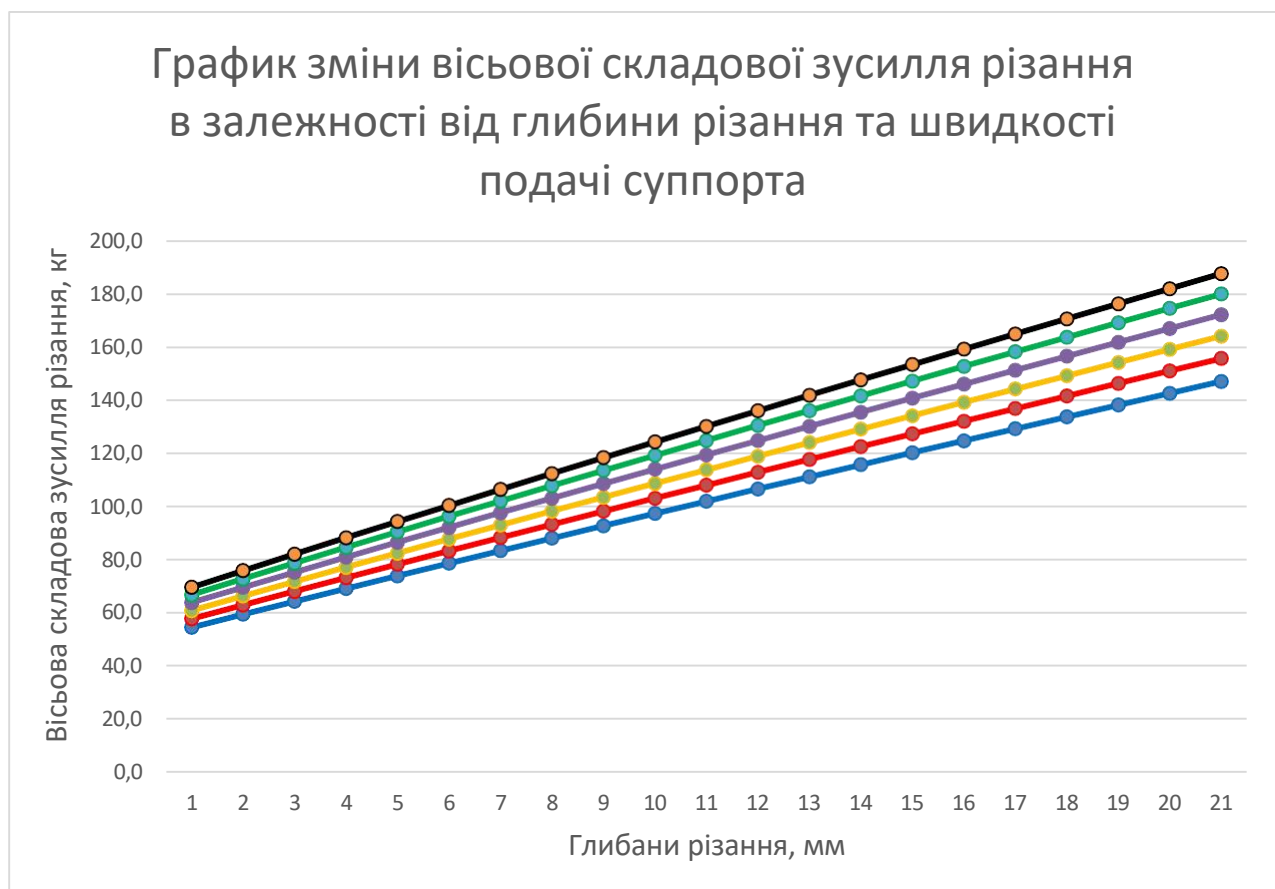


Рисунок 2.10 - Графік зміни осьової складової зусилля різання в залежності від глибини різання та швидкості подачі суппорта: **Подача 1,0 мм** **Подача 1,1 мм** **Подача 1,2 мм** **Подача 1,3 мм** **Подача 1,4 мм** **Подача 1,5 мм**

З рисунку 2.10 можна побачити, що величина вісьової складової зусилля різання прямо пропорційна величині подачі суппорта та глибині різання.

Порахуємо зусилля різання за теоремою Піфагора:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2.11)$$

Дані зведемо до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Зусилля різання

t	F (s=1мм)	F (s=1.1мм)	F (s=1.2мм)	F (s=1.3мм)	F (s=1.4мм)	F (s=1.5мм)
1	171,8	184,0	195,9	207,5	218,9	230,1
1,1	188,8	202,2	215,3	228,1	240,6	252,9
1,2	205,8	220,4	234,7	248,6	262,3	275,7
1,3	222,7	238,6	254,0	269,1	283,9	298,5
1,4	239,7	256,8	273,4	289,6	305,6	321,2
1,5	256,6	274,9	292,7	310,1	327,2	343,9
1,6	273,8	293,4	312,4	330,9	349,1	367,0
1,7	290,8	311,5	331,7	351,4	370,8	389,8
1,8	307,7	329,7	351,0	371,9	392,4	412,5
1,9	324,7	347,8	370,4	392,4	414,0	435,2
2	341,6	366,0	389,7	412,9	435,6	457,9
2,1	358,5	384,1	409,0	433,4	457,2	480,6
2,2	375,5	402,2	428,3	453,8	478,8	503,3
2,3	392,4	420,4	447,6	474,3	500,4	526,0
2,4	409,3	438,5	466,9	494,7	522,0	548,7
2,5	426,2	456,6	486,2	515,2	543,5	571,4
2,6	443,1	474,7	505,5	535,6	565,1	594,1
2,7	460,0	492,8	524,8	556,0	586,7	616,7
2,8	476,9	510,9	544,0	576,5	608,2	639,4
2,9	493,7	529,0	563,3	596,9	629,8	662,1
3	510,6	547,1	582,6	617,3	651,3	684,7

Нижче подано графіки зміни зусиль.

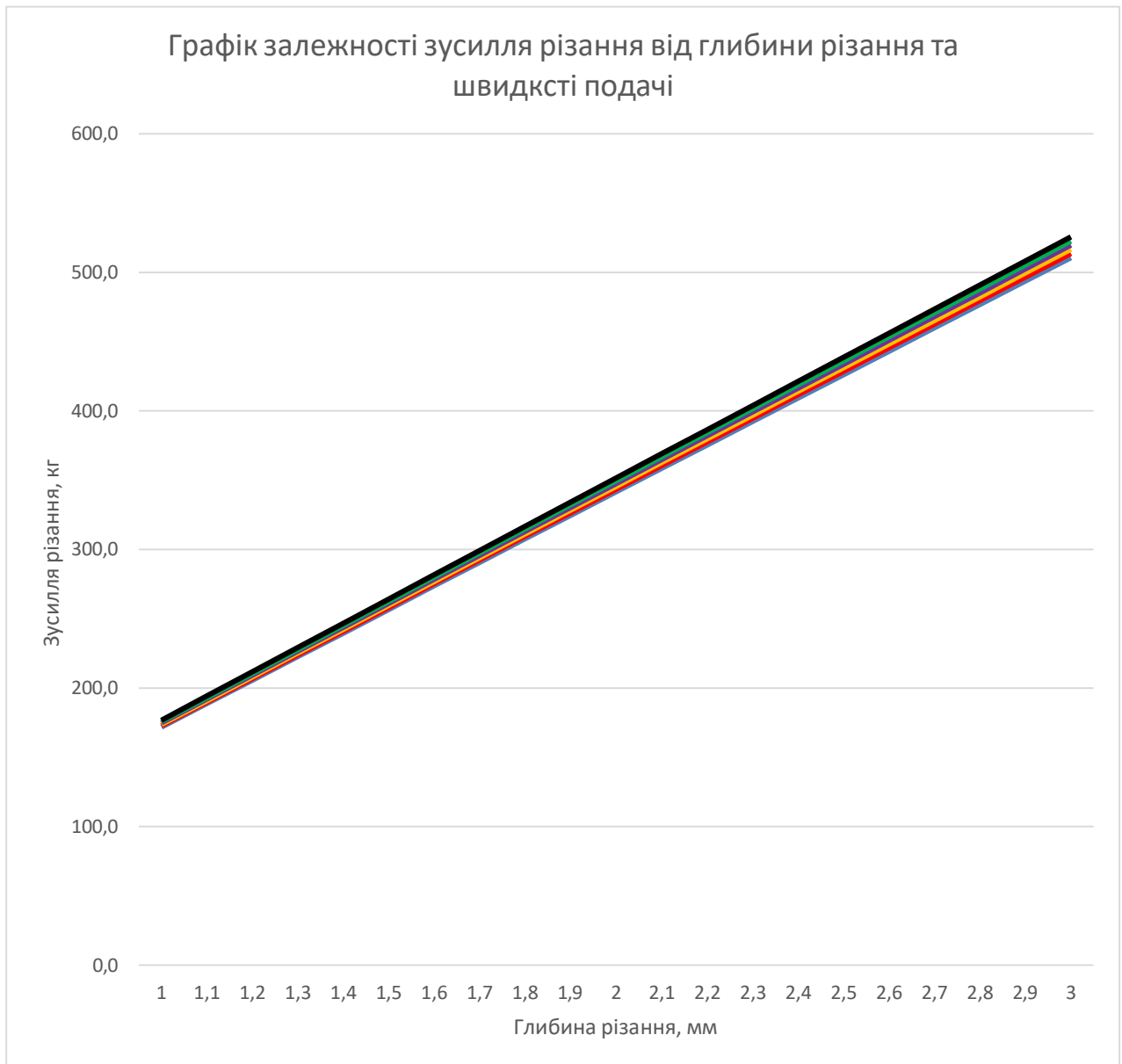


Рисунок 2.11 - Графік залежності зусилля різання від глибини різання та швидкості подачі: **Подача 1,0 мм** **Подача 1,1 мм** **Подача 1,2 мм** **Подача 1,3 мм** **Подача 1,4 мм** **Подача 1,5 мм**

Як можна побачити з рисунку 2.11, зусилля різання прямо пропорційне глибині різання, проте швидкість подачі суттєво не впливає на величину зусилля різання.

2.5 Розрахунок приводу подачі супорта.

Розрахуємо ККД гвинтової передачі з трапецеподібною різзю за формулою [24]:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\operatorname{tg}(\beta + \rho)} = \frac{\operatorname{tg}(15^\circ)}{\operatorname{tg}(15^\circ + 8^\circ)} = 0,63 \quad (2.12)$$

де β - кут підйому гвинтової лінії різьби.

$\rho = 8^\circ$ - кут тертя. (25, с. 217]

$$\beta = 0,5 \cdot \alpha = 0,5 \cdot 30^\circ = 15^\circ \quad (2.13)$$

де $\alpha = 30^\circ$ - кут профілю трапецієвидної різьби. (26]

Оскільки швидкість подачі супорту досягає 1,5 мм за 1 оберт валка, то визначимо фактичну швидкість пересування супорту за формулою:

$$s_{\text{факт}} = s \cdot n = 1,5 \cdot 92,3 = 138,45 \text{ мм/хв.} \quad (2.14)$$

Розрахуємо необхідний обертальний момент для подолання осьової складової зусилля різання за формулою (24]:

$$\begin{aligned} M_{\text{об}} &= 0,5 \cdot F_f \cdot g \cdot d_{\text{гв}} \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho) = \\ &= 0,5 \cdot 187,7 \cdot 9,81 \cdot 0,036 \cdot \operatorname{tg}(15^\circ + 8^\circ) = 14,07 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.15)$$

де $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння.

$d_{\text{гв}} = 0,036\text{м}$ – діаметр гвинту, згідно креслення (додаток Г).

Розрахуємо необхідну частоту обертання гвинта за формулою:

$$n_{\text{гв}} = \frac{s_{\text{факт}}}{p} = \frac{138,45}{6} = 23 \text{ об./хв.} \quad (2.16)$$

де $p = 6\text{мм}$ – крок різьби, відповідно креслення (додаток Г).

Розрахуємо необхідну потужність електродвигуна приводу за формулою (25, с. 23]:

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_p \cdot g \cdot D \cdot \pi \cdot n_{\text{ГВ}}}{\eta \cdot 60} = \frac{187,7 \cdot 9,81 \cdot 0,036 \cdot 3,14 \cdot 23}{0,63 \cdot 60} = 126,7 \text{ Вт} \quad (2.17)$$

2.6 Розрахунок приводу зміни глибини різання

Розрахуємо ККД гвинтової передачі з трапеце подібною різцю за формулою [24]:

$$\eta = \frac{\text{tg}(\beta)}{\text{tg}(\beta + \rho)} = \frac{\text{tg}(15^\circ)}{\text{tg}(15^\circ + 8^\circ)} = 0,63 \quad (2.18)$$

Розрахуємо необхідний обертальний момент для подолання радіальної складової зусилля різання за формулою [24]:

$$\begin{aligned} M_{\text{об}} &= 0,5 \cdot F_p \cdot g \cdot d_{\text{ГВ}} \cdot \text{tg}(\beta + \rho) = \\ &= 0,5 \cdot 160,5 \cdot 9,81 \cdot 0,02 \cdot \text{tg}(15^\circ + 8^\circ) = 6,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.19)$$

де $d_{\text{ГВ}} = 0,02\text{м}$ – діаметр гвинту, згідно креслення (Рисунок Г).

Розрахуємо необхідну частоту обертання гвинта за формулою:

$$n_{\text{ГВ}} = \frac{s_p}{p} = \frac{60}{4} = 15 \text{ об./хв.} \quad (2.20)$$

де $s_p = 60 \text{ мм/хв.}$ – швидкість пересування різцю.

$p = 4 \text{ мм}$ – крок різі, відповідно креслення (додаток Г).

Розрахуємо необхідну потужність електродвигуна приводу за формулою [25, с. 23]:

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_p \cdot g \cdot D \cdot \pi \cdot n_{\text{гв}}}{\eta \cdot 60} = \frac{160,5 \cdot 9,81 \cdot 0,02 \cdot 3,14 \cdot 15}{0,63 \cdot 60} = 39,2 \text{ Вт} \quad (2.21)$$

2.7 Вибір приводу подачі супорта

Оскільки положення приводу подачі супорта планується контролювати за допомоги кінцевих вимикачів, то використовувати дороговартісний сервопривод нема необхідності.

Вихідними параметрами для мотор-редуктор приводу подачі є потужність електродвигуна (126,7 Вт), обертальний момент низькошвидкісної передачі (не менше 14,07 Н*м) та кількість обертів низькошвидкісної передачі (не більше 23 об/хв.).

З каталогу [27] обираємо мотор-редуктор приводу подачі супорта МЧ-40-22-0,12-56-У2 (рис. 2.12), характеристика (див. таблицю 2.5), виробництво АІР, Україна.

Таблиця 2.5 - Параметри мотор-редуктору подачі супорта [27]

Мотор-редуктор	Швидкість, об/хв	Потужність двигуна, кВт	Маркування електродвигуна	Крутний момент, Нм	Радіальне навантаження, Н	Кількість олії, л	Вага, кг
МЧ-40	22	0,12	AIR56A4	28	1500	0,14-0,3	20

Умови експлуатації мотор-редуктора МЧ-40: допустима постійна і змінна навантаження; Можливе реверсивне перемикання; Для тривалих режимів і частих активацій; Частота обертання на вході – до 1500 об/хв; Концентрація пилу до 10 мг/м³. [27]

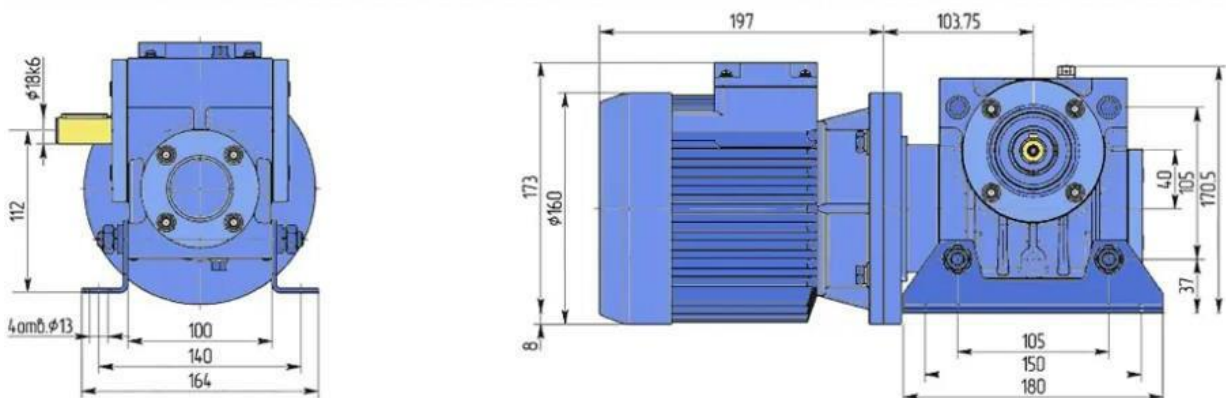


Рисунок 2.12. Мотор-редуктор

Виконання «56» передбачає порожнистий вал зі шпонковим пазом (рис. 2.13), характеристика (див. табл. 2.6).

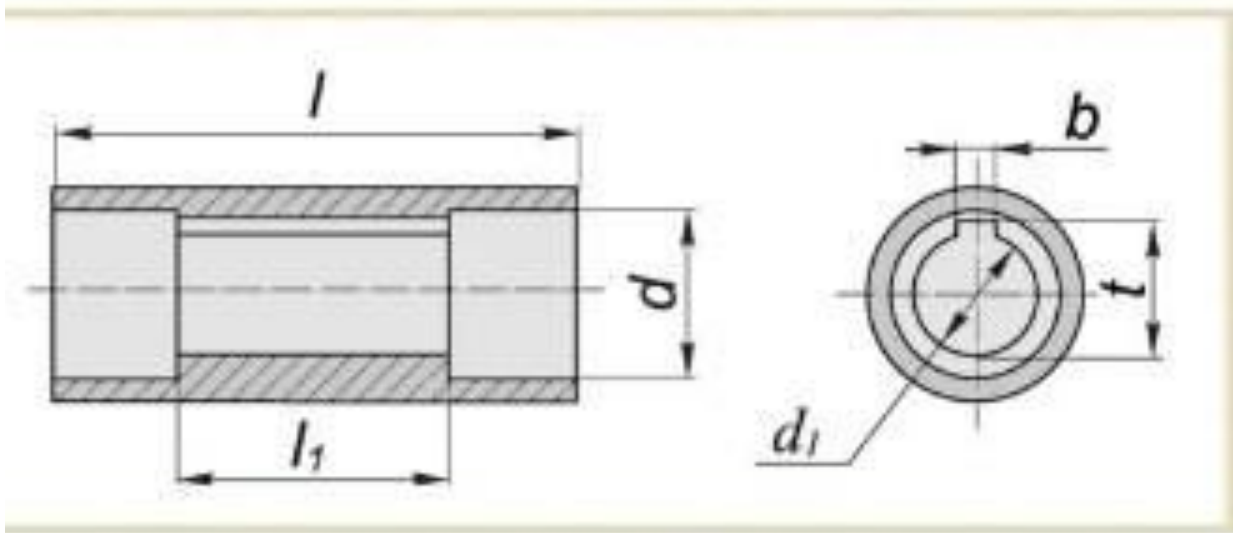


Рисунок 2.13- Порожнистий вал

Таблиця 2.6 - Параметри порожнистого валу.

Мотор-редуктор	Порожнистий вал						
	l	L1	d	D1	b	t	Г х м х В8
2МЧ-40	112	72	23	18	6	20,8	22 x 1,5 x Н8

Вартість редуктору складає 4512 грн [27], вартість електродвигуна складає 2043 грн (28).

2.8 Вибір приводу зміни глибини різання

Оскільки дуже важливо контролювати глибину різання, обираємо для приводу зміни глибини різання сервопривод.

Вихідними параметрами для сервомотор-редуктора приводу подачі є потужність електродвигуна (39,2 Вт), обертальний момент низькошвидкісної передачі (не менше 6,7 Н*м) та кількість обертів низькошвидкісної передачі (не більше 15 об/хв.).

З каталогу [29, с. 79] обираємо сервомотор-редуктор приводу зміни глибини різання РС 165М3 (рис. 2.14), характеристика (таблиця 2.7), виробництво MiniMotor, Італія.

Таблиця 2.7. Параметри сервомотор-редуктор приводу зміни глибини різання [29, с. 29]

Сервомотор-редуктор	Швидкість, об/хв	Потужність двигуна, кВт	Крутний момент, Нм	Вага, кг
PC 165M3	14	0,044	13	4,07

Вартість редуктору складає 4512 грн [30], вартість аналогічного електродвигуна складає 3900 грн [31].

В таблиці 2.8 зведено геометричні параметри сервомотор-редуктору PC 165M3.

Таблиця 2.8. Геометричні параметри сервомотор-редуктора PC 165M3. [29, с. 80]

Тип	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	P	Q	R	s	T	U	V	X	Вага
PC 165M3	52	48	58	14	6,5	5	16,3	39	32	236	119	60	68	95	M5	61	56	5	80	60	4,07

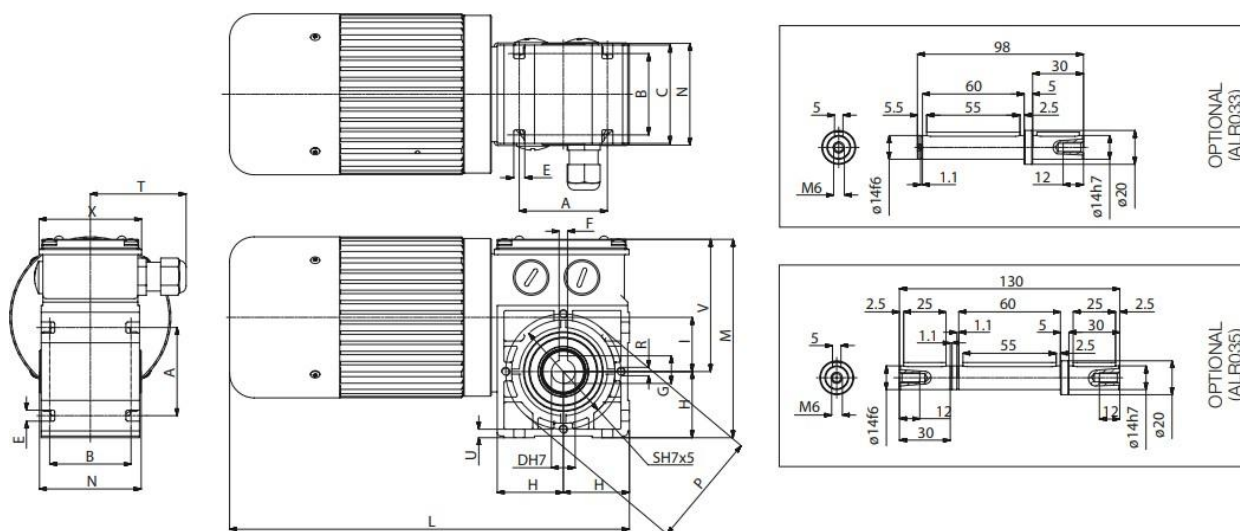


Рисунок 2.14 - Сервомотор-редуктор PC 165M3 [29, с. 80]

2.9 Уточнення параметрів приводів

Уточнена швидкість подачі супорта, виходячи з кількості обертів низькошвидкісної передачі мотор-редуктора 22 об/хв., складає:

$$s_{\text{суп.ут.}} = n_{\text{гв.}} \cdot p_{\text{гв.}} = 22 \cdot 6 = 132 \frac{\text{мм}}{\text{хв.}} \quad (2.21)$$

де $n_{\text{гв.}} = 22$ об/хв. – кількість обертів гвинта, яка дорівнює кількості обертів низькошвидкісної передачі мотор-редуктора.

$p_{\text{гв.}} = 6$ мм – крок гвинта подачі супорта.

Уточнена швидкість переміщення різця, виходячи з кількості обертів низькошвидкісної передачі мотор-редуктора 14 об/хв., складає:

$$s_{\text{різця.ут.}} = n_{\text{гв.}} \cdot p_{\text{гв.}} = 14 \cdot 4 = 56 \frac{\text{мм}}{\text{хв.}} \quad (2.22)$$

де $n_{\text{гв.}} = 14$ об/хв. – кількість обертів гвинта, яка дорівнює кількості обертів низькошвидкісної передачі мотор-редуктора.

$p_{\text{гв.}} = 4$ мм – крок гвинта переміщення різця.

2.10 Вибір датчиків для системи керування

Обрано кінцевий вимикач L51K13MEM122 виробництва EMAS, Туреччина. Вартість 915 грн. [32]

Для контролю відстані оберемо ультразвуковий датчик Balluff BUS002T, виробництва Balluff, Німеччина. Вартість 12959 грн. [33]

2.11 Алгоритм для розробки програмного забезпечення системи керування

Точкою відліку є крайнє положення супорту, різець відведено від бандажу. Різець закріплений в різцетримачі таким чином, що різуча кромка різця виступає на 50 мм у бік бандажу. Датчик відстані закріплений на різцетримачі на одному рівні з різцетримачем.

1. Супорт пересувається вздовж бандажу, датчик сканує поверхню бандажу та визначає відстань від різцетримача до поверхні бандажа.
Розраховується відстань від різцетримача до поверхні бандажу та сервоприводом різець подається до бандажу на глибину різу в 3 мм від найближчої точки бандажу.
2. В залежності від найближчої та найвіддаленішої точки розраховується кількість чорнових проходів (глибиною 3 мм).
Вмикається привод обертання валків дробарки.
3. Супорт виконує чорновий прохід до вимикання кінцевим вимикачем.
Привод подачі супорта перемикається на реверс.
Привод зміни глибини різання зміщує різець до бандажу на 3мм.
4. п. 3 повторюється в залежності від кількості чорнових проходів, що розраховано в п.2.
5. Привод зміни глибини різу зміщує різець до бандажу на 2мм.
6. Супорт виконує чистовий прохід до вимкнення кінцевим вимикачем.
7. Привод подачі супорта перемикається на реверс.
Розраховується відстань від різцетримача до поверхні бандажу та сервоприводу.
8. Якщо відстань від найближчої та найвіддаленішої точок поверхні бандажа більше 0,3 мм, різець зміщується до бандажу на глибину різання в 1 мм від найближчої точки бандажу.
9. Супорт виконує чистовий прохід до вимкнення кінцевим вимикачем.
10. Привод обертання валків дробарки вимикається.
11. Обробку завершено.

Алгоритм обробки зображено на рисунку 2.15.

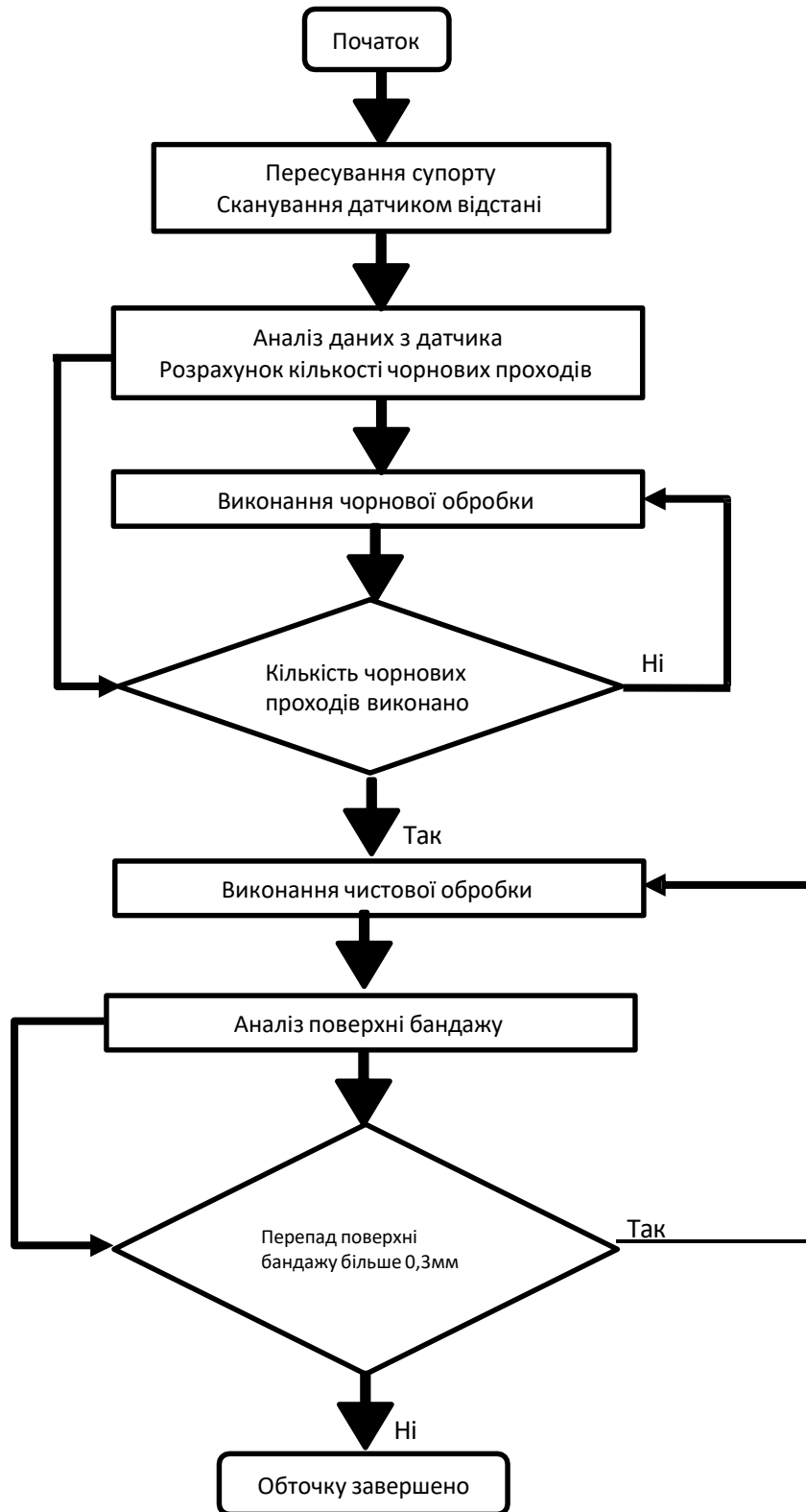


Рисунок 2.15 - Алгоритм роботи мехатронного комплексу обточки бандажів

Розділ 3. Програма, методика та результати експериментальних досліджень.

3.1 Дослідження параметрів коксу, що надходить до чотиривалкових дробарок в процесі подрібнення

Для отримання фракції коксу до 3мм, використовується 2 види коксу: коксохімічного виробництва МПУ та коксохімічного заводу (далі КХЗ), тому кокс що надходить до агломераційної фабрики відрізняється як формою так і розміром кусків.

Куски коксу (рис. 3.1) зазвичай неправильної форми і умовно можна припустити, що вони схожі на паралелепіпед. Розмір перерізу кусків коксу змінний і в більшості випадків зменшується від умовного центру до країв.



Рисунок 3.1 - Куски коксу

У даний час не існує способу визначення з великою точністю характерну форми кусків коксу, що подається для подрібнення. Для узагальненого визначення пропонується припустити, що об'єм куска коксу дорівнює об'єму паралелепіпеда на який він схожий.

Об'єм паралелепіпеда (рис. 3.2) визначається за формулою [34]:

$$V = a \cdot b \cdot h \quad (3.1)$$

де a – довжина паралелепіпеда

b – ширина паралелепіпеда

h – висота паралелепіпеда

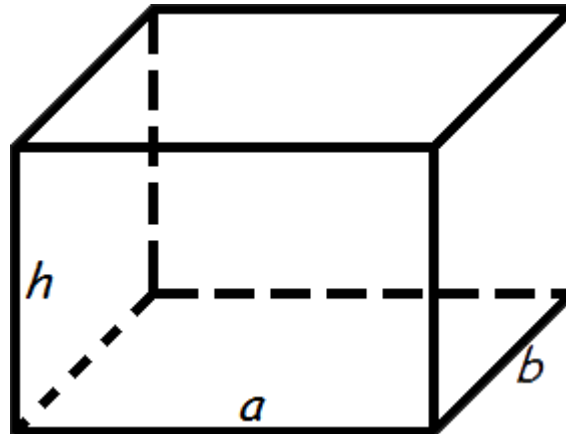


Рисунок 3.2- Розміри паралелепіпеда

Оскільки переріз реального куску коксу має неправильну форму і має різний розмір перерізу, використаємо метод, що ґрунтується на визначенні максимальних та середніх розмірів граней куску (умовно довжину, ширину та висоту).

Методика полягає у виконанні не менше п'яти замірів у декількох умовних перерізах куску коксу з точністю до 1 мм.

Для об'єктивного визначення об'єму умовного паралелепіпеда використаємо два метода, використовуючи величину граней максимальну та середню арифметичну (рис. 3.3).

Для подальших розрахунків будемо використовувати максимальні розміри L_{\max} , B_{\max} , H_{\max} , а також середні значення розмірів «граней» $L_{\text{сер}}$, $B_{\text{сер}}$, $H_{\text{сер}}$.

Середні значення розміру граней зразка розраховували як середнє арифметичне значення результатів заміру, що лежить в площині грані.

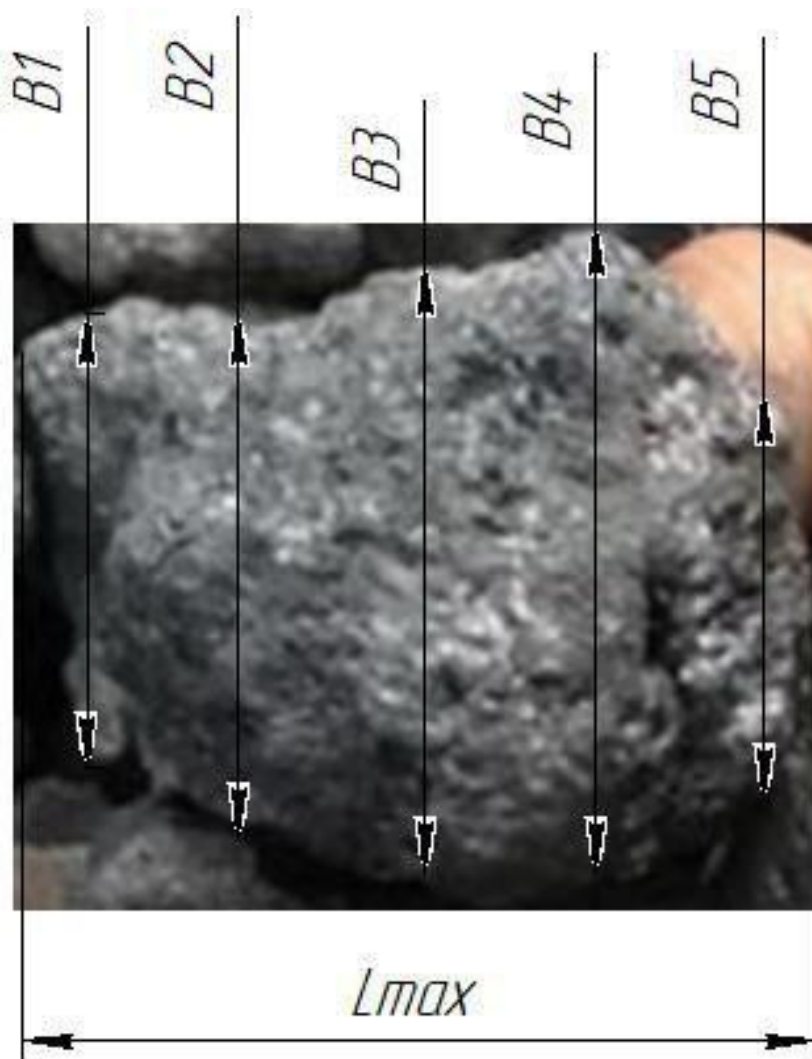


Рисунок 3.3 - Методика геометричних замірів середнього та максимального значень граней куска складної геометричної форми

Для перевірки отриманих результатів замірів об'єм, що отримано шляхом геометричного вимірювання та приведення до форми паралелепіпеда або еліпсоїда, порівнюється з реальним об'ємом, що отримано методом гідростатичного зважування (за методом Архімеда). (35]

Відносна похибка отриманих результатів не повинна перевищувати 15%.

При аналізі коксу що надходить до коксодробилок агломераційної фабрики, використовувалось два види коксу: коксохімічного виробництва МПУ та КХЗ.

Результати визначення характерної форми кусків коксу різних видів, що використовуються в агломераційному виробництві МПУ зведено до таблиці 3.1 коксохімічного виробництва МПУ та до таблиці 3.2 КХЗ. В якості зразків, використовувались куски коксу, що обрано випадковим чином з партії сировини в кількості по 12 од.

Таблиця 3.1 – Результати визначення характерної форми коксу коксохімічного виробництва МПУ.

№ з/п	Максимальні розміри кусків, мм x мм x мм	Реальний об'єм, см ³	Об'єм відповідного паралелепіпеда, см ³	Відносне відхилення реального об'єму, %	Об'єм відповідного еліпсоїду, см ³	Відносне відхилення реального об'єму, %
1	2	3	4	5	6	7
1.	101 x 91 x 89	450,0	803,0	78,4	421,4	6,6
2.	83 x 76 x 71	160,1	433,0	174,6	227,7	42,7
3.	82 x 81 x 76	170,1	487,5	190,4	256,7	51,5
4.	96 x 92 x 81	322,8	703,6	118,4	368,9	14,3
5.	74 x 56 x 65	101,2	271,0	167,0	142,4	39,8
6.	80 x 46 x 55	79,6	205,0	282,2	107,2	34,5
7.	72 x 70 x 61	138,2	305,3	122,1	160,2	15,9
8.	77 x 74 x 65	218,9	381,2	72,0	200,1	9,4
9.	81 x 76 x 69	150,8	427,3	320,2	224,2	49,1
10.	63 x 52 x 45	72,5	143,8	99,8	75,8	4,6
11.	78 x 68 x 51	159,9	279,7	76,9	147,4	7,9
12.	102 x 100 x 81	365,5	569,1	56,9	298,5	18,4

Таблиця 3.2 – Результати визначення характерної форми коксу коксохімічного виробництва КХЗ.

№ з/п	Максимальні розміри кусків, мм x мм x мм	Реальний об'єм, см ³	Об'єм відповідного паралелепіпеда, см ³	Відносне відхилення реального об'єму, %	Об'єм відповідного еліпсоїду, см ³	Відносне відхилення реального об'єму, %
1	2	3	4	5	6	7
1.	54 x 50 x 53	80,3	147,7	83,0	76,9	4,2
2.	55 x 38 x 40	38,3	87,0	124,2	45,1	17,3
3.	84 x 65 x 60	174,6	335,7	92,7	176,2	1,0
4.	75 x 71 x 63	148,9	324,3	117,9	169,8	14,1
5.	65 x 51 x 36	72,6	123,9	72,1	64,4	9,9
6.	74 x 71 x 57	127,4	290,7	129,2	152,7	20,0
7.	72 x 52 x 54	94,5	193,9	107,7	103,5	8,7
8.	71 x 67 x 71	141,6	334,3	137,0	175,5	24,1
9.	64 x 55 x 41	62,0	155,1	147,7	80,7	29,7
10.	81 x 44 x 51	77,9	181,5	134,8	95,5	22,9
11.	76 x 44 x 56	81,9	188,5	131,9	99,2	21,4
12.	61 x 44 x 46	52,4	132,1	146,3	68,2	29,0

Проаналізуємо отримані дані з таблиць 3.1, 3.2, та визначимо правильність розрахунків об'єму зразків аналітичним методом та гідростатичним. Оскільки порядковий номер зразків нам не важливий, то пересунемо зразки в порядку збільшення об'єму (див. табл. 3.3, 3.4).

На основі даних розрахунку об'ємів аналітичним методом та гідростатичним методом (табл. 3.3, 3.4), побудуємо графіки (рис. 3.4, 3.5).

Таблиця 3.4 – Результати визначення характерної форми коксу коксохімічного виробництва МПУ.

№ з/п	Реальний об'єм, см ³	Об'єм відповідного паралелепіпеда, см ³	Об'єм відповідного еліпсоїду, см ³
1.	72,5	143,8	75,8
2.	79,6	205	107,2
3.	101,2	271	142,4
4.	138,2	305,3	160,2
5.	150,8	427,3	224,2
6.	159,9	279,7	147,4
7.	160,1	433	227,7
8.	170,1	487,5	256,7
9.	218,9	381,2	200,1
10.	322,8	703,6	368,9
11.	365,5	569,1	298,5
12.	450	803	421,4

Нижче подано графіки об'єму, що розраховано різними методами.

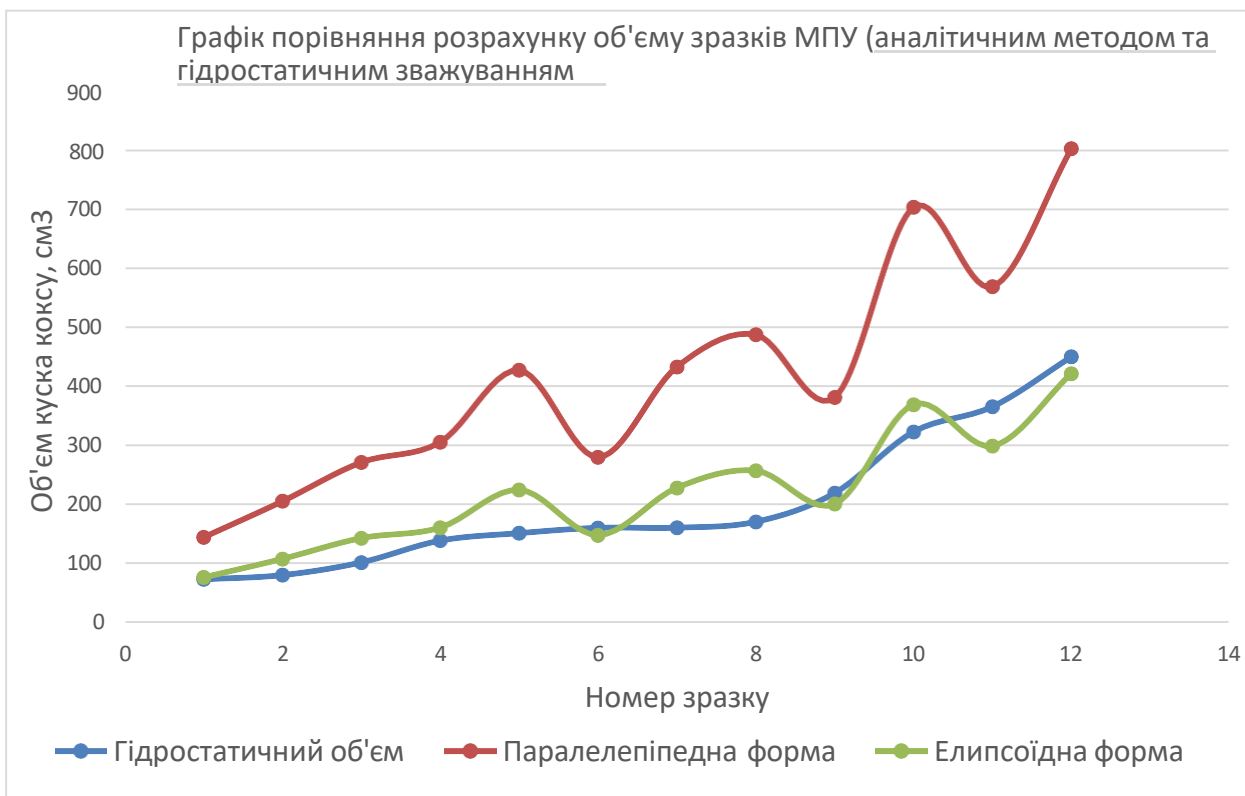


Рисунок 3.4- Графік порівняння розрахунку об'єму зразків МПУ аналітичним методом та гідростатичним зважуванням

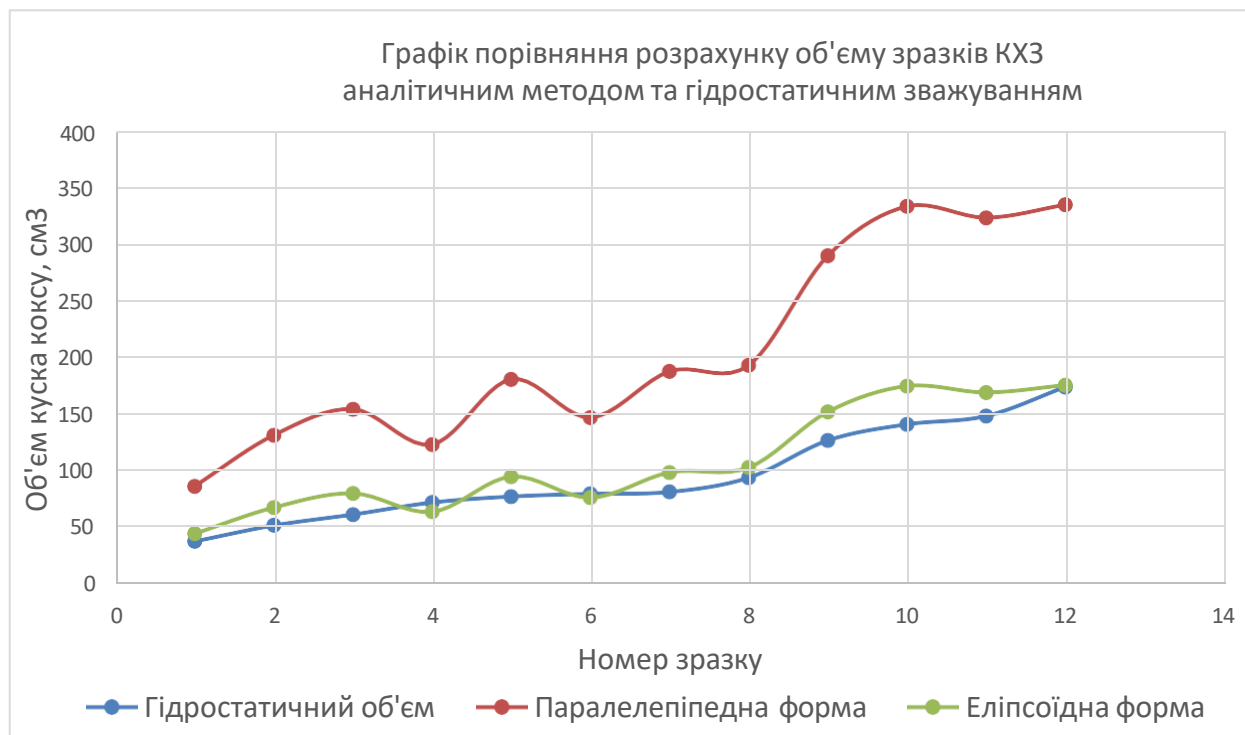


Рисунок 3.5 - Графік порівняння розрахунку об'єму зразків КХЗ аналітичним методом та гідростатичним зважуванням

Висновки: з порівняльного аналізу результатів (табл. 3.1, 3.2) на основі відносного відхилення аналітичного об'єму від реального, для коксу МПУ та КХЗ відповідно для паралелепіпеда склало 118,7% та 95,1%, для коксу МПУ та КХЗ відповідно, в той же час для еліпсоїду – 14,5% та 13,3% для коксу МПУ та КХЗ відповідно, також можна зробити висновки що найбільш характерною формою для коксу є еліпсоїд, а не паралелепіпед, як вважалось на початку дослідження.

На рисунках 3.4 та 3.5 чітко простежується, що значення об'єму, який визначено з припущенням, що форма зразків схожа на паралелепіпед значно перевищує значення об'єму гідростатичного зважування. Проте значення об'єму який визначено з припущенням, що форма зразків еліпсоїдна, має незначне відхилення від значень гідростатичного зважування.

Також оскільки відносне відхилення аналітичного об'єму для еліпсоїдної форми від реального об'єму, склало 14,5% та 13,3% для коксу МПУ та КХЗ відповідно, що менше ніж 15%, то цей метод аналітичного визначання об'єму слід вважати доцільним та правильним.

Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін

4.1 Аналіз наявних витрат існуючої технології обточки

На даний момент узагальнена кількість простоїв дробарок складає 30 годин на тиждень, що на рік досягає 1560 год./рік, саме з причини обробки поверхні нижньої пари валків.

Також витратами слід вважати заробітну плату двох працівників, що задіяні щоденно, на відновленні поверхні валків: 60 чол.год./тиждень, вартістю 275 грн/год, що за рік складає 858 000 грн./рік.

4.2 Аналіз необхідних витрат для модернізації механізму обточки бандажів

Вартість на модернізацію для однієї дробарки складається з наступних затрат (таблиця 4.1):

- мотор-редуктор приводу подачі супорта. 2 од.
Вартість 6555 грн/од.
- сервопривод приводу подачі різця. 2 од.
Вартість 8412 грн/од.
- кінцеві вимикачі 4 од.
Вартість 915 грн/од.
- ультразвуковий датчик відстані. 2 од.
Вартість 12959 грн/од.
- плата керування Arduino UNO WiFi REV2 ABX00021. 2 од.
Вартість 2259 грн/од. [36]
- демонтаж, монтаж обладнання, реконструкція механізму обточки бандажів. Вартість 26400грн.
- пуско-налагоджувальні роботи. Вартість 4400 грн.
- незаплановані витрати (5%). Вартість 4742 грн.
- розробка програмного забезпечення для програми керування. Вартість 10000 грн.

Загалом витрати на реконструкцію однієї дробарки орієнтовно складають 99572 грн.

Оскільки програмне забезпечення розробляється одноразово та є уніфікованим для всіх дробарок, то загальна вартість реконструкції всіх дробарок (5 од.) складає 507 860 грн.

Таблиця 4.1- Дані з розрахунку витрат на реконструкцію механізму обточки бандажів.

Стаття витрат	Дробарка				
	№1	№2	№3	№4	№5
мотор-редуктор приводу подачі супорта. 2 од.	13110 грн.	13110 грн.	13110 грн.	13110 грн.	13110 грн.
сервопривод приводу подачі різця. 2 од.	16824 грн.	16824 грн.	16824 грн.	16824 грн.	16824 грн.
кінцеві вимикачі 4 од.	3660 грн.	3660 грн.	3660 грн.	3660 грн.	3660 грн.
ультразвуковий датчик відстані. 2 од.	25918 грн.	25918 грн.	25918 грн.	25918 грн.	25918 грн.
плата керування Arduino UNO WiFi REV2 ABX00021. 2 од.	4518 грн.	4518 грн.	4518 грн.	4518 грн.	4518 грн.
демонтаж, монтаж обладнання, реконструкція механізму обточки бандажів.	26400грн.	26400грн.	26400грн.	26400грн.	26400грн.
пуско-налагоджувальні роботи.	4400 грн.	4400 грн.	4400 грн.	4400 грн.	4400 грн.
незаплановані витрати (5%)	4742 грн.	4742 грн.	4742 грн.	4742 грн.	4742 грн.
Загалом на одну дробарку	99572 грн	99572 грн	99572 грн	99572 грн	99572 грн
розробка ПЗ для програми керування.	10000 грн.				
Загалом на реконструкцію всіх дробарок	507 860 грн				

4.3 Аналіз ефективності модернізації механізму обточки бандажів

Оскільки після модернізації механізму, обробка бандажів нижньої пари валків буде виконуватись в автоматичному режимі, це дозволить виконувати обробку бандажів двох нижніх валків одночасно, що скоротить час простою дробарки вдвічі до 15 год./тиждень, що за рік складе приблизно 780 год./рік.

Коефіцієнт готовності основного обладнання агломераційної фабрики рахується за формулою [37]:

$$K = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = \frac{168}{168 + 6} = 0,966 \quad (4.1)$$

де, $T_0 = 168$ год. – середній час напрацювання бандажів валків до обточки.

$T_B = 6$ год. – середній час відновлення поверхні валків за допомогою механізму обточки бандажів.

Порахуємо коефіцієнт готовності основного обладнання після реконструкції за формулою 4.1:

$$K_{ГМ} = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = \frac{168}{168+3} = 0,982 \quad (4.1)$$

де, $T_{BМ} = 3$ год. – плановий час відновлення поверхні валків за допомогою механізму обточки бандажів після модернізації.

Як можна побачити з розрахунків коефіцієнт готовності обладнання збільшиться на 1,66% за рахунок скорочення часу відновлення, тобто фактичний час обладнання збільшиться.

Розрахуємо фактичний час роботи обладнання за формулою[38]:

$$T_{\Phi} = N_{ч} + T_P + T_K \quad (4.2)$$

де, $N_{ч} = 43350$ год – кількість годин для 5-ти дробарок на рік при безперервному цілодобовому графіку.

$T_P = 1560$ год – кількість годин на рік, що витрачається на відновлення поверхні бандажів для 5-ти дробарок.

$T_{PM} = 780$ год – кількість годин на рік, що витрачається на відновлення поверхні бандажів для 5-ти дробарок.

$T_K = 7008$ год – кількість годин, що витрачається на капітальний ремонт 5-ти дробарок за рік.

Розрахуємо фактичний час роботи обладнання до модернізації та плановий час роботи обладнання після модернізації за формулою 4.2:

$$T_{\Phi} = N_{ч} + T_P + T_K = 43350 + 1560 + 7008 = 34782 \text{ год} \quad (4.2)$$

$$T_{\PhiМ} = N_{ч} + T_{PM} + T_K = 43350 + 780 + 7008 = 35562 \text{ год} \quad (4.2')$$

Як видно з розрахунків (формулу 4.2) після модернізації фактичний час роботи обладнання збільшиться на 2,22%.

Об'єм виробництва за рік розраховується за формулою [38]:

$$Q = T_{\Phi} \cdot P_{сер} \quad (4.3)$$

де, $P_{сер.} = 9,36$ т/год - середньо годинне виробництво (додаток Д).

Розрахуємо об'єм виробництва фактичний та після модернізації обладнання за формулою 4.3:

$$Q = T_{\Phi} \cdot P_{сер} = 34782 \cdot 9,36 = 325560 \text{ т/рік} \quad (4.3)$$

$$Q_{М} = T_{\PhiМ} \cdot P_{сер} = 35562 \cdot 9,36 = 332860 \text{ т/рік} \quad (4.3)$$

Як видно з розрахунків (. формули 4.3) виробництво подрібненого коксу збільшиться на 2,24%.

Ефект виробництва агломерату розраховується за формулою:

$$E_A = \frac{Q_E}{C\%} = \frac{7300}{0,05} = 146000 \text{ т/рік} \quad (4.4)$$

де, Q_E – приріст виробництва подрібненого коксу.

$C\% = 0,05$ – частка подрібненого коксу в 1 т агломерата [39].

$$Q_E = Q_M, Q = 332860, 325560 = 7300 \text{ т/рік} \quad (4.5)$$

Як видно з формули 4.4, реконструкція чотиривалкових дробарок коксу в перспективі може дозволити збільшити виробництво агломерату приблизно на 146 тис. т./рік.

Оскільки модернізація механізму не вирішує питання автоматизації встановлення різцю, його заточування та заміну, то виникає необхідність залишити принаймні одного працівника, який буде готувати механізм до роботи, контролювати процес обробки, та результат. Також треба зазначити, що працівник зможе забезпечити безпечні умови обробки бандажів, встановити попереджувальні знаки, оформити необхідні дозвільні документи та зможе швидко втрутитись якщо трапиться якийсь збій.

Виходячи з вище наведених аргументів, цілком виправдано зменшити чисельність працівників, що задіяні в обробці бандажів дробарки до 1 особи.

Ефект від цього заходу розраховується за формулою:

$$E = B, B_M = 858000, 214500 = 643500 \text{ грн/рік} \quad (4.6)$$

де, $B = 858\,000$ грн./рік. – вартість оплати праці працівників при обробці бандажів дробарки.

$B_M = 214\,500$ грн/рік – вартість оплати праці працівника при обробці бандажів валків після модернізації

Висновок: економічний ефект складає 643500 грн/рік, при витратах на модернізацію розміром 507860 грн, інвестиції від запровадження повернуться впродовж першого року експлуатації модернізованого механізму обробки бандажів.

Крім того модернізація механізму обточки бандажів, збільшує фактичний час роботи дробарок, що в перспективі дозволяє збільшити виробництво агломерату на 146 тис. т./рік.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі проведено ґрунтовний аналіз наукових досліджень та розробок в області дробильного обладнання, визначено сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку в цій галузі. Крім того було проаналізовано досвід реального впровадження винаходів на основі патентів як закордонних так і вітчизняних компаній.

Було розглянуто конструкцію чотиривалкової дробарки коксу та безпосередньо існуючий процес відновлення поверхні бандажів за допомоги механізму обточки, виявлено та проаналізовано недоліки і можливі причини їх виникнення. Для усунення виявлених причин, враховуючи як амбітні теоретичні рішення так і невеликі проте дієві модернізації, було обрано достатньо креативне вирішення завдання, впровадити автоматизований мехатронний комплекс.

Основні результати, отримані в роботі:

- на основі аналізу досвіду ремонту бандажів валків валкових дробарок зарубіжних та вітчизняних підприємств сформовано перелік основних напрямків удосконалення даного процесу;
- запропоновано концептуальну модель процесу відновлення валків;
- проведено обрахунки силових і кінематичних параметрів процесу відновлення;
- розроблено програмний комплекс управління для керуючого пристрою;
- розроблено алгоритм завдання для розробки програмного забезпечення системи керування;
- експериментально досліджено параметри коксу, що надходить до чотиривалкових дробарок в процесі подрібнення;
- проведено економічне обґрунтування запропонованих змін, встановлено що економічний ефект складає 643500 грн/рік, при витратах на модернізацію розміром 507860 грн, інвестиції від запровадження повернуться впродовж першого року експлуатації модернізованого механізму обробки бандажів.

Список використаних джерел

1. Дробилка чотиривалкова Д4Г 900x700. Технічний опис та інструкція з експлуатації 31.3112.021 ТО. «Укрбуддробмаш», м. Луганськ, Україна, 2008, 16 с.
2. Дробарка чотиривалкова Д4Г 900x700. [Електронний ресурс]: https://images.prom.ua/1515806_w640_h640_1515806.jpg (дата звернення 05.01.2024).
3. Дробарка чотиривалкова Д4Г 900x700. [Електронний ресурс]: <https://images.sstatic.com/trituradoras-chancadoras-67-283530692.jpg> (дата звернення 05.01.2024).
4. Мікульонок, І. О., Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій)/ Мікульонок І. О., А. Я., Карвацький, С. В., Лелека, О. І. Іваненко. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (1). 2022 р. С. 30–43. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157>
5. Сумін М.А. Оптимізація процесу дроблення крихких матеріалів в валковій дробарці. Квал. роб. Магістра [Електронний ресурс]: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/12345/2802/%D0%A0%D0%A0%20%E2%80%94%D0%A1%D1%83%D0%BC%D1%96%D0%BD.pdf?sequence=1> (дата звернення 05.01.2024).
6. Молдавський А.В. Електропривод і автоматизація дробильної установки. Дипл. Проект [Електронний ресурс]: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/53471/1/Moldavskiyi_bakalavr.pdf (дата звернення 05.01.2024).
7. Тітов А.А. Модернізація валкових дробарок для підвищення ефективності руйнування міцних гірничих порід / А.А. Тітов // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. — Дніпро: ИГТМ НАНУ, 2018. — Вип. 141. — С. 176-183..
8. Огороднік М.С. Удосконалення конструкції валкової дробарки / М.С. Огороднік, С.О. Борщик. // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». К.: НТУУ «КПІ», 2015. С. 123-124.
9. Сокур М.І. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія. / В.С. Білецький, О. І. Єгурнов, О.М. Воробйов, В.О. Смирнов, Д.П. Божик. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
10. Тарасенко В.А. Моделювання робочих процесів та обґрунтування параметрів одновалкової дробарки для твердих порід : Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.06 – «Гірничі машини». Донецьк : Донецький державний технічний університет, 2000. 271 с. (Електронний ресурс): <https://tekhnosfera.com/modelirovanie-rabochih-protsessov-i->

[obosnovanie-parametrov-shahtnoy-odnovalkovoy-drobilki-dlya-krepkih-porod](#) (дата звернення 05.01.2024).

11. Hernan Anticoi. An Improved high-Pressure Roll Crusher Model for Tungsten and Tantalum Ores. / Eduard Guasch, sarbast Ahmad namid, Josep Oliva, Pura Alfonso, Marc Bascompta, Lluís sanmiquel, Teresa Escobet, Antoni Escobet, David Parcerisa, Esteban Peiia-Pitarch, Rosa Argelaguet and Jose Juan de Felipe. Barcelona : Universitat Politecnica de Catalunya Barcelona Tech (Електронний ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/328534011_An_Improved_high-Pressure_Roll_Crusher_Model_for_Tungsten_and_Tantalum_Ores (дата звернення 05.01.2024).
12. Viktor sheichenko. Design of a roll crusher for sunflower stems and substantiation of the rational modes of its operation. / Volodymyr Volskyi, Rostyslav Kotsiubanskyi, Viktor Dnes, Misha shevchuk, Oleksandra Bilovod, Olga Drozhchana. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 6 (1 (114)), 28–37. [Електронний ресурс]: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244903> (дата звернення 05.01.2024).
13. shuwei Wu. study on productivity of eccentric roll crusher based on theory and experiment. / shuai Wang, Guoqiang Wang, Longfei Fan, Jianbo Guo, Zhengbin Liu, naoyan Zhang, Wei Guan, Yukuan Wang, Yewei Wu. Minerals Engineering Vol. 206, January 2024, Art.108500. (Електронний ресурс]: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108500> (дата звернення 06.01.2024).
14. holger Lieberwirth, Falk silbermann, Pjotr szczelina. New insights into double roll crushing. Minerals Engineering Vol. 202, November 2023, Art. 108298 (Електронний ресурс]: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108298> (дата звернення 06.01.2024).
15. Jihoe Kwon. Modeling of coal breakage in a double-roll crusher considering the reagglomeration phenomena. / neechan Cho, Myoungwook Mun, Kihong Kim. Powder Technology. Volume 232, December 2012, Pages 113-123. (Електронний ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/256832370_Modeling_of_coal_breakage_in_a_double-roll_crusher_considering_the_reagglomeration_phenomena (дата звернення 06.01.2024).
16. Robby Rizki Rukmana. Evaluasi Produktivitas Double Roller Crusher Untuk Mencapai. / Melody Lingua Franca, safar Uddin, Deddy. Jurnal Kotamo Volume 1 No. 5 (2021) (Електронний ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/353321291_Evaluasi_Produktivitas_Double_Roller_Crusher_Untuk_Mencapai_Target_Produksi_Claystone_Unit_Kerja_Crusher_PTsemen_Baturaja_PerseroTbk (дата звернення 06.01.2024).

17. Baoqiang Wang, Guofa Wang, hong Wang, Yong Ding & Tong Chen (2019) Comparison of breakage behavior between the sieving crusher and ordinary teeth roll crushers, Energy sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 41:2, 252-259. (Електронний ресурс]:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2018.1514432>
(дата звернення 06.01.2024).
18. Repairing crusher rolls : пат. US20070187537A1 США : B02C4/305 / Robin Batterham. № 10/564194 ; заявл. 09.07.2004 ; опубл. 16.08.2007, (Електронний ресурс]:
<https://www.freepatentsonline.com/y2007/0187537.html>
19. Method for operating an installation comprising at least one assembly with a rotating surface : пат. US010556239B2 США : B02C 25/00, B02C 4/28, B02C4 / 32, B02C 4/42, B02C 4/28 / Reinhard Giesemann, Richard Erpelding, Uwe Bendig, Dirk Dilly, Dirk schefer. № PCT/EP2014/002635; заявл. 29.09.2014 ; опубл. 11.02.2020 , (Електронний ресурс]:
https://www.lens.org/images/patent/Us/10556239/B2/Us_10556239_B2.pdf
20. Removal-free repair turning machine for double rolls : пат. CN103394706A Китай : B23B5/08 ; B23Q5/22 / Li Zhouwei; shuai Zhongkui; Cao hong; Mi Ning; Liu Wanli. CN201310307478A заявл. 15.07.2013 ; опубл. 20.11.2013, [Електронний ресурс]:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/049558531/publication/CN103394706A?q=pn%3DCN103394706A> – 6с.
21. Складові сили різання : веб-сайт. (Електронний ресурс]:
https://www.mdpi.com/machines/machines-09-00190/article_deploy/html/images/machines-09-00190-g001.png (дата звернення 27.12.2023).
22. Технологія машинобудування: Посібник-довідник для виконання кваліфікаційних робіт: Навч. посібник / І.І. Юрчишин, Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай, М.Л. Кукляк, Я.М. Кусий, В.В. Ступницький, В.А. Яцюк, А.М. Кук, Є.М. Махоркін, В.П. Свізінський / За ред. І.І. Юрчишина. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 528 с.
23. Сталь 65Г: аналоги, властивості, характеристики. Метінвест-СМЦ : веб-сайт. (Електронний ресурс]: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-65g/> (дата звернення 28.12.2023).
24. Толстушко М. М., Мартинюк В. Л., Назарівський О. В. Електронний посібник з дисципліни «Деталі машин». Луцьк : Луцький національний технічний університет. 2016. 3.3. Розрахунок передач гвинт – гайка: веб-сайт (Електронний ресурс]:
https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%94%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D

[0%B8%D0%BD%20%D0%95%D0%9B%D0%9F%202016/page25.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%94%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%20%D0%95%D0%9B%D0%9F%202016/page25.html)

(дата звернення 09.01.2024).

25. Карнаух С. Г. Таровик М. Г. Деталі машин. Курс лекцій для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2017. – 261 с.
26. 24. Толстушко М. М., Мартинюк В. Л., Назарівський О. В. Електронний посібник з дисципліни «Деталі машин». Луцьк : Луцький національний технічний університет. 2016. 3.2. Конструкції деталей передач гвинт – гайка : веб-сайт [Електронний ресурс]: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%94%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%20%D0%95%D0%9B%D0%9F%202016/page24.html (дата звернення 28.12.2023).
27. АИР Україна МОТОР-РЕДУКТОР МЧ-40 : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://xn--80aqy.com.ua/motor-reduktory/chervyachnye/mch-40/> (дата звернення 10.01.2024).
28. АИР 56 А4 електродвигун 0.12 кВт 1500 об/хв. : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://systemax.ua/ua/elektrodivigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodivigateli/air/air56a4--0-12-kvt-1500-ob-min-.html> (дата звернення 10.01.2024).
29. Каталог сервомотор-редукторів MiniMotor. Каталог комплектуючих промислового обладнання : веб-сайт (Електронний ресурс): https://kpd-drive.com.ua/images/upload/files_entity/678/301/minimotor-osnovnoy-katalog-pdf.pdf (дата звернення 10.01.2024).
30. Редуктор черв'ячний одноступеневий RV 025. ТОВ "ПЕРША РЕДУКТОРНА КОМПАНІЯ" : веб-сайт. [Електронний ресурс]: <https://prk.com.ua/ua/p38275809-reduktor-chervyachnyj-odnostupenchatyj.html> (дата звернення 10.01.2024).
31. Кроковий двигун 86HS156-6204 6,2А 1.8°. ВЕРСТАТИ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ УПРАВЛІННЯМ : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://mtech.com.ua/uk/product/shagovyj-dvigatel-86hs156-6204-62a-1-8/> (дата звернення 10.01.2024).
32. Кінцевий вимикач EMAS L51K13MEM122. Магазин AxiomPlus : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://axiomplus.com.ua/ua/koncevye-vyklyuchateli/product-63941/> (дата звернення 10.01.2024).
33. Ультразвуковий датчик Balluff BUS002T. Компанія ПЕ-КО : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://peko.com.ua/distance-sensors/ultrasonic-distance-sensors/balluff-bus002t> (дата звернення 10.01.2024).
34. Об'єм прямокутного паралелепіпеда. Формули об'єму геометричних фігур : веб-сайт. (Електронний ресурс): <https://ua.onlinemschool.com/math/formula/volume/#h2> (дата звернення

10.01.2024).

35. Закон Архімеда. Вікіпедія (wikipedia.org) : веб-сайт. (Електронний ресурс]:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%90%D1%80%D1%85%D1%96%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D0%B0 (дата звернення 10.01.2024).
36. Arduino UNO WiFi REV2 ABX00021. Інтернет-магазин "Ардуіно в Україні" : веб-сайт. (Електронний ресурс]: <https://arduino.ua/prod3025-arduino-uno-wifi-rev2-abx00021> (дата звернення 10.01.2024).
37. Токарчук С.В., Гавва О.М. Дослідження показників надійності машин для пакування в'язкої та пластичної продукції у споживчу тару. Інституційний репозитарій Національного університету харчових технологій : веб-сайт. (Електронний ресурс]:
<https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/68a000d4-b4a4-4bd7-9400-56c54a5caff3/content> (дата звернення 10.01.2024).
38. Методи розрахунку виробничої потужності. Планування діяльності на підприємстві : веб-сайт. (Електронний ресурс]:
https://stud.com.ua/23764/menedzhment/metodi_rozrahunku_virobnichoy_i_potuzhnosti (дата звернення 10.01.2024).
39. Агломерат (металургія). Вікіпедія (wikipedia.org) : веб-сайт. (Електронний ресурс]:
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82_\(%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82_(%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%83%D1%80%D0%B3%D1%96%D1%8F))
(дата звернення 10.01.2024).

Додатки

- А. Технічна творчість: Збірник наукових праць./ Укл.: Скиба М.Є., Поліщук О.С., Романець Т.П. – Хмельницький: ХНУ, 2022. - №5 – 68с.
- Б. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення», 29 березня 2023, Луцьк. – Луцький національний технічний університет, 2023. - 232с.
- В. Креслення бандажу.
- Г. Креслення механізму обточки бандажів.
- Д. Креслення дробарки Д4Г 900x700
- Е. Технологічний процес відновлення робочої поверхні валків.
- Ж. Креслення механізму обточки бандажів після реконструкції.