

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Дослідження параметрів гумових стрічок стрічкового конвеєра
для транспортування сипких матеріалів”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Олександр ГРИГОР'ЄВ
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“ ___ ” _____ 202 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Григор'єву Олександрю Сергійовичу

1. Тема роботи: **«Дослідження параметрів гумових стрічок стрічкового конвеєра для транспортування сипких матеріалів»**

Керівник роботи: Березовецький Сергій Андрійович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 09.12.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів транспортування сипких матеріалів; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Стан питання, літературно-патентний пошук;

2. Теоретичне обґрунтування взаємодії конвеєрної стрічки з барабаном та обґрунтування параметрів конвеєра;

3. Результати теоретичних досліджень та їх аналіз;

4. Охорона праці та захист населення;

5. Економічна ефективність роботи;

Висновки і пропозиції;

Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: стан питання та задачі дослідження; конструкція, типи стрічкових конвеєрів; конструкції, особливості роботи та експлуатації стрічкових конвеєрів загального призначення та спеціальних стрічкових конвеєрів; варіанти виконання конвеєрів; варіанти виконання конвеєрних стрічок; види пошкоджень конвеєрної стрічки; чинники виходу з ладу конвеєрної стрічки; руйнування стрічки внаслідок заклинювання роликів; конвеєрні барабани; взаємодія конвеєрної стрічки з барабаном; розрахунок конвеєра стрічкового типу; результати теоретичних досліджень та їх аналіз; загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	Березовецький С.А. к.т.н., доц. кафедри машинобудування			
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Стан питання та задачі дослідження»</i>	12.09.24-27.09.24	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Теоретичне обґрунтування взаємодії конвеєрної стрічки з барабаном та обґрунтування параметрів конвеєра»</i>	30.09.24-11.10.24	
3.	<i>Виконання розділу: «Результати теоретичних досліджень та їх аналіз»</i>	14.10.24-08.11.24	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та захист населення»</i>	11.11.24-22.11.24	
5.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	25.11.24-06.12.24	

Студент _____ Олександр ГРИГОР'ЄВ
(підпис)

Керівник роботи _____ Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(підпис)

УДК 686.12-681.628.35

«Дослідження параметрів гумових стрічок стрічкового конвеєра для транспортування сипких матеріалів». Григор'єв О.С. Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. – Дубляни, Львівський НУП, 2024.

59 с. текст. част., 21 рис., 4 табл., 21 літературне джерело.

У кваліфікаційній магістерській роботі досліджено конструкцію, типи та методи проектування стрічкових конвеєрів. Особливу увагу приділено аналізу причин зношуваності стрічки, впливу експлуатаційних факторів і способам підвищення її довговічності. Проведено теоретичні дослідження взаємодії стрічки з барабаном, моделювання силових і вібраційних навантажень у зоні контакту, а також розроблено математичні моделі тертя і зносу.

На основі експериментальних випробувань на лабораторній установці встановлено, що оптимальна товщина гумової футерівки барабана становить 16-20 мм, що забезпечує коефіцієнт зчеплення до 0,6, знижує зношуваність стрічки на 25% і підвищує стабільність роботи конвеєра. Розраховано, що продуктивність конвеєра може досягати 1500 т/год при швидкості стрічки 3,5 м/с.

Запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальної конструкції барабанів із гумовими футерівками, зниження вібраційних навантажень і покращення ефективності транспортування. Надано практичні рекомендації щодо зменшення енергоспоживання та збільшення терміну служби конвеєрів.

У роботі також проведено аналіз виробничих небезпек при експлуатації стрічкових конвеєрів, розроблено заходи з охорони праці та техніки безпеки. Представлено комплексний підхід до підвищення ефективності та надійності стрічкових конвеєрів у промислових умовах.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Конструкція та типи стрічкових конвеєрів.....	9
1.2. Конвеєрна стрічка	12
1.3. Гумотканинні стрічки	13
1.4. Зношування конвеєрних стрічок	23
1.5. Конвеєрні барабани.....	28
1.6. Загальні висновки і задачі кваліфікаційної роботи	29
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З БАРАБАНОМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНВЕЄРА	30
2.1. Взаємодія конвеєрної стрічки з барабаном	30
2.2. Феноменологічні моделі взаємодії конвеєрної стрічки з барабаном.....	33
2.3. Вибір товщини футерівки для зниження вібраційних навантажень.....	36
2.4. Рекомендації світової практики	37
2.5. Розрахунок конвеєра стрічкового типу	38
Висновок по розділу 2.....	46
3. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	47
3.1. Теоретичні основи та підхід до дослідження	47
3.2. Моделювання та результати досліджень	47
3.3. Аналіз залежності тягового зусилля від товщини футерівки	48
3.4. Обґрунтування вибору товщини футерівки та матеріалу	48
3.5. Висновки та рекомендації	49
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	50
4.1 Основні вимоги до охорони праці при роботі з конвеєрними системами	50
4.2 Потенційні небезпеки при обслуговуванні та експлуатації конвеєрних систем	50
4.3 Охорона навколишнього середовища	51
4.4 Профілактика аварійних ситуацій	51

4.5 Висновки та рекомендації	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	54
Додатки.....	56

ВСТУП

Останнім часом як у світі, так і в Україні значно зросли обсяги товарообігу, що спричинило збільшення транспортувальних та вантажно-розвантажувальних робіт у різних галузях народного господарства. Лідируючі позиції серед транспортувальних засобів займають стрічкові конвеєри завдяки їхній надійності, простоті конструкції та здатності транспортувати вантажі на великі відстані [1]. Ці конвеєри найбільш широко використовуються в сільському господарстві та гірничодобувній промисловості завдяки своїй продуктивності, яка може досягати 30 тис. т/год і дозволяє транспортувати вантажі на відстані від кількох метрів до 10...15 км [2].

Однак, попри численні переваги стрічкових конвеєрів, вони мають і певні недоліки, зокрема, знос стрічки, привідних барабанів і підтримуючих роликів через їхню взаємодію. Питання взаємодії конвеєрної стрічки з барабаном висвітлено у багатьох дослідженнях, частина яких представлена нижче [1-5]. Натомість, окремі випадки, коли барабан покритий високофрикційним матеріалом, менш детально розглянуті в науковій літературі, а оптимальна товщина такого покриття досліджувалася вкрай обмежено.

Світовий досвід у конвеєробудуванні свідчить, що ця проблема є актуальною для конвеєрного транспорту і доволі складною для аналітичного вирішення. Це зумовлено недостатністю адекватних фізичних і математичних моделей та різноманіттям чинників, що впливають на процеси у зоні контакту стрічки й барабана, особливо за умов зволоження та потрапляння матеріалу, який транспортується.

Це призвело до створення низки емпіричних методів розрахунку, де деякі показники (зокрема, коефіцієнт зчеплення, площа контакту стрічки й барабана тощо) визначалися експериментально для конкретних випадків експлуатації конвеєрів. На основі таких методів були розроблені розрахункові методики для проектування конвеєрів різного технологічного призначення, з уточненням коефіцієнтів для кожного випадку. У цьому допомагала накопичена практика експлуатації конвеєрів і значна база експериментальних даних [3].

Це сприяло тому, що провідні світові компанії, як-от *REMA TIP TOP GmbH*, *NILOS GmbH & Co* та інші, почали пропонувати готові рішення для футерівки барабанів, а також розробили гумові покриття різних розмірів (включно з відповідними клеями) для всіх існуючих конструкцій стрічкових конвеєрів. Проте рекомендації щодо вибору товщини футерівки часто є загальними і не завжди враховують усі експлуатаційні вимоги [4, 5]. Проблема ускладнюється тим, що закордонні фірми використовують власні марки гумових матеріалів, характеристики яких зазвичай не подаються у технічній документації. Це, а також висока вартість таких рішень, ускладнює роботу вітчизняних виробників стрічкових конвеєрів, які не завжди можуть дозволити собі послуги закордонних спеціалістів.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Конструкція та типи стрічкових конвеєрів

Конструкція конвеєра разом із його складовими елементами зображена на рис. 1.1. Безперервний рух вантажу забезпечується нескінченною транспортерною стрічкою 1, яка зазвичай приводиться в дію приводним барабаном 2 на одному кінці і обертається навколо вільного барабана 7 на іншому. Останній часто виконує функцію натяжного елемента і розміщується в натяжному пристрої 8, що формує загальну конструкцію конвеєра. На схемі (рис. 1.1) наведено окремий приклад натяжного пристрою.

Залежно від функціонального призначення конвеєра, конструкція може включати відхиляючі барабани або ролики для зміни кута нахилу траси, підвищення тягової здатності та забезпечення натягу стрічки. Для підтримки зовнішньої поверхні стрічки використовуються вільно обертові ролики 5 або відповідні настили. Якщо стрічку підтримують центральні горизонтальні та бічні похилі ролики, що забезпечують поперечний вигин (рис. 1.1, пер. А-А), то така конструкція відповідає жолобчастому конвеєру.

Для плавного переходу стрічки з жолобоподібної форми на приводний або натяжний барабан встановлюють перехідні секції. Безроликові стрічкові конвеєри типу ТБ використовують для транспортування сипучих або штучних вантажів по горизонталі або під кутом не більше 15° . Робоча гілка стрічки, яка переміщує вантаж по всій довжині, спирається на суцільний металевий настил або шини, тоді як холоста гілка — на напівкруглі ребра або також на суцільний настил.

Рух приводного барабана здійснюється за допомогою приводу, що включає редуктор 3, електродвигун 4, з'єднані муфтами, а також можливі передачі. Усі основні компоненти, включаючи завантажувальний 9 та розвантажувальний 10 вузли, очисні пристрої, направляючі елементи та інші допоміжні деталі, встановлюються на звареній рамі 6. Конвеєр може бути призначений для горизонтального або похилого транспортування сипучих матеріалів, а також кускових або штучних вантажів.

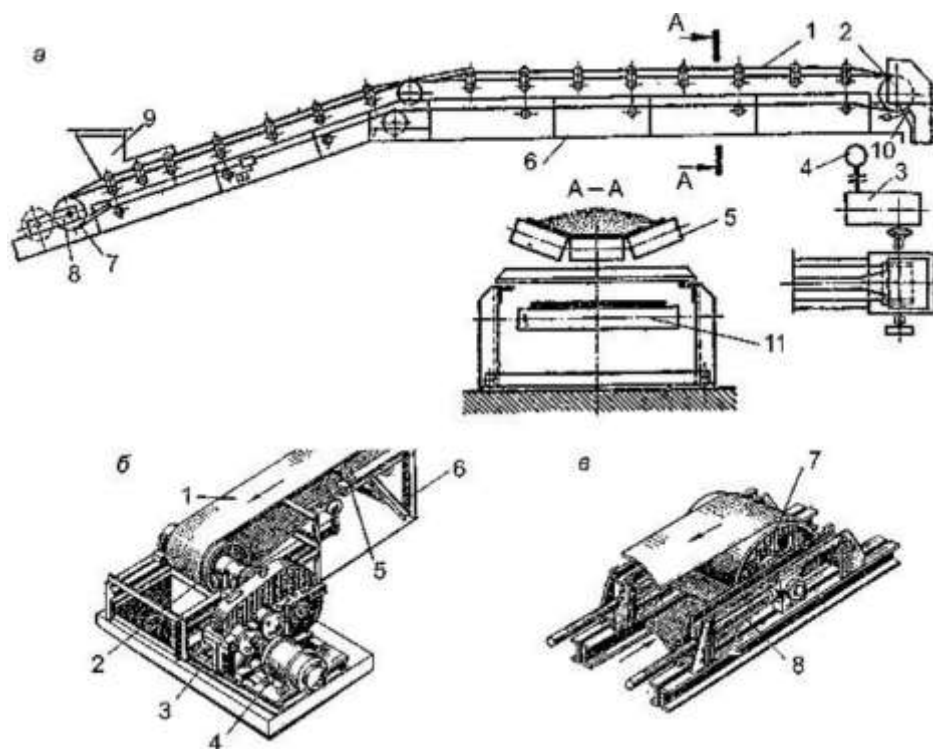


Рис. 1.1. Конструкція стрічкового конвеєра

Типи стрічкових конвеєрів варіюються залежно від виду траси для переміщення вантажу: горизонтальні, похилі, крутонахилені, з мінливим кутом нахилу, горизонтально-похилі, похило-горизонтальні, а також форми, як-от Г-, L-, Z- та U-подібні. Серед них горизонтальні стрічкові конвеєри є одними з найпоширеніших і застосовуються в різних галузях (рис. 1.2). Вони широко використовуються як на виробничих підприємствах, так і на базах та складах. Конвеєри можуть мати різну довжину, адаптуючись до конкретного місця застосування.



Рис. 1.2. Горизонтальний стрічковий конвеєр

Система стрічкових конвеєрів може досягати загальної довжини 10-12 км. Особливістю похилого стрічкового конвеєра є те, що його транспортувальна стрічка встановлена під певним кутом (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Конвеєр похилого типу

Кут нахилу визначається властивостями матеріалу, який транспортується, та типом стрічки і може піддаватися регулюванню. При нахилі понад 18° переміщення забезпечується спеціальною конструкцією стрічки — шевронною (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Похилий конвеєр із стрічкою шевронного типу

Пересувний стрічковий конвеєр обладнаний колесами для легкого переміщення в просторі (рис. 1.5), що дозволяє виконувати розвантаження у будь-якому зручному місці. Цей конвеєр легко розміщується під бортом вантажного транспорту, забезпечуючи ефективне розвантаження сипучих, штучних та кускових матеріалів. Варто зазначити, що продуктивність стрічкових конвеєрів може досягати 30 000 т/год. Ширина стрічок варіюється від 300 мм (вузькі) до 2000 мм (широкі), а швидкість переміщення вантажу становить від 0,5 до 5 м/с.



Рис. 1.5. Конвеєр стрічковий пересувний

1.2. Конвеєрна стрічка

Конвеєрна стрічка є основним елементом стрічкового конвеєра, виконуючи функції як вантажонесучої, так і тягової частини. Завдяки своїй міцній структурі, стрічка може транспортувати різні види матеріалів — сипучі, кускові та штучні вантажі — на значні відстані. Її використання сприяє економічності та безперервності виробничого процесу. Матеріали та конструкція стрічки обираються залежно від типу вантажу, що транспортується. Стрічка може забезпечувати переміщення матеріалу по всій своїй довжині горизонтально, похило або навіть під прямим кутом. Конвеєрні стрічки широко застосовуються в усіх промислових галузях, особливо в хімічній та харчовій промисловості.

Вимоги до конвеєрних стрічок включають високу міцність для передачі тягового зусилля, поперечну гнучкість, що дозволяє утворювати жолоб, мінімальне подовження для скорочення роботи натяжних пристроїв, зносостійкість поверхневого шару, стійкість до ударів, порізів, розшарування, гниття, впливу мікроорганізмів, комах і навколишнього середовища. Стрічки мають бути достатньо тонкими, щоб уникнути розшарування при огинанні барабанів, а також зберігати міцність та форму під час експлуатації. Оптимальною вважається стрічка з мінімальною вартістю та достатньою довговічністю.

Спеціалізовані конвеєрні стрічки повинні відповідати додатковим вимогам, зокрема мати негорючі властивості, зберігати працездатність при низьких температурах, мати низький рівень набрякання у різних середовищах, тривалий опір тепловим навантаженням та можливість транспортування неупакованих харчових продуктів.

1.3. Гумотканинні стрічки

На виробництвах переважно застосовують гумотканинні стрічки, оскільки вони мають невелику вагу, гнучкість, еластичність і високу міцність. За потреби такі стрічки можуть мати спеціальні покриття, рифлення, шеврони та гофроборти, що робить їх економічно вигідним варіантом. Порівняно з гумотросовими стрічками, гумотканинні на 25-30% легші, що дозволяє знизити споживання електроенергії під час експлуатації і зменшує ризик самозаймання (адже при пошкодженні гумотросової стрічки може виникати іскріння металевих тросів).

Кількість спеціальних прокладок у стрічці залежить від умов її використання. Гумотканинні стрічки з каркасом можуть містити до 6-8 шарів тканинних прокладок, що підвищує їхню міцність і довговічність. Тяговий каркас таких стрічок складається з декількох тканинних шарів з проміжними гумовими прокладками і зовнішніми обкладками (рис. 1.6) [3].

Каркас є ключовим елементом конвеєрної стрічки, забезпечуючи необхідну міцність на розрив та подовження під навантаженням, а також поперечну і загальну жорсткість, необхідні для надійного транспортування вантажу. Міцний каркас також підвищує надійність металевих з'єднань та кріпильних елементів.

Багатошарові стрічки включають тканинні прокладки, що складаються з ниток основи, розміщених уздовж стрічки, та поперечних утоківих ниток, які переплітають та підтримують основні нитки. Конструкція та технологія виготовлення основних і утоківих ниток визначають тип тканини, що використовується. Міцність та подовження тканини варіюються по основі та краях: для кращого формування жолобу і ударостійкості застосовують поліефірні нитки, а для підсилення країв — поліамідні.

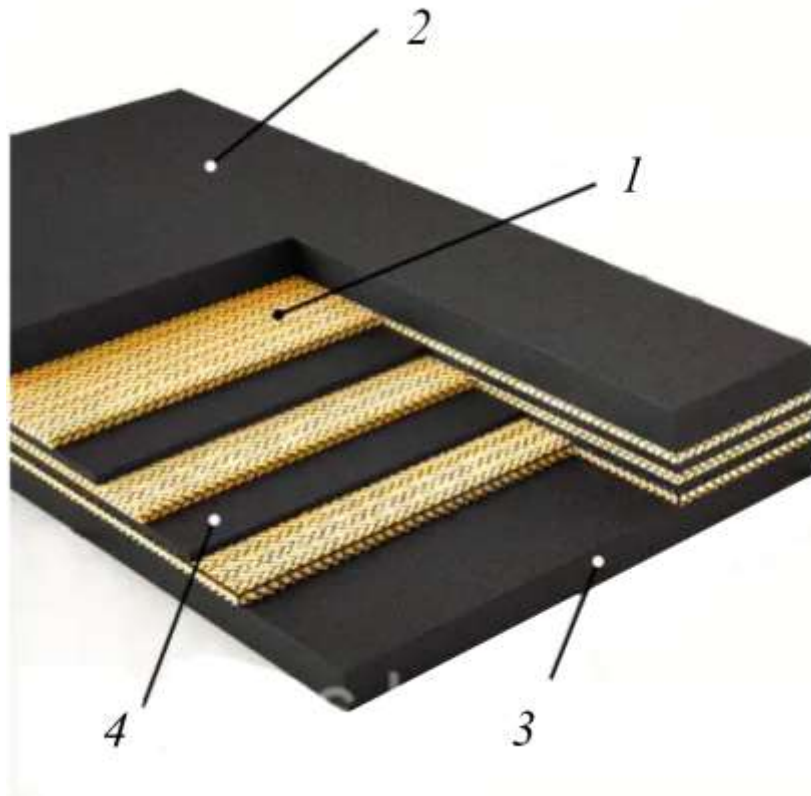


Рис. 1.6. Гумотканинна багатошарова стрічка:

- 1 – тягові тканинні прокладки каркаса
- 2 – гумова обкладка робочої поверхні
- 3 – гумова обкладка неробоча поверхні
- 4 – гумовий прошарок каркаса

Тканинні прокладки для тягових каркасів сучасних гумотканинних стрічок, як вітчизняного, так і закордонного виробництва, зазвичай виготовляються із синтетичних волокон, які отримують у процесі переробки нафти, природного газу та кам'яного вугілля. Гумотканинні стрічки можуть бути багатопрокладковими, двопроткладковими або однопроткладковими з підвищеною міцністю. Прокладки з'єднуються гумовими прошарками, що забезпечують міцність каркасу та адгезію обкладок, а також стійкість до ударних і розривних навантажень. Перед нанесенням гумових обкладок тканини обробляють спеціальними просочувальними речовинами.

Робоча гумова обкладка захищає стрічку від зношування, пошкоджень, агресивних середовищ та атмосферних впливів, одночасно забезпечуючи необхідне тертя між вантажем і поверхнею стрічки. Матеріал обкладки обирається залежно від умов експлуатації та може бути оснащений спеціальним покриттям. Неробоча (опорна) обкладка гарантує захист вантажонесучого елемента від ушкоджень та підтримує необхідні фрикційні властивості на приводному барабані.

Додаткові конструктивні елементи, такі як брекерні прокладки з розрідженої тканини, можуть бути розміщені між каркасом і робочою обкладкою. Брекери підвищують адгезію між обкладкою та каркасом, збільшують поперечну міцність і стійкість стрічки до пробоїв. Гумовий борт по краях стрічки забезпечує захист від розшарування та впливу агресивних середовищ.

Конвеєрні стрічки різняться за типом волокна, з якого виготовляються кордові тканини, а також за типом плетіння. Останнім часом для виробництва високоміцних тканин широко застосовуються синтетичні волокна. В Україні у виробництві стрічок використовують поліамідні та комбіновані тканини, що маркуються відповідно до ГОСТ: поліамідні (ТК, ТА, Р, N), поліефірні (ТЛ, ТЛК, Е) і комбіновані (БКНЛ). На сьогодні популярні тканини на основі поліестеру (Е), поліаміду (Р), нейлону (N) і арамідну (D), які мають низьке

подовження ($\delta = 1,3-1,5\%$) порівняно з іншими синтетичними волокнами ($\delta = 1,5-3,5\%$).

Серед світових виробників конвеєрних стрічок виділяються компанії *Contitech* (Німеччина), *Sava* (Словенія), *Gummilabor* (Італія), *Fenner Dunlop* (Австралія), *AMMERAAL* (Нідерланди), *YOKOHAMA* (Японія), *C&T Chemical Company, Inc.*, *Habasit* (США) та інші.

Конвеєрні стрічки здебільшого мають гумові обкладки, що забезпечують міцність при розтяганні (показники міцності для зовнішніх обкладок наведено в табл. 1.1). Зв'язок між тканинними прокладками та гумою повинен становити 6 Н/мм, а між обкладками та каркасом – 5 Н/мм. Для продовження терміну експлуатації каркасу на робочу і приводну поверхні стрічки наносяться покриття з ПВХ або поліуретану, товщина і якість якого визначаються умовами експлуатації.

Таблиця 1.1 Міцність гуми під час розтягу, МПа

Для гуми класу										
А	Б	І	С	М	Т-1	Т-2	Т-3	Г-1	Г-2	П
24,5	19,6	15,0	10,0	14,7	11,0	10,0	11,0	14,7	14,7	9,8

Примітка. Класи гумових матеріалів загального призначення для конвеєрних стрічок:

- А – гума підвищеної міцності, призначена для важких умов експлуатації;
- Б – гума підвищеної міцності для середніх умов експлуатації;
- І – гума для нормальних умов експлуатації;
- С – гума для легких умов експлуатації;
- М – морозостійка гума, придатна для використання при температурах до -60°C ;
- Т1 – теплостійка гума для експлуатації при температурах до $+100^{\circ}\text{C}$;
- Т2 – теплостійка гума для умов із температурами до $+150^{\circ}\text{C}$;

- ТЗ – теплостійка гума для температур до +200°C;
- Г1 – важкозаймиста гума, що застосовується у вугільних і сланцевих шахтах;
- Г2 – важкозаймиста та морозостійка гума для вугільних шахт;
- П – харчова гума, що використовується в транспортерних стрічках, які контактують з харчовими продуктами.

Максимально допустиме робоче навантаження тягової прокладки гумовотканинної стрічки залежить від умов експлуатації конвеєра, середнього кута нахилу, типу стрічки та кількості тягових прокладок у каркасі. Усі ці параметри впливають на коефіцієнт запасу міцності транспортерної стрічки (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Максимальне робоче навантаження тягової прокладки

Вид стрічки	Кут встановлення конвеєра (по осі кінцевих барабанів), град.	Число тягових прокладок	Максимально припустиме робоче (розрахункове) навантаження тягової прокладки при номінальній міцності, Н/мм				
			400	300	200	100	55
Загального призначення, морозостійка, харчова, важкозаймиста морозостійка	Від 0 до 10	До 5	50	36	25	12	7,0
		Св.5	45	32	22	11	6,0
	Від 10 до 18	До 5	45	32	22	11	5,5
		Св.5	40	30	20	10	5,5
Теплостійка	Від 0 до 18	Від 3 до 6	-	20	13	10	-

Транспортерні стрічки типу EP, виготовлені з поліефірних ниток основи та поліамідних ниток утка, вирізняються низьким подовженням, високою міцністю на розрив та ударною стійкістю, що робить їх придатними для вулканізованих та механічних з'єднань. Стрічки *Normalgum* (Італія) мають багатошаровий тканинний каркас EP (поліестер/поліамід) з обкладками у 2-5 шарів, який розрахований на значні навантаження. Каркас забезпечує низьку розтяжність та високу поперечну гнучкість, що дозволяє амортизувати локальні

удари в зонах завантаження та перевантаження. Ці стрічки здатні працювати в температурному діапазоні від -35 до $+80^{\circ}\text{C}$ [7].

Гумові обкладки конвеєрних стрічок *Normalgum* забезпечують стійкість до стирання, порізів, високих температур, а також до впливу масел і кислот. Основні технічні характеристики стрічок *Normalgum*, зокрема допустимі навантаження (16, 21, 26, 32, 40 і 52 Н/мм ширини), наведено в табл. 1.3. Ці стрічки використовуються для транспортування матеріалів, таких як вапняк, цемент, бетон, кокс, шлаки, щебінь, інертні матеріали, корисні копалини, уламки скла, сіль і вологий пісок, залежно від кількості шарів каркасу.

Стрічки *Normalgum* доступні в ширині від 300 до 1600 мм. У ролі високоякісного матеріалу для конвеєрних стрічок також застосовуються каркаси з чистого поліефіру. Наприклад, компанія *REMA TIP TOP* (Німеччина) постачає стрічки *DBP-POWAPLY* з каркасом типу EE (дод. 1), які відзначаються стійкістю до різноманітних умов експлуатації, включаючи абразивні та різучі навантаження.

Інтерес також викликають стрічки з кордовою тканиною з арамідного волокна або поліімідів. Арамідне полотно *D* поєднує високу міцність та еластичність при значно меншій вазі в порівнянні з металевими каркасами *ST* аналогічної міцності. Технічні характеристики стрічки *Extra D* наведено в додатку 1.

Для підвищення тягової здатності та забезпечення синхронного транспортування без проковзування, нижня сторона деяких стрічок, таких як *Ultrasync* (США) (рис. 1.7, 1.8), оснащена приводними зубами, аналогічними за профілем зубчастим ременям. Конвеєрні стрічки *Ultrasync* мають наступні переваги: забезпечення синхронного руху без проковзування, зниження натягу стрічки, зменшення енергоспоживання та навантаження на підшипникові вузли, можливість ширини до 1000 мм та відповідність харчовим стандартам.

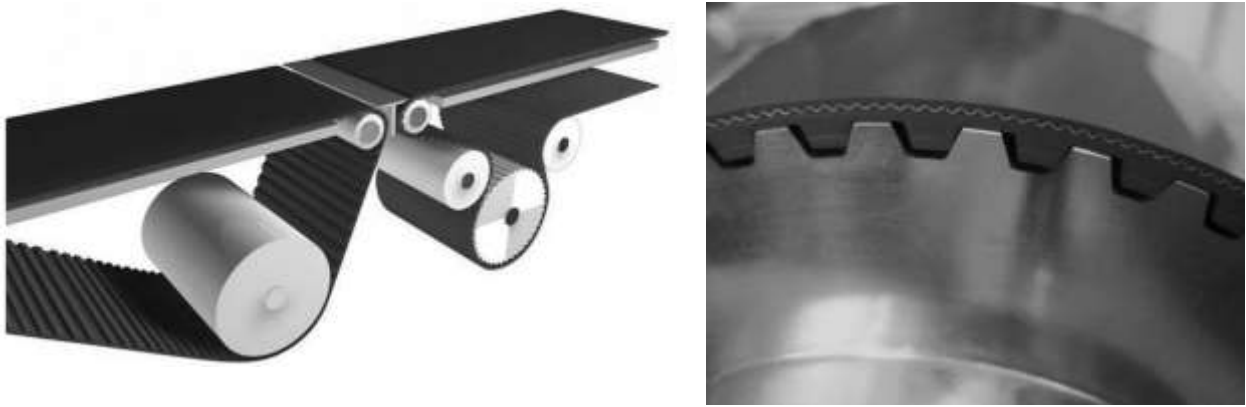


Рис. 1.7. Зубчаста конвеєрна стрічка *Ultrasync*

Стрічки *Ultrasync* (США) виготовляються з поліестерової тканини, яка служить кордом, а для особливо міцних стрічок використовують тканину на основі арамиду (кевлару). Обкладки виконані з термопластичного поліуретану *Ropany*, що є міцним і гнучким матеріалом, стійким до впливу масел і жирів, а також відповідає харчовим і хімічним стандартам.

Як альтернативний варіант використовується термопластичний еластомер *Amtel* з твердістю 90 по Шору, температурним діапазоном від -20 до $+110^{\circ}\text{C}$. Цей матеріал відзначається високою механічною міцністю, зберігає гнучкість за низьких температур, стійкий до масел і жирів, відповідає харчовим стандартам і має високий рівень хімічної стійкості.



Рис. 1.8. Використання харчової транспортувальної стрічки *Ultrasync*

Для збільшення тягової здатності конвеєрної стрічки використовуються спеціальні виступи на внутрішній стороні, які зачіпаються з роликками, що мають відповідні пази. Прикладом такої конструкції є стрічка *Soliflex PRO* (США), яка забезпечує надійне зчеплення та усуває ризик проковзування (рис. 1.9). Стрічка виготовлена зі суміші поліуретану та поліестеру, що відзначаються стійкістю до забруднень, відсутністю поглинання сторонніх запахів та збереженням гладкості поверхні завдяки високій стійкості до порізів і подряпин.

Стрічки *Soliflex PRO* застосовуються в галузях промисловості з високими санітарно-гігієнічними вимогами, таких як птахо- та м'ясопереробка, молочне виробництво, хлібопекарні, овочеві бази та інші підприємства з підвищеними вимогами до чистоти.



Рис. 1.9. Конструкція конвеєрної стрічки *Soliflex PRO*

Позначення гумовотканинних конвеєрних стрічок здійснюється відповідно до ДСТУ 20 – 80 у такій послідовності: тип стрічки, ширина, кількість тканинних прошарків, тип тканини та міцність на розрив, товщина робочої та опорної обкладок, клас гуми обкладок, вид борту (лише для стрічок типу 2, де «ГБ» означає гумовий борт, а «НБ» — нарізний борт).

Сьогодні конвеєрні стрічки з цільнотканинним каркасом широко застосовуються в загальнопромислових конвеєрах завдяки ряду переваг перед багатошарковими та гумотросовими стрічками. За однакової міцності вони

мають у 1,5 рази меншу вагу, що знижує навантаження на конвеєр, зменшує споживання електроенергії, а також підвищує довговічність. Цільнотканий каркас забезпечує високу міцність зчеплення та стійкість до перегинів, витримує ударні навантаження і дозволяє використовувати барабани меншого діаметру. Унікальна технологія виробництва запобігає проникненню вологи у каркас, що в середньому подовжує строк служби в 1,5-2 рази порівняно з багатошаровими стрічками. Основу такої стрічки складає цільноткане полотно підвищеної міцності, просочене ПВХ (полівінілхлорид) (рис. 1.10).

Залежно від призначення та умов експлуатації зовнішня обкладка виготовляється з гуми або ПВХ, з'єднання каркасу з обкладкою здійснюється методом вулканізації. Для виробництва конвеєрних стрічок цього типу використовують три види ПВХ:

- Антистатичний ПВХ – інноваційний матеріал, що забезпечує антистатичні властивості як для каркасу, так і для робочої поверхні стрічки;
- ПВХ з підвищеною абразивостійкістю (щільність 74...92 А);
- ПВХ з підвищеною стійкістю до масел та жирів.

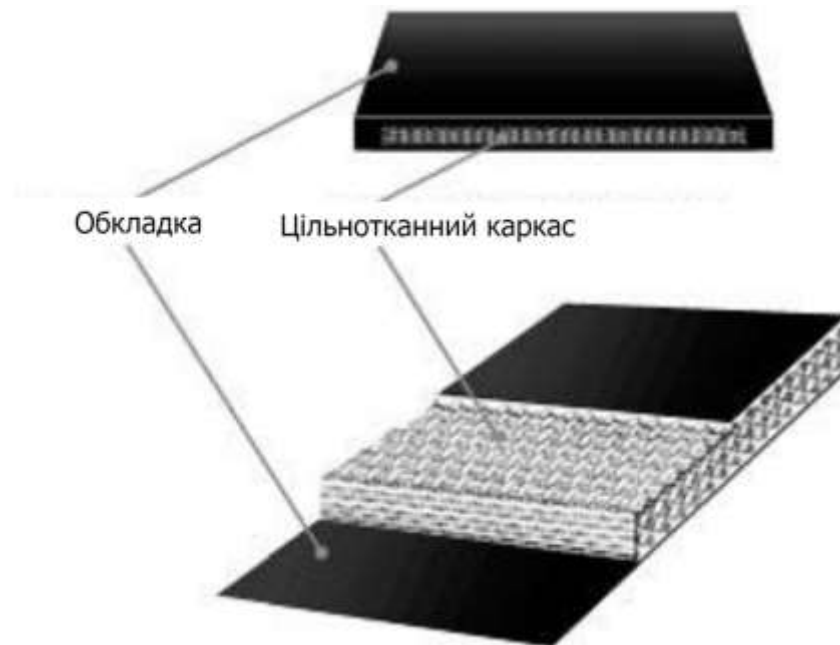


Рис. 1.10. Стрічка конвеєрна з цільнотканим каркасом

Конвеєрні стрічки з цільнотканим каркасом виробляються багатьма закордонними та вітчизняними компаніями, які постачають стрічки,

виготовлені з різних еластомерних матеріалів (спеціальні види гуми) та кордів із поліамідних і поліестерових тканин. Впроваджено також інноваційну систему *Zip Link* (США), яка базується на поліефірному моноволокні. Основна перевага системи *Zip Link* полягає у швидкому та простому з'єднанні стрічок, що забезпечує зручність і якість монтажу.

Ці стрічки мають тривалий термін служби та відзначаються високими експлуатаційними якостями: робочий діапазон температур від -40 до $+150^{\circ}\text{C}$; стабільність властивостей по всій довжині стрічки; придатність для використання як на плоских, так і на жолобчастих конвеєрах; висока бічна стійкість *Zip Link*, що полегшує збереження рівного ходу стрічки; широкий вибір захисних покриттів, що дозволяє використовувати їх у важких умовах і для специфічних завдань.

Основні галузі застосування: автомобільна промисловість; сільське господарство; хімічна промисловість; деревообробка; харчова промисловість.

Спеціальні стрічки для харчової промисловості мають дозвіл на прямий контакт із продуктами харчування, що дозволяє використовувати їх у харчових виробництвах відповідно до високих стандартів безпеки.



Рис. 1.11. Використання конвеєрної стрічки з *Butyl* покриттям

Спеціальні покриття конвеєрних стрічок для харчової та інших галузей:

- *Butyl* – робоче покриття з бутилової гуми, яке використовується в харчовій промисловості, особливо у виробництві молочних виробів, а також для заморожування продуктів (морозиво, фрукти, овочі, пельмені тощо) (рис. 1.11).

- *Silam HVS* – стрічки з силіконовим покриттям, які широко застосовуються при виробництві карамельних виробів, жувальної гумки, для транспортування гарячої випічки, а також у хімічній промисловості.
- *Nitrile* – покриття на основі карбоксилатних нітрільних каучуків з високою зносостійкістю, ідеально підходить для застосування в цукровій промисловості.
- *Fabric* – тканинне покриття, що використовується в харчовій промисловості, зокрема при випіканні хліба.

1.4. Зношування конвеєрних стрічок

Конвеєрні стрічки широко застосовуються в різних виробничих процесах, але не завжди користувачі дотримуються технічних рекомендацій щодо вантажопідйомності та температурного режиму експлуатації. Це призводить до надмірного навантаження на полотно, внаслідок чого виникають розриви, порізи та інші пошкодження. Своєчасний ремонт конвеєрної стрічки, який буває поточним або відбудовним, допомагає підтримувати її в робочому стані. Відбудовний ремонт передбачає екстрене відновлення полотна до його первісного стану.

Найбільш поширені види пошкоджень конвеєрної стрічки включають:

- поздовжні та поперечні порізи;
- бічні зрізи (через неправильне завантаження або вивантаження);
- обтріпування країв стрічки;
- наскрізні пробої (через падіння гострих предметів).

Зношування конвеєра є природним і неминучим процесом. Однак, якщо стрічку доводиться замінювати майже щомісяця, це свідчить про наявність серйозніших проблем на виробничій або транспортувальній лінії. Такі проблеми є основними причинами прискореного зношування, додаткових витрат і втрат прибутку.

Основні причини швидкого зношування конвеєрної стрічки можна згрупувати за певними категоріями. Статистичні дані також дозволяють

виділити найбільш поширені помилки, пов'язані з експлуатацією конвеєрів (рис. 1.12).

Згідно зі статистикою, швидке зношування конвеєрної стрічки в 26% випадків пов'язане з неправильно підібраним типом стрічки. Помилки в виборі матеріалу робочої поверхні, твердості чи інших параметрів часто призводять до значного зменшення терміну служби.

Інші основні причини включають:

- порушення прямолінійності конвеєра – 19%;
- заклинені або зношені допоміжні ролики, що не можуть обертатися – 17%;
- зношування стрічки через розсипаний матеріал – 10%;
- невідповідність полотна діаметру барабанів – 8%;
- падіння вантажу з надмірно великої висоти – 5%.

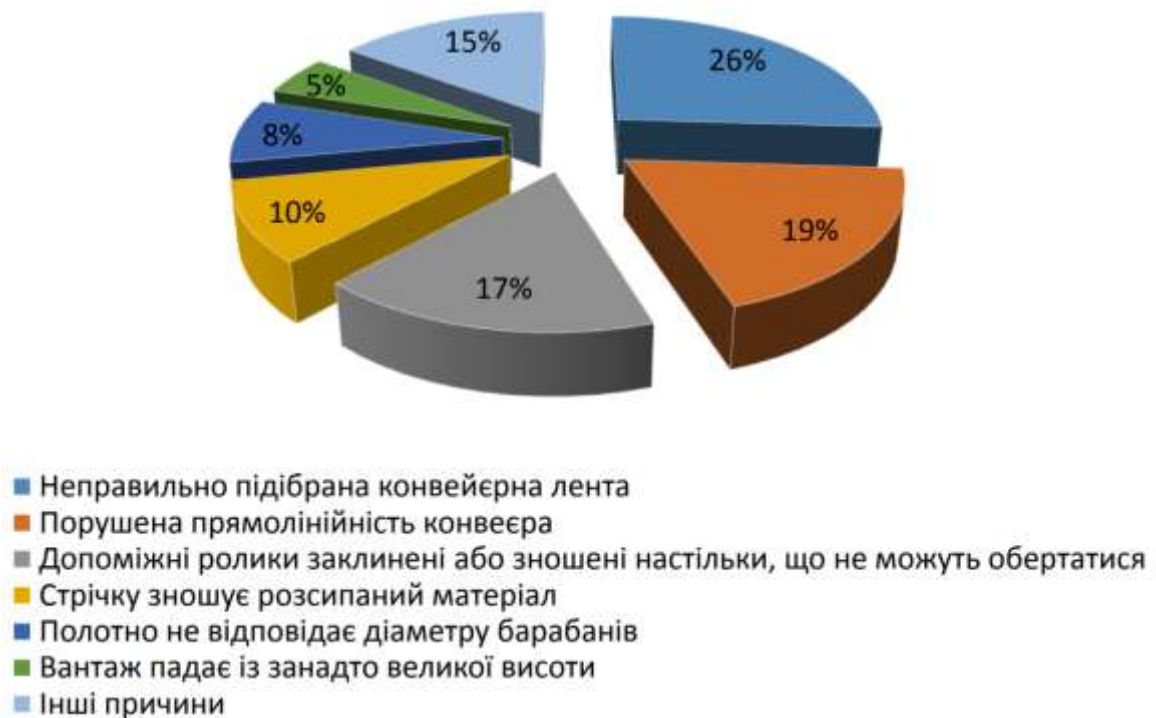


Рис. 1.12. Діаграма основних причин зношування стрічок конвеєра

Ці фактори є основними причинами передчасного зношування стрічки (рис. 1.13-1.16), що призводить до підвищених витрат на обслуговування та ремонт.



Рис. 1.13. Надірвана конвеєрна стрічка



Рис. 1.14. Утворення тріщин і порив конвеєрної стрічки

Основні причини пошкоджень конвеєрної стрічки та їх наслідки:

1. Пробуксовування стрічки на ведучому валу

- Причини: перевантаження стрічки; перекіс вала; надто малий кут охоплення вала; потрапляння мастильних матеріалів на поверхню вала або нижню частину стрічки.

- Наслідки: підвищується навантаження на всі вузли, що спричиняє їхнє прискорене зношування. Стрічка швидше виходить з ладу через збільшене тертя.

2. Зношування робочої поверхні

- Причини: пробуксовування стрічки; надмірне провисання між підтримувальними роликami; тертя об сторонні предмети; невідповідність типу

покриття стрічки матеріалам, що транспортуються (низька стійкість до абразивних, масложирових та інших впливів).

- Наслідки: швидке зношування робочої поверхні, що призводить до частих ремонтів і заміни стрічки.

3. Зношування несучого шару

- Причини: заклинювання роликів у верхній частині конвеєра; зношування ведучого або допоміжного барабана; потрапляння транспортуваного матеріалу під стрічку.

- Наслідки: зниження міцності стрічки та необхідність ремонту несучого шару.

4. Обрив у місці стикування кінців

- Причини: перевантаження конвеєра; потрапляння транспортуваного матеріалу на барабан; невідповідний діаметр валів; недотримання технологій стикування.

- Наслідки: обрив стрічки в місцях з'єднань, що вимагає екстреного ремонту та відновлення стику.



Рис. 1.15. Розшарування стрічки у місцях склеювання

5. Поздовжні порізи

- Причини: руйнування підтримувальних роликів, через що стрічка спирається на кронштейни роликів і швидко зношується; тертя об нерівності поверхонь.

- Наслідки: швидке стирання та пошкодження стрічки, що потребує заміни або ремонту.

6. Пробій (розрив) поверхні

- Причини: невідповідний вибір навантажувального лотка, внаслідок чого матеріал падає на стрічку з надмірно великої висоти.

- Наслідки: пошкодження поверхні та необхідність ремонту або посилення поверхні для захисту від ударів.

7. Швидке зношування країв

- Причини: неправильне центрування стрічки, внаслідок чого вона третрється об станину; невідповідний тип стрічки, наприклад, застосування стрічок із незапаяним краєм у середовищах з підвищеним рівнем води або масла.

- Наслідки: прискорене зношування країв, що призводить до потреби в регулярному обслуговуванні та заміні стрічки.



Рис. 1.16. Бічний знос стрічки

8. Розбухання та розшарування стрічки

- Причини: застосування стрічки з незапаяними краями або відкритим кордом у місцях з впливом води або масла; механічні пошкодження країв; проникнення води або масла в мікропоризи на поверхні стрічки.

- Наслідки: розбухання та розшарування стрічки, що скорочує її термін служби та потребує додаткових ремонтних робіт або заміни.

Це перелік лише найпоширеніших проблем, що виникають під час експлуатації конвеєрних стрічок, але на їхній термін служби впливають й інші

фактори. Наприклад, неправильне зберігання або транспортування може спричинити критичні пошкодження ще до початку використання. Однак правильне та своєчасне обслуговування виробничої лінії здатне значно продовжити строк служби стрічки, мінімізуючи ризик ушкоджень.

1.5. Конвеєрні барабани

Конвеєрні барабани є ключовими елементами стрічкового конвеєра. Залежно від їхньої ролі у функціонуванні конвеєра, барабани можуть бути приводними та натяжними. Натяжні барабани, у свою чергу, поділяються на хвостові, головні, оборотні, обвідні, притискні та відхиляючі, що зумовлює різноманітність їхніх конструкцій. Заводи-виробники комплектуючих для стрічкових конвеєрів пропонують широкий асортимент конструкцій барабанів. Приводний барабан монтується на вал, оскільки він передає рух конвеєрній стрічці через крутний момент і забезпечує задану швидкість її руху (рис. 1.17).

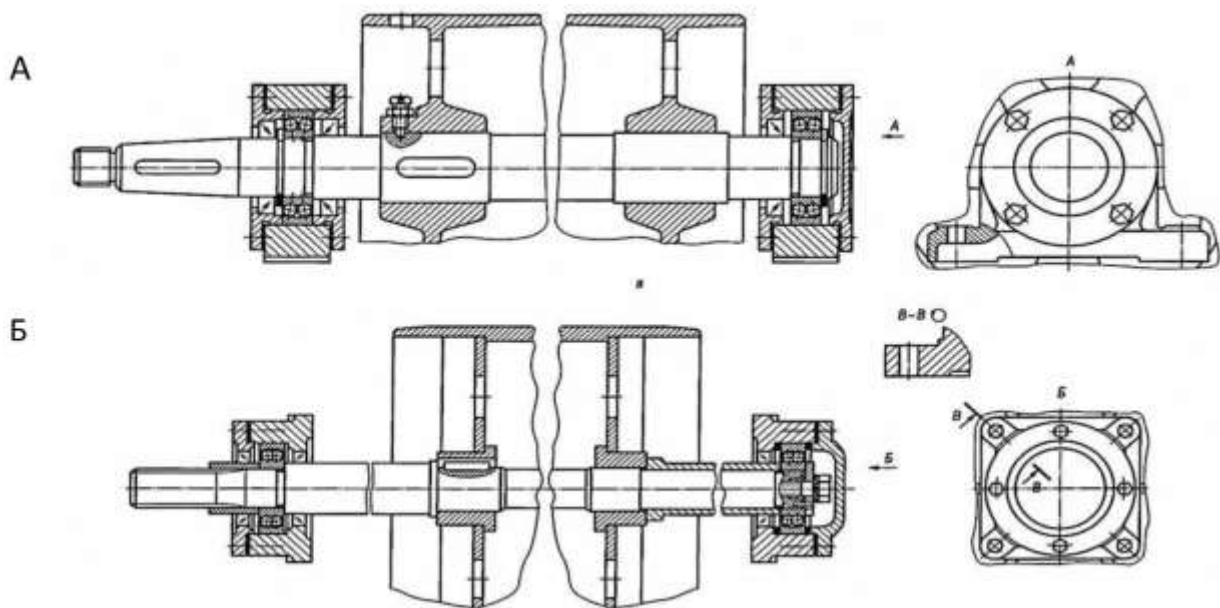


Рис. 1.17. Конвеєрні приводні барабани змонтовані на валу: А – вилитий; Б - зварений

Кожен барабан конвеєра розрахований на певну потужність, тому основними його параметрами є міцнісна та функціональна характеристики. Чим більший крутний момент та допустиме навантаження на стрічку, тим вищою є

міцнісна характеристика барабана. Функціональна характеристика визначається формулами розрахунку сили тертя між стрічкою та барабаном.

Для підвищення сили тертя (коефіцієнта тертя) між стрічкою та барабаном його поверхню можна футерувати матеріалами, як-от гума або еластомір, зокрема нітриловим каучуком (твердість 60...80) або уретаном (твердість 80...90). Такі фрикційні покриття можуть бути застосовані у вигляді труб, листів або розпилення (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Конвеєрні приводні барабани, футеровані гумою

1.6. Загальні висновки і задачі кваліфікаційної роботи

На підприємствах використовують різні типи конвеєрних стрічок, переважно виробництва України та Китаю, а до 2013 року також застосовували стрічки російського виробництва. На сьогодні на український ринок вийшли німецькі виробники стрічок, але їхня вартість удвічі або навіть утричі вища. Дані щодо їхньої поведінки в експлуатації наразі обмежені, тому метою роботи є обґрунтування параметрів гумово-тканинних стрічок від різних виробників та оцінка їхньої довговічності.

У роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкції та роботи стрічкових конвеєрів, а також аналіз причин відмов стрічок;
- розробити заходи щодо гумування барабана;
- розрахувати основні параметри стрічкового конвеєра та стрічки;
- розробити методику експериментальних досліджень і провести їх;
- розробити заходи з охорони праці та провести техніко-економічну оцінку результатів роботи.

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З БАРАБАНОМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНВЕЄРА

2.1. Взаємодія конвеєрної стрічки з барабаном

Взаємодія конвеєрної стрічки з барабаном є ключовим аспектом роботи конвеєра, від якого залежить ефективність передачі тягового зусилля, рівномірність руху стрічки та її зносостійкість. Правильне налаштування параметрів цієї взаємодії дозволяє уникнути пробуксовування стрічки, надмірного тертя та передчасного зношування.

Розглянемо основні чинники, що впливають на взаємодію стрічки з барабаном, такі як кут охоплення, коефіцієнт тертя, сила натягу та тип фрикційного покриття на поверхні барабана.

Подамо наявну експериментальну інформацію з цього питання у вигляді коротких емпіричних узагальнень.

Механіка взаємодії стрічки з барабаном базується на теорії Ейлера про ковзання гнучкої нитки, перекинутої через гладкий циліндр. Для визначення тягового зусилля W , Ейлер отримав вираз такого вигляду [8]:

$$W = S(e^{\mu\alpha} - 1), \quad (2.1)$$

де S – сила натягу стрічки на вхідній ділянці;

μ – коефіцієнт тертя між стрічкою і барабаном;

α – кут охоплення стрічкою барабана (у радіанах).

Для сучасних конвеєрів формула Ейлера є застосовною лише за умов малих швидкостей руху, чистих контактних поверхонь та малої ширини стрічки. Однак практично всі теорії конвеєробудування певним чином використовують цей вираз.

У подальших дослідженнях коефіцієнт тертя μ було замінено на коефіцієнт зчеплення f , що за фізичною сутністю аналогічний коефіцієнту тертя, але додатково враховує певні особливості в зоні контакту стрічки та барабана. Експериментальні дані свідчать, що зусилля в зоні контакту мають

нелінійний і стохастичний характер, а також імовірно залежать від забруднення.

Коефіцієнт зчеплення не є постійним і залежить від ряду факторів, серед яких основними є:

- Ширина стрічки та швидкість її руху: з ростом швидкості тягові можливості стрічки збільшуються.
- Діаметр барабанів: з більшим діаметром збільшується тягове зусилля.
- Присос стрічки до барабана: це явище спостерігається переважно на металевих барабанах і має ймовірнісний характер; за наявності гумової футерівки воно зазвичай не проявляється.
- Фрикційні властивості стрічки та футерівки барабана: у ранніх конвеєрах використовували футерівки з шорсткою поверхнею (корунд, бетон, кераміка), які спричиняли зношування стрічки, залишаючи гумовий шар на металевому барабані. Сучасні конвеєри здебільшого використовують гумову футерівку, яка є більш щадною до стрічки.
- Забруднення або волога в зоні контакту: це явище має ймовірнісний характер, тому вивчене недостатньо. У [9] пропонується класифікація середовища контакту як "дуже волого", "волого" і "сухо", з найнижчим значенням коефіцієнта зчеплення для "дуже вологого" контакту. У [10], припускаючи локалізацію вологи у вигляді лінз, для середньозваженого коефіцієнта зчеплення f_c було отримано наступний вираз

$$f_c = \frac{N_p f_p + S_B \tau_B}{N_p + N_B}, \quad (2.2)$$

де N_p – сумарний тиск на площу контакту, не зайняту рідиною; f_p – коефіцієнт тертя стрічки по барабану; S_B – сумарна площа лінз рідини; τ_B – питомий опір зрушенню рідини; N_B – сумарний тиск, що припадає на лінзи рідини.

Як видно, опір тертя на рідинних лінзах залежить від товщини шару рідини, відносної швидкості руху та площі самих лінз. Наявність вологи та твердих часток у зоні контакту знижує коефіцієнт зчеплення, що може призвести до пробуксовування стрічки. В результаті підвищується відносна

швидкість ковзання стрічки по барабану, що сприяє інтенсивному видаленню часток і вологи із зони контакту, у кінцевому підсумку підвищуючи коефіцієнт зчеплення та стабілізуючи роботу конвеєра.

Експериментальні дослідження [11] показали, що працездатність конвеєра значною мірою залежить від ступеня та характеру забруднення барабана. Забруднення внутрішньої поверхні стрічки частками матеріалу, що транспортується (такими як вугілля, пісок, руда тощо), може призвести до значного зниження коефіцієнта зчеплення. Автори розробили емпіричну формулу для розрахунку середньозваженого коефіцієнта зчеплення у вигляді:

$$f_{cp} = \frac{N_{ck} f_{ck} + K \frac{N_k}{r}}{N_{ck} + N_k}, \quad (2.3)$$

де N_{ck} і N_k – нормальний тиск, що припадає відповідно на площі ковзання й на тіла кочення (частки матеріалу); f_{ck} – коефіцієнт тертя ковзання стрічки по робочій поверхні барабана; r – радіус часток кочення; K – коефіцієнт кочення частки між третьювими парами.

Формулу (2.3) отримано для забруднень із розміром часток 0,5–1 мм за умови їх перекочування у зоні контакту. При цьому коефіцієнт зчеплення становив близько 0,2–0,3, що свідчить про значне зниження зчеплення у разі наявності часток такого розміру між стрічкою та барабаном. Експлуатаційний тиск стрічки на барабан зазвичай становить 0,25–0,40 кг/см². При цьому площа фактичного контакту між барабаном і стрічкою знаходиться в межах 5–20% від загальної контактної поверхні.

При використанні барабанів із гумовою футерівкою в стрічкових конвеєрах, тягове зусилля стрічки залежить не тільки від сил тертя, але й від деформації шару футерівки. Дослідження [11] підтвердили цей факт, встановивши, що коефіцієнт зчеплення прямо пропорційний товщині гумової футерівки й обернено пропорційний твердості гуми.

Для гладких металевих барабанів тягове зусилля суттєво залежить від ступеня забруднення: навіть невеликі забруднення матеріалом у зоні контакту

можуть зменшити тягову здатність у 3–5 разів. При використанні рифленої гумової футерівки цей ефект виражений набагато слабше [11].

З наведених узагальнень можна зробити важливі висновки:

Гумова футерівка барабана має такі переваги:

- збільшує тягову здатність стрічки;
- знижує динамічні зусилля в системі «стрічка – приводний барабан»;
- знижує вібронапруженість у деталях і вузлах конвеєра, поглинаючи низько- та високочастотні коливання;
- зменшує зношування стрічки;
- завдяки рифленням знижує вплив забруднень у зоні контакту;
- мінімізує можливість автоколивань, пов'язаних із високими швидкостями стрічки (близько 20 м/с) або її пробуксовуванням через забруднення в зоні контакту.

Коефіцієнт зчеплення є ключовою розрахунковою величиною, достовірні значення якої можна отримати тільки шляхом експериментальних досліджень у максимально наближених до експлуатаційних умовах.

2.2. Феноменологічні моделі взаємодії конвеєрної стрічки з барабаном

Окрім емпіричного підходу, що базується на багаторічному досвіді експлуатації стрічкових конвеєрів, існують принаймні два додаткові підходи для визначення оптимальної товщини гумової футерівки барабана:

1. Кінематичний підхід. Цей підхід орієнтований на вибір експлуатаційних параметрів стрічкових конвеєрів, зокрема, тягового зусилля. У такому разі модель повинна враховувати механізм взаємодії між стрічкою та гумовою футерівкою барабана, що дозволяє оптимізувати параметри для забезпечення надійного зчеплення та мінімізації зношування.

2. Термодинамічний підхід. Цей підхід розглядає футерівочний шар як термодинамічну систему, в якій враховуються процеси передачі тепла та енергії, що виникають внаслідок деформацій та тертя в зоні контакту. Такий

підхід дозволяє оцінити параметри футерівки з огляду на теплові навантаження та їхній вплив на довговічність стрічки.

Кінематичний підхід. Силу тяги, яку може передати ролик без урахування втрат, можна виразити у вигляді співвідношення

$$W = S_{нб} - S_{сб} = S_{сб} (e^{f\alpha} - 1), \quad (2.4)$$

де S – зусилля набігаючої і збігаючої гілок конвеєрної стрічки;

Величину $T = e^{f\alpha}$ зазвичай називають тяговим фактором. В [12] є таблиці для залежності коефіцієнта зчеплення від тягового фактора й експериментальні значення f для барабанів у положенні «сухо – волого»; так, для металевих барабанів $f = 0,1 \div 0,35$; для барабанів з гумовою футерівкою $f = 0,15 \div 0,50$.

З рівняння (2.4) видно, що чим більше сила тяги, тим вище натяг стрічки і тим більше коефіцієнт зчеплення. Небажане збільшення натягу, щоб збільшити кут окружності α , потребує досить складного багатобарабанного приводу та відхиляючого барабана. Тому, з практичної точки зору, найбільш переважно підвищити коефіцієнт зчеплення і для цього використовувати гумову підкладку.

У роботі [11] розглянуто модель взаємодії магнітної стрічки з прогумованим барабаном. Схема розрахунку наведена на рисунку 2.1 При розгляді умови рівноваги гнучкої лінії на суцільному барабані сила, дотична до поверхні, буде дорівнювати нормальній силі, помноженій на коефіцієнт зчеплення. При наявності на барабані гумової підкладки шар гуми стискається під дією нормальної сили, і дотична до поверхні шару, проведена в точці дії нормальної сили, не збігається з прямою, проведеною від цієї точки перпендикулярно напрямному радіусу від центру обертання до цієї точки. Тобто, крім сили тертя, що приблизно дорівнює нормальному тиску, помноженому на коефіцієнт зчеплення, деяка складова нормального тиску $N \cos \beta$ також діє в тангенціальному напрямку (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Розрахункова схема гнучкої передачі за наявності футерівки

Автори роботи [11] отримали таку спрощену формулу, але яка має зрозумілий фізичний зміст, пов'язавши основні параметри конвеєра з товщиною гумової футерівки:

$$f\alpha = \ln\left(1 + \frac{W}{S}\right) - \frac{hW}{\rho^2 BE}; \quad (2.5)$$

$$\rho = R_0 + h(1 - \Delta),$$

де E – модуль пружності гуми; B – ширина стрічки; h – товщина гумової футерівки; R_0 – радіус металевого барабана; Δ – відносна деформація стиску гумової футерівки. З даного рівняння можна одержати формулу Ейлера, тобто $W = S(e^{f\alpha} - 1)$.

Як впливає з (2.5), при однаковому α сила тяги буде тим більшою, чим вище відношення h/ρ^2 і менший модуль пружності гуми, тому автори [11] роблять наступні висновки: ефективно збільшити силу тяги, потрібна більша товщина гумового покриття.

Динамічний підхід. У формулі (2.1) Ейлер використовував коефіцієнт тертя μ , справедливо вважаючи, що його достатньо для опису взаємодії нитки і циліндра з гладкою поверхнею. Жуковський розглядав цю задачу ширше і ввів поняття коефіцієнта зчеплення, величина трохи менша за коефіцієнт тертя. Математична формула (2.1) побудована таким чином, що тільки коефіцієнти μ або f відображають всю різноманітність механічних процесів, що відбуваються в зоні контакту. Тому у випадку реальних стрічкових конвеєрів фізична сутність цих параметрів виходить далеко за рамки коефіцієнта тертя або коефіцієнта зчеплення, і правильніше говорити про коефіцієнт динамічної

взаємодії. Цей коефіцієнт повинен враховувати реологічні властивості стрічки і матеріалу футеровки (з урахуванням частоти і амплітуди деформації, тобто вібраційного навантаження барабана), площу контакту стрічки з барабаном, коефіцієнт тертя гуми об гуму тощо.

У загальному випадку вираз для коефіцієнта динамічної взаємодії f_q можна виразити у вигляді

$$f_q = \mu_p [1 - \exp(-\beta z)]; \quad f_q < \mu_p \quad (2.6)$$

де μ_p – коефіцієнт тертя гуми по гумі; β – коефіцієнт, що враховує в'язкопружні властивості стрічки й футерівки; z – коефіцієнт, що враховує геометричні особливості поверхні футерівки: площа контакту зі стрічкою (тобто розміри рифлей);

$$\beta = \beta(E_s, E_\phi, \psi_s, \psi_\phi, \nu_s, \nu_\phi); \quad z = z(h_\phi, k_\phi),$$

де E_s, E_ϕ – модуль пружності стрічки й футерівки відповідно; ψ_s, ψ_ϕ – коефіцієнти дисипації енергії; ν_s, ν_ϕ – коефіцієнти Пуассона; k_ϕ – коефіцієнт, що враховує геометричні розміри рифлей; h_ϕ – товщина гумової футерівки.

Як видно з (2.6), коефіцієнт динамічної взаємодії можна визначити експериментально з достатньою для практики точністю як інтегральну характеристику характеристик взаємодії в системі «стрічка-барабан-середовище». Звичайно, значення f_q є нелінійним і стохастичним навіть для найсприятливіших умов роботи конвєса. При спрощеному підході до розрахунків він збігається з коефіцієнтом зчеплення.

2.3. Вибір товщини футерівки для зниження вібраційних навантажень

На дузі обхвату, тобто поперед реальної площі контакту, виникає пружна хвиля; її частота відповідає числу обертів барабана. Величина хвилі буде визначатися властивостями гуми й зусиллям натягу стрічки. Така рухома хвиля, завдяки високій дисипації енергії гуми буде сприяти гасінню шкідливих коливань у системі «стрічка - барабан - матеріал, що транспортується» і в

цілому сприяти зниженню вібронавантаженості. При малих товщинах футерівки, гасіння коливань буде мінімальним; у міру росту товщини футерівки будуть поліпшуватися й динамічні характеристики системи а, отже, знижуватися вібронапруженність.

2.4. Рекомендації світової практики

Формула (2.5) свідчить про те, що чим товстіша футерівка, тим необхідно більше тягове зусилля, тим менша вібронапруженність та кращі динамічні характеристики; товщина гумової футерівки обумовлена наступними чинниками: економічною; міцністю зв'язку «метал – гума» та величиною напружень стиску в гумі.

У світовій практиці така фірма як *NILOS GmbH & Co*, пропонує застосування двошарової футерівки. В ідеальних умовах футерівка повинна мати три шари: нижній шар h_1 із гуми, що має хорошу адгезією до металу; середній шар h_2 із гуми з високими властивостями вібропоглинання; верхній шар h_3 має складатися із зносостійкої гуми (тут $h_1 < h_2 < h_3$).

Для стрічкових конвеєрів рекомендовано наступний параметричний ряд товщин гумової футерівки: 8, 10, 16, 20, 26 мм.

Розміри рифлей і канавок з геометричного міркування залежать від розміру барабана і ступеня його забруднення у зоні контакту. Геометричні розміри рифлей ромбічної форми наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Геометричні розміри ромбічних рифлів

$h\phi$, мм	10	16	20	26
a , мм	40	80	100	120
b , мм	20	40	50	60
c , мм	4	6(7)	7 (8)	8
d , мм	4	5 (6)	6 (7)	8

Примітка: (*) - можливі варіанти розмірів рифлей; a , b – діагональ ромба, c – ширина канавки, d – глибина канавки.

2.5. Розрахунок конвеєра стрічкового типу

Розраховували стрічковий конвеєр, призначений для транспортування пшениці. Конвеєр похило-горизонтальний (рис. 2.1), розвантаження фронтальне через двобарабанний розвантажувальний візок. Конвеєр розміщений в закритому приміщенні з середніми умовами експлуатації.

Продуктивність конвеєра $Q = 80$ т/год, розміри ділянок траси конвеєра:

$$L_1 = 120 \text{ м}; L_2 = 100 \text{ м}; L_3 = 4 \text{ м}; L_4 = 96 \text{ м}; L_5 = 110 \text{ м}; L_6 = 10 \text{ м};$$

$$H = 20 \text{ м}; H_1 = 0,8 \text{ м}; h_T = 1,65 \text{ м}.$$

Насипна щільність пшениці $\rho = 0,75$ т/м, кут природного ухилу пшениці у стані спокої $\varphi_{\text{сп}} = 30^\circ$, кут природного ухилу пшениці під час руху $\varphi_p = 0,7\varphi_{\text{сп}} = 0,7 \cdot 30 = 21^\circ$. Привод стрічкового конвеєра – однобарабанний із футерованим барабаном і кутом його охоплення 210° . Кут нахилу ділянки конвеєрної траси $\frac{L_2}{\beta} = \arctg \frac{H}{L_2} = \arctg \frac{20}{100} = 11^\circ$.

Біля приводного барабана встановлено додатковий відхиляючий барабан для збільшення кута охоплення конвеєрної стрічки. Визначимо ширину (м) конвеєрної стрічки:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{Q}{k_n \rho v k_\beta}} + 0,05 \right) = 1,1 \left(\sqrt{\frac{80}{625 \cdot 0,75 \cdot 2,5 \cdot 0,85}} + 0,05 \right) = 0,366 \text{ м}, \quad (2.7)$$

де $Q = 80$ – продуктивність стрічкового конвеєра, т/год ;

$k_n = 625$ – коефіцієнт продуктивності ($\alpha_{\text{ж}} = 0,75$ і $\varphi_p = 30^\circ$);

$\rho = 0,75$ – насипна щільність пшениці, т/м;

$v = 2,5$ – швидкість переміщення стрічки, м/с;

$k_\beta = 0,85$ – коефіцієнт, що враховує зсипання пшениці на похилих ділянках конвеєра.

Приймаємо ширину конвеєрної стрічки $B = 400$ мм згідно стандартних розмірів [14].

Рис. 2.2 – Схема траси стрічкового конвеєра і діаграма натягу стрічки

Згідно рекомендацій (табл. 2,1), із врахуванням ширину конвеєрної стрічки приймемо наступні роликові опори: робочої ділянки – трироликову, холостої ділянки – однороликову.

Враховуючи рекомендації таблиці (табл. 2,1) приймаємо діаметри роликів роликової опори $P_d = 108$ мм. Відстань між роликовими опорами робочої вітки конвеєра приймаємо рівною $l_p = 1,5$ м [14]. Відстань між роликовими опорами на далянці навантаження приймемо $l_z = 0,5l_p = 0,5 \cdot 1,5 = 0,75$ м. На похилих ділянках робочої вітки конвеєра встановимо трироликові опори з відстанню 0,65 м. На неробочій вітці конвеєра роликові опори розрашуємо на відстані $l = (2 \dots 3)l_p = 2 \cdot 1,5 = 3$ м.

Визначимо тягове зусилля:

$$W_0 = k_0 L g \left[(q + q_0 + q_p) \omega + (q_0 + q'_p) \omega' \right] + qgH,$$

де k_0 – коефіцієнт місцевих опорів, $k_0 = 1,15 \dots 1,5$;

$L = L_1 + L_2 = 120 + 100 = 220$ м – відстань транспортування пшениці;

q – розподілена маса пшениці, кг/м;

q_0 – розподілена маса стрічки, кг/м;

q_p, q'_p – маса роликів робочої і холостої віток конвеєра, ($q_p = 8,4$ кг/м, $q'_p = 2,5$ кг/м [14]);

ω та ω' – коефіцієнти опору руху стрічки робочої і холостої віток конвеєра, ($\omega = 0,025$, $\omega' = 0,022$ [14]).

Маса насипного вантажу:

$$q = \frac{Q}{3,6 \cdot v} = \frac{80}{3,6 \cdot 2,5} = 8,9 \text{ кг/м.}$$

Розподілена маса стрічки:

$$q_0 = 0,0011(\delta_0 \cdot i_{\text{п}} + \delta_1 + \delta_2) \cdot B = 0,0011(1,2 \cdot 4 + 3 + 1) \cdot 400 = 3,9 \text{ кг/м,}$$

де δ_0 – товщина прокладки, мм. Для тканин міцністю 55 Н/мм приймають $\delta_0 = 1,2$ мм, а для тканин міцністю 400 Н/мм – $\delta_0 = 2$ мм.

δ_1, δ_2 – товщини відповідно верхньої і нижньої обкладок, мм.

$i_{\text{п}}$ – кількість прокладок, $i_{\text{п}} = 4$ [14].

$$W_0 = 1,5 \cdot 220 \cdot 9,81[(8,9 + 3,9 + 8,4) \cdot 0,025 + (3,9 + 2,5) \cdot 0,022] + 8,9 \cdot 9,81 \cdot 20 = 3918 \text{ Н.}$$

Визначаємо максимальний натяг стрічки конвеєра:

$$S_{\text{max}} = k_3 W_0 \frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1} = 1,3 \cdot 3918 \frac{4,33}{4,33 - 1} = 6623 \text{ Н,}$$

де k_3 – коефіцієнт запасу щеплення стрічки з барабаном, $k_3 = 1,2 \dots 1,3$;

$e^{\mu\alpha}$ – тяговий фактор, $e^{\mu\alpha} = 4,33$ за умови $\alpha = 210^\circ$, $f = 0,4$).

Проводимо уточнений розрахунок кількості прокладок:

$$i = \frac{S_{\text{max}} C_{\text{п}}}{k_p B} = \frac{6623 \cdot 12}{55 \cdot 400} = 3,61 \approx 4,0$$

де $C_{\text{п}}$ – запас міцності стрічки, $C_{\text{п}} = 12$ [14];

k_p – межа міцності на розрив 1 прокладки, $k_p = 55$ Н/мм [14].

Для визначення діаметрів барабанів D_0 конвеєра з гумовотканинною стрічкою скористаємось формулою:

$$D_0 = K_a \cdot K_0 \cdot i,$$

де K_a – коефіцієнт залежний від типу прокладок, $K_a = 125$ [14];

K_G – коефіцієнт залежний від типу барабана (однобарабаний $K_G = 1$; двобарабаний привод $K_G = 1,1$; натяжний – $K_G = 0,9$; відхиляючий – $K_G = 0,5$).

Згідно розрахунків приводний барабан матиме наступні розміри: $D_{\Pi} = 125 \cdot 1 \cdot 4 = 500$ мм; натяжний барабан $D_{\text{Н}} = 125 \cdot 0,9 \cdot 4 = 450$ мм (приймаємо $D_{\text{Н}} = 500$ мм), відхиляючий барабан $D_{\text{В}} = 125 \cdot 0,5 \cdot 4 = 250$ мм.

У відповідних точках натяг стрічки становитиме (рис. 2.1):

$$S_{\text{сб}} = S_1;$$

$$S_2 = kS_1 = 1,03S_1,$$

де k – коефіцієнт опору на відхиляючому барабані [14], $k = 1,03$ оскільки кут обхвату стрічкою даного барабана $< 90^\circ$.

$$S_3 = S_2 + (q_0 + q_p')gL_1\omega' = 1,03S_1 + (3,9 + 2,5) \cdot 9,81 \cdot 120 \cdot 0,022 = 1,03S_1 + 166\text{Н};$$

$$S_4 = kS_3 = 1,03(1,03S_1 + 166) = 1,061S_1 + 171\text{Н};$$

$$\begin{aligned} S_5 &= S_4 + (q_0 + q_p')gL_2\omega' - q_0gH = \\ &= 1,061S_1 + 171 + (3,9 + 2,5) \cdot 9,81 \cdot 100 \cdot 0,022 - 3,9 \cdot 9,81 \cdot 20 = \\ &= 1,061S_1 - 456\text{Н}; \end{aligned}$$

$$S_6 = kS_5 = 1,03(1,061S_1 - 456) = 1,092S_1 - 470\text{Н};$$

$$\begin{aligned} S_7 &= S_6 + (q_0 + q_p)gL_3\omega = \\ &= 1,092S_1 - 470 + (3,9 + 8,4) \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 0,025 = \\ &= 1,092S_1 - 458\text{Н}; \end{aligned}$$

$$S_8 = S_7 + W_3 = 1,092S_1 - 458 + 188 = 1,092S_1 - 270\text{Н},$$

де W_3 – опір руху стрічки на навантажувальній ділянці конвеєра;

$$W_3 = \frac{cQ}{3,6} (v - v_0 + f_1\sqrt{2gH_1}) = \frac{1,5 \cdot 80}{3,6} (2,5 - 0 + 0,74\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,8}) = 188\text{Н},$$

де c – коефіцієнт, який враховує опір руху через тертя пшениці під час завантаження, $c = 1,5$; v_0 – складова швидкості переміщення пшениці вздовж стрічки, $v_0 = 0$; H_1 – висота падіння вантажу на стрічку, $H_1 = 0,8$ м; f_1 – коефіцієнт тертя вантажу по гумі, $f_1 = 0,74$ м.

$$\begin{aligned} S_9 &= S_8 + (q_0 + q_p + q)gL_4\omega + (q_0 + q)g(H - H_1) = \\ &= 1,092S_1 - 270 + (3,9 + 8,4 + 8,9) \cdot 9,81 \cdot 96 \cdot 0,025 + (3,9 + 8,9) \cdot 9,81(20 - 0,8) = \\ &= 1,092S_1 + 2640\text{Н}; \end{aligned}$$

$$S_{10} = kS_9 = 1,03 \cdot (1,092S_1 + 2640) = 1,125S_1 + 2719\text{H};$$

$$S_{11} = S_{10} + (q_0 + q_p + q)gL_5\omega =$$

$$= 1,125S_1 + 2719 + (3,9 + 8,4 + 8,9) \cdot 9,81 \cdot 110 \cdot 0,025 = 1,125S_1 + 3291\text{H};$$

$$S_{12} = (S_{11} + qgh_T)k^2 = (1,125S_1 + 3291 + 8,9 \cdot 9,81 \cdot 1,65)1,03^2 = 1,194S_1 + 3644\text{H},$$

де $h_T = 1,65$ м – висота падіння пшениці під час її розвантаження.

$$S_{13} = S_{12} + (q_0 + q_p + q)gL_6\omega = 1,194S_1 + 3644 + (3,9 + 8,4 + 8,9) \cdot 9,81 \cdot 10 \cdot 0,025 = \\ = 1,194S_1 + 3696\text{H} = S_{\text{наб}}.$$

Побідемо і вирішимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} S_{13} = 1,194S_1 + 3696 \\ S_{13} = e^{\mu\alpha} S_1 = 4,33S_1 \end{cases};$$

Звідси:

$$1,194S_1 + 3696 = 4,33S_1;$$

$$S_1 = S_{сб} = \frac{3696}{(4,33 - 1,194)} = 1179\text{H}.$$

$$S_{13} = S_{\text{наб}} = 1,194 \cdot 1179 + 3696 = 5104\text{H}.$$

Значення натягу стрічки в характерних точках:

$$S_2 = 1,03 \cdot 1179 = 1214\text{H};$$

$$S_3 = 1,03 \cdot 1179 + 166 = 1380\text{H};$$

$$S_4 = 1,061 \cdot 1179 + 171 = 1422\text{H};$$

$$S_5 = 1,061 \cdot 1179 - 456 = 795\text{H};$$

$$S_6 = 1,092 \cdot 1179 - 470 = 817\text{H};$$

$$S_7 = 1,092 \cdot 1179 - 458 = 829\text{H};$$

$$S_8 = 1,092 \cdot 1179 - 270 = 1017\text{H};$$

$$S_9 = 1,092 \cdot 1179 + 2640 = 3927\text{H};$$

$$S_{10} = 1,125 \cdot 1179 + 2719 = 4045\text{H};$$

$$S_{11} = 1,125 \cdot 1179 + 3291 = 4617\text{H};$$

$$S_{12} = 1,194 \cdot 1179 + 3644 = 5052\text{H};$$

Будуємо діаграму натягу стрічки конвеєра (див. рис. 2.1). Максимальний прогин конвеєрної стрічки між роликками має задовольняти наступні умови:

- для ненавантаженої ділянки $l = 3$ м

$$y_{\max} = \frac{gq_0 l^2}{8S_2} \leq 0,025l;$$

$$\frac{9,81 \cdot 3,9 \cdot 3^2}{8 \cdot 1214} = 0,035 \leq 0,025 \cdot 3 = 0,075 \text{ м.}$$

- для навантаженої ділянки $l = 1,5 \text{ м}$

$$y_{\max} = \frac{g(q + q_0)l_p^2}{8S_{10}} \leq 0,025l_p;$$

$$\frac{9,81 \cdot (8,9 + 3,9) \cdot 1,5^2}{8 \cdot 4045} = 0,009 \leq 0,025 \cdot 1,5 = 0,038 \text{ м.}$$

За результатами розрахунків бачимо, що прогини конвеєрної стрічки за мінімального її натягу знаходяться в нормі.

Запас міцності конвеєрної стрічки:

$$C_n = \frac{Bik_p}{S_{\text{наб}}} = \frac{400 \cdot 4 \cdot 55}{5104} = 17,24 \geq 12.$$

Визначимо тягове зусилля на приводному барабані за формулою:

$$W_0 = S_{\text{наб}} - S_{\text{сб}} = 5104 - 1179 = 3925 \text{ Н.}$$

Для приводу конвеєра потужність двигуна становить:

$$P_{\text{дв}} = \frac{k_3 W_0 v}{1000 \eta_0} = \frac{1,1 \cdot 3925 \cdot 2,5}{1000 \cdot 0,92} = 11,7 \text{ кВт,}$$

де k_3 – коефіцієнт запасу потужності, $k_3 = 1,1 \dots 1,2$;

η_0 – коеф.корисн.дії приводу, $\eta_0 = 0,92$.

Вибираємо асинхронний двигун типу 4А160М6УЗ. Частота обертання електродвигуна становить $n = 1000$ об/хв, а потужність Рдв = 15кВт.

Кутова швидкість обертання вала електродвигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi n_{\text{дв}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с.}$$

Крутний момент електродвигуна:

$$T_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{15000}{105} = 143 \text{ Нм.}$$

Пусковий момент електродвигуна:

$$T_{\text{дв.п}} = 1,5 T_{\text{дв}} = 1,5 \cdot 143 = 215 \text{ Нм.}$$

Для з'єднання електродвигуна та редуктора приймаємо муфту МУВП-6 із гальмівним шківом. Дана муфта передає крутний момент 250 Н·м.

Визначимо частоту обертання вала приводного барабана конвеєра:

$$n_{\phi} = \frac{60v}{\pi D'_{\phi}} = \frac{60 \cdot 2,5}{3,14 \cdot 0,556} = 85,9 \text{ об/хв},$$

де $D'_{\phi} = D_{\phi} + 2 \cdot \Delta_{\phi} = 0,5 + 2 \cdot 0,028 = 0,556 \text{ м}$ - діаметр барабана конвеєра з врахуванням товщини футерівки;

Δ_{ϕ} - товщина гумової футерівки, $\Delta_{\phi} = 28 \text{ мм}$.

Передатне число редуктора u_0 приводу стрічкового конвеєра:

$$u_0 = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\phi}} = \frac{1000}{85,9} = 11,6$$

Приймаємо редуктор Ц2-500 з передаточним відношенням $u_{\phi} = 12,5$. З врахуванням розрахункового передатного відношення і потужності приводу.

Швидкість стрічки (фактична):

$$v_{\phi} = \frac{\pi D'_{\phi} n_{\text{дв}}}{60 u_{\phi}} = \frac{3,14 \cdot 0,556 \cdot 1000}{60 \cdot 12,5} = 2,33 \text{ м/с}.$$

Продуктивність (фактична):

$$Q_{\phi} = k_n k_{\beta} (0,9B - 0,05)^2 v_{\phi} \rho = 625 \cdot 0,85 \cdot (0,9 \cdot 0,4 - 0,05)^2 \cdot 2,33 \cdot 0,75 = 89 \text{ т/год}.$$

Статичний опір під час запуску електродвигуна:

$$\begin{aligned} W_{\text{ст.п}} &= k_{\text{п.с}} (W_0 - qgH) + qgH = \\ &= 1,2 \cdot (3925 - 8,9 \cdot 9,81 \cdot 20) + 8,9 \cdot 9,81 \cdot 20 = 4361 \text{ Н}, \end{aligned}$$

де $k_{\text{п.с}}$ - коефіцієнт підвищення опору під час пуску, $k_{\text{п.с}} = 1,2$.

Статичний момент під час запуску електродвигуна:

$$T_{\text{ст.п}} = \frac{W_{\text{ст.п}} D'_{\phi}}{2 u_{\phi} \eta_0} = \frac{4361 \cdot 0,556}{2 \cdot 12,5 \cdot 0,92} = 105 \text{ Нм}.$$

Розрахуємо зведений момент інерції обертально-рухомих і поступальних частин вантажу конвеєра та приводу:

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{(2q_0 + q)(1 + K_n) L D_{\phi}^2}{4 u_{\phi}^2 \eta_0} + (1 + \psi)(J_p + J_m) = \\ &= \frac{(2 \cdot 3,9 + 8,9)(1 + 0,08) 220 \cdot 0,556^2}{4 \cdot 12,5^2 \cdot 0,92} + (1 + 0,15)(0,18 + 0,08) = 2,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned}$$

де $K_{ін}$ – коефіцієнт, який враховує інерцію обертових мас барабанів та роликів конвеєра, $K_{ін} = 0,08$;

ψ – коефіцієнт, який враховує маси деталей приводу стрічкового конвеєра, які обертаються повільніше ніж вал електродвигуна, $\psi = 0,15$.

Тривалість запуску конвеєра (сек.):

$$t_{п} = \frac{J_0 \omega_{дв}}{(T_{дв.п} - T_{ст.п}) k_y} = \frac{2,55 \cdot 105}{(215 - 105) 0,7} = 2,48 \text{ с.}$$

де k_y – коефіцієнт, який враховує подовження стрічки через її пружність, $k_y = 0,7 \dots 0,8$. Мінімально допустима тривалість запуску конвеєра:

$$t_{п.мін} = \frac{v_{\phi}}{J_{п}} = \frac{2,33}{0,2} = 8 \text{ с,}$$

де $J_{п}$ – допустиме прискорення запуску конвеєра, $J_{п} = 0,2$.

При вимкненні струму на стрічковому конвеєрі передбачено запобіжне гальмо або гальмівний момент на валу двигуна, який запобігає зворотному руху стрічки під дією сили ваги пшениці :

$$\begin{aligned} T_{\tau} &= [qgH - c_0(W_0 - qgH)] \frac{D'_n}{2u_{\phi}} \eta_0 = \\ &= [8,9 \cdot 9,81 \cdot 20 - 0,5(3925 - 8,9 \cdot 9,81 \cdot 20)] \frac{0,556}{2 \cdot 12,5} \cdot 0,92 = 13,4 \text{ Н} \cdot \text{м,} \end{aligned}$$

де c_0 – коефіцієнт можливого зменшення опору під час вільного руху конвеєрної стрічки, $c_0 = 0,5$.

Визначимо тривалість гальмування (сек.):

$$t_{\tau} = \frac{2l_{вб}}{v_{\phi}} = \frac{2 \cdot 2}{2,33} = 1,7 \text{ с,}$$

де $l_{вб}$ – величина вибігу, $l_{вб} = 2$ м.

Для обмеження вибігу конвеєра після вимкнення електродвигуна застосовуємо гальмівний момент на валу двигуна :

$$\begin{aligned} T_{\tau} &= \frac{(2q_0 + q)(1 + K_{ін})LD_n'^2 \eta_0 \omega_{дв}}{4u_{\phi}^2 t_{\tau}} - [qgH + c_0(W_0 - qgH)] \frac{D'_n}{2u_{\phi}} \eta_0 \\ &= \frac{(2 \cdot 3,9 + 8,9)(1 + 0,08) \cdot 220 \cdot 0,556^2 \cdot 0,92 \cdot 105}{4 \cdot 12,5^2 \cdot 1,7} - \end{aligned}$$

$$-[8,9 \cdot 9,81 \cdot 20 + 0,5(3925 - 8,9 \cdot 9,81 \cdot 20)] \frac{0,556}{2 \cdot 12,5} \cdot 0,92 = 98 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Вибираємо колодкове гальмо ТКГ – 200, діаметр шківа якого становить 200 мм, а найбільший гальмівний момент 300 Н · м.

Висновок по розділу 2

1. Найбільш ефективним матеріалом для футерування барабанів є спеціалізована гума, яку закріплюють на поверхні барабана за допомогою клеїв або методом вулканізації.

2. Використання гумової футерівки на барабанах дозволяє покращити динамічні та експлуатаційні характеристики стрічкових конвеєрів, а також збільшити їхню довговічність і надійність.

3. Товщина гумового покриття визначається багатьма механічними, технологічними та економічними факторами; світова практика демонструє тенденцію до збільшення товщини футерівок. Наприклад, компанія NILOS GmbH & Co радить обирати товщину від 7 до 25 мм, враховуючи конструктивні особливості та призначення конвеєра.

4. Для стрічкових конвеєрів, що вже перебувають в експлуатації, рекомендовано такий ряд товщин гумової футерівки: 8, 10, 16, 20, 26 мм.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Теоретичні основи та підхід до дослідження

В основі теоретичних досліджень лежить аналіз процесів взаємодії конвеєрної стрічки з приводним барабаном із гумовою футерівкою. Основна мета полягає в забезпеченні максимального коефіцієнта зчеплення, мінімізації зношування стрічки та покращенні стійкості конвеєра. Для моделювання використовувались аналітичні рівняння Ейлера і Жуковського, що описують механіку взаємодії гнучкої стрічки з циліндричною поверхнею.

Основні параметри розрахунку включають: коефіцієнт зчеплення (f), силу натягу стрічки (S), товщину футерівки (h), діаметр барабана (D) і кут охоплення (α). Базове рівняння для розрахунку тягового зусилля, відповідно до теорії Ейлера, виглядає так:

$$W = S \cdot e^{f \cdot \alpha},$$

де S – натяг стрічки на вхідній ділянці, e – основа натурального логарифма, f – коефіцієнт тертя, α – кут охоплення барабана стрічкою в радіанах.

3.2. Моделювання та результати досліджень

На основі даної моделі було проведено моделювання зміни коефіцієнта зчеплення залежно від товщини футерівки та коефіцієнта тертя між стрічкою і барабаном. Отримані результати представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Зміна коефіцієнта зчеплення залежно від товщини футерівки та коефіцієнта тертя між стрічкою і барабаном

Товщина футерівки (мм)	Коефіцієнт зчеплення (f)	Натяг стрічки (S), Н	Тягове зусилля (W), Н
5	0.3	1000	1233
8	0.35	1000	1372
10	0.4	1000	1490

3.3. Аналіз залежності тягового зусилля від товщини футерівки

Для аналізу впливу товщини футерівки та діаметра барабана на ефективність конвеєра було побудовано графік залежності тягового зусилля від цих параметрів (рис. 3.1).

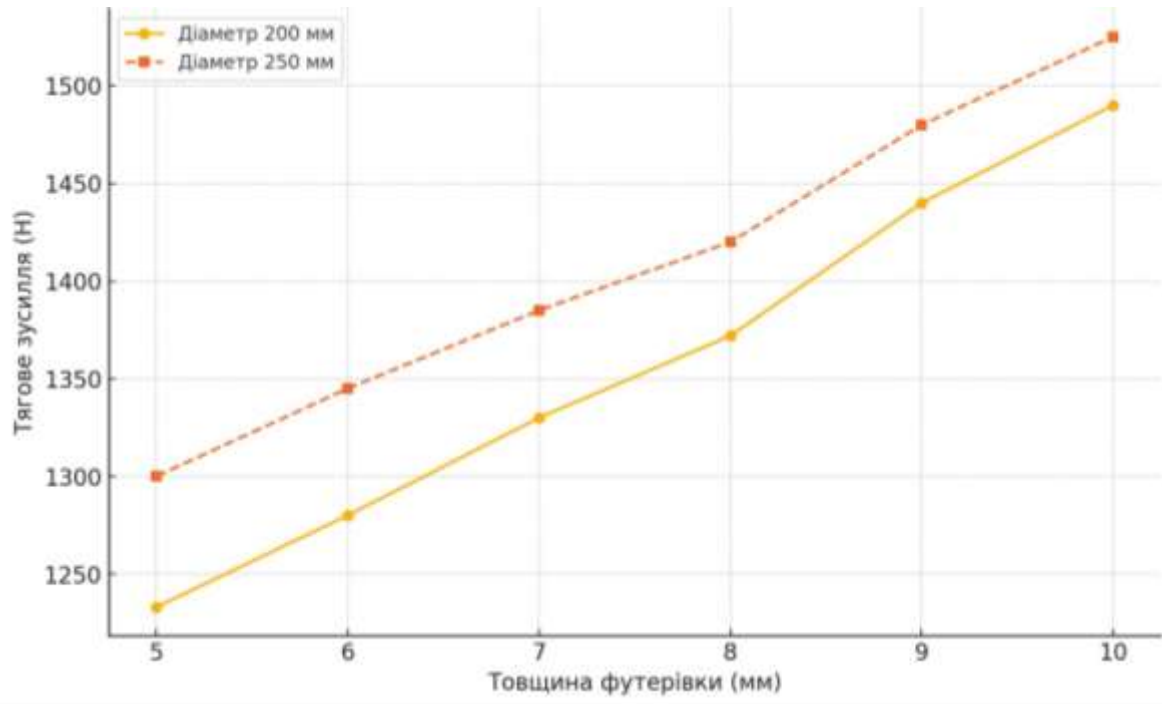


Рис. 3.1 - Залежність тягового зусилля W від товщини футерівки при різних діаметрах барабана

На графіку видно, що при діаметрі барабана 200 мм і товщині футерівки 10 мм тягове зусилля досягає максимуму. Це свідчить про те, що оптимізація товщини футерівки має прямий вплив на тягові характеристики системи.

3.4. Обґрунтування вибору товщини футерівки та матеріалу

На основі аналізу даних (таблиця 3.1, графік 3.1) рекомендовано використовувати гумову футерівку товщиною 8...10 мм для конвеєрів, що працюють у важких умовах, де необхідне максимальне тягове зусилля. У таблиці 3.2 наведено порівняльні характеристики матеріалів, що можуть бути використані для футерівки.

Таблиці 3.2 - Порівняльні характеристики матеріалів, що можуть бути використані для футерівки

Матеріал футерівки	Товщина (мм)	Коефіцієнт зчеплення (f)	Зносостійкість	Рекомендовані умови експлуатації
Натуральна гума	5...8	0,3	Середня	Сухі умови, низьке навантаження
Поліуретан	8...10	0,35	Висока	Висока вологість, агресивні середовища
Композит з поліамідом	10	0,4	Дуже висока	Важкі умови, абразивні матеріали

3.5. Висновки та рекомендації

Результати дослідження дозволили сформувані наступні висновки:

1. Використання товщої футерівки (8...10 мм) значно підвищує тягове зусилля завдяки збільшенню коефіцієнта зчеплення.
2. Застосування композитних матеріалів, таких як поліуретан з поліамідом, забезпечує підвищену зносостійкість, особливо в умовах високої вологості та за наявності абразивних часток.
3. Рифлена футерівка показала найкращі результати з точки зору зменшення зношування при контакті з барабаном, а також у запобіганні забрудненню контактної поверхні.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Основні вимоги до охорони праці при роботі з конвеєрними системами

На сучасних підприємствах для забезпечення безпечної роботи з конвеєрними системами встановлюють захисні бар'єри та датчики, які реагують на рух у зоні конвеєрної стрічки [19]. Наприклад, для стрічкових конвеєрів застосовуються фотодатчики на кінцях лінії, які автоматично зупиняють конвеєр у разі наближення людини до небезпечних зон. Уздовж конвеєра через кожні 3-5 метрів розміщують червоні кнопки аварійної зупинки, що дозволяє негайно відключити лінію в разі небезпеки.

4.2 Потенційні небезпеки при обслуговуванні та експлуатації конвеєрних систем

У важкій промисловості обслуговування конвеєрів супроводжується високим ризиком механічних травм, тому перед запуском проводиться ретельна перевірка обладнання. Оператори контролюють відсутність сторонніх предметів на стрічці та прибирають будь-які небезпечні умови, щоб уникнути можливого затискання чи розриву стрічки під час роботи. Це знижує ризики, пов'язані з механічними небезпеками.

Оскільки конвеєрні системи працюють від електромереж, необхідно дотримуватись правил електробезпеки, щоб уникнути можливих уражень струмом. На підприємствах з високим навантаженням на конвеєрні лінії встановлюють системи автоматичного відключення електрики при надмірному нагріванні або короткому замиканні. На хімічних підприємствах, де існує підвищений ризик загоряння через легкозаймисті речовини, застосовують спеціальні ізоляційні матеріали, що перешкоджають утворенню іскор.

4.3 Охорона навколишнього середовища

Конвеєрні системи можуть створювати значний екологічний вплив, особливо на гірничо-збагачувальних комбінатах, де під час роботи утворюється велика кількість пилу. Для захисту довкілля передбачено пиловловлюючі установки або системи зрошування, які допомагають зменшити кількість пилу до допустимого рівня. Такі установки значно підвищують якість повітря на виробничих об'єктах та запобігають розповсюдженню пилу на прилеглі території [20].

4.4 Профілактика аварійних ситуацій

На підприємствах гірничодобувної промисловості поширеними аварійними ситуаціями є заклинювання конвеєрної стрічки через потрапляння великих каменів або уламків породи. Щоб уникнути цього, на початковій ділянці лінії встановлюють магнітні уловлювачі, які видаляють металеві частки, що можуть спричинити заклинювання.

На хімічних підприємствах, де транспортуються токсичні матеріали, конвеєрні лінії забезпечені спеціальними сенсорами, які виявляють зміни в матеріалі або перегрів, що дозволяє запобігти можливим аваріям. Крім того, у приміщеннях з підвищеною пожежною небезпекою встановлюють автоматичні системи пожежогасіння, які активуються при перегріванні, що значно знижує ризик виникнення пожеж.

4.5 Висновки та рекомендації

Враховуючи наведені факти, можна запропонувати такі практичні рекомендації для підвищення безпеки та екологічної відповідальності підприємств. Передусім, слід запровадити систему моніторингу з датчиками і сенсорами, які дозволять своєчасно виявляти загрозу і автоматично зупинити конвеєр у разі небезпеки. Використання екологічно чистих матеріалів для конвеєрних стрічок і футерівок сприяє зниженню негативного впливу на довкілля та полегшує їх подальшу утилізацію.

Регулярне технічне обслуговування конвеєрів, включаючи перевірку ізоляції електропроводів, стану стрічки та барабанів, значно зменшує ймовірність аварійних ситуацій [21]. Організація системи переробки зношених деталей у спеціалізованих центрах допоможе мінімізувати кількість відходів і зробить підприємство більш екологічно відповідальним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підприємствах України застосовуються різні типи конвеєрних стрічок, головним чином українського та китайського виробництва. До 2013 року також використовували стрічки з росії, проте наразі на українському ринку з'явилися і німецькі виробники, хоча їхня продукція коштує вдвічі чи навіть втричі більше.

Оптимальним матеріалом для футерування барабанів є спеціальна гумова суміш, яка кріпиться до барабана за допомогою клеїв або шляхом вулканізації. Гумові футерівки барабанів покращують динамічні та технологічні показники стрічкових конвеєрів, підвищуючи їхню надійність і довговічність.

Товщина футерівки залежить від різних механічних, технологічних та економічних факторів. Сучасні тенденції у виборі параметрів футерівки свідчать на користь збільшення товщини покриття. Наприклад, компанія *NILOS GmbH & Co* рекомендує обирати товщину від 7 до 25 мм залежно від конструкції та призначення конвеєра.

Для вже працюючих стрічкових конвеєрів рекомендований ряд товщин гумової футерівки становить: 8, 10, 16, 20, 26 мм.

Дослідження показали, що найбільше зношування конвеєрних стрічок спричиняють абразивний і втомний знос. Також було встановлено, що на підприємствах України використовуються різні типи гумово-тканинних стрічок від різних виробників, які значно різняться за вартістю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Підйомно-транспортні машини / [А. С. Кобець, В. І. Дирда, Ю. Г. Козуб та ін.]. – Луганськ: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2013. – 218 с.
2. Мала гірнича енциклопедія в 3 т. / [В. С. Білецький, В. С. Бойко, В. С. Бокін та ін.]. – Донецьк: *Донбас*, 2004. – 640 с. – (Т. 3).
3. Фідровська Н. М., Лук'янов І. М. Особливості розрахунку приводних барабанів стрічкових вертикальних елеваторів // *Машинобудування*. 2015. № 15. С. 64–70. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud_2015_15_11
4. *Produkte* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rema-tiptop.de/>
5. *Industrial Rubber* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.nilos.com/en.html>
6. *Товариство з обмеженою відповідальністю Дніпровський Завод Конвеєрного Обладнання* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://5140.org/company/508903-tov-dzko>
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. *Основи розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин*. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: *Пороги*, 2007. 193 с.
8. Грунський Д. О. Обґрунтування товщини гумової футерівки барабанів стрічкових конвеєрів // *Міжвідомчий збірник наукових праць ІГТМ ім. М. С. Полякова НАНУ. Геотехнічна механіка*. 2021. Вип. 151. С. 157–169.
9. Čamprag D., Ković M. *Transport in Mining and Materials Handling Systems*. New York: *Springer*, 2005. 280 p.
10. Klaus H., Wittenberg H. *Belt Conveying of Bulk Materials and Associated Drum Coupling Techniques*. Berlin: *De Gruyter*, 2010. 220 p.
11. Heitzmann T., Mueller F. *Flexibility in Belt Drive Design for High-Performance Conveyors*. Cambridge: *Woodhead Publishing*, 2008. 312 p.

12. Дирда В. І. *Міцність і руйнування еластомерних конструкцій в екстремальних умовах*. Київ: Наукова думка, 2008. 230 с.
13. Сергієнко І. П. Довговічність гумових футеровок в умовах старіння // *Науковий вісник ІГТМ НАН України*. 2015. № 113. С. 185–204.
14. Цаніді І. М. *Вивчення конструкції та визначення основних параметрів стрічкового конвеєра: методичні рекомендації*. Дніпро: ДДАЕУ, 2018. 24 с.
15. Пат. 119244 Україна, МПК G01N 33/44 (2006.01). Пристрій для випробувань гумових елементів на стирання / Дирда В. І., Калганков Є. В., Черній О. А., Цаніді І. М., Калганков Б. В.; заявл. 09.03.2016; опубл. 25.09.2017, бюл. № 18. 4 с.
16. *ASTM D2240. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*. ASTM International, 2015. 10 p.
17. Пат. 100401 Україна, МПК (2006.01) G01N 3/46. Спосіб визначення енергії руйнування гумових футерівок / Дирда В. І., Калганков Є. В., Черній О. А., Цаніді І. М.; заявл. 27.01.2015; опубл. 27.07.2015, бюл. № 14. 4 с.
18. Гладков Ю. А. Побудова та аналіз параметричної залежності потужності похилих стрічкових конвеєрів від їх проектних характеристик: Тези доповідей 80-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів *Наука і сталий розвиток транспорту. Секція «Механіка»* / друкується в авторській редакції. Дніпровськ. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2020. – С. 46.
19. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок: ДНАОП 0.00-1.32-01. Затв. 21.06.2001 № 272 / Держ. департамент України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду.
20. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: ДНАОП 0.00-1.21-98. Затв. 09.01.1998 № 4 / Держнаглядохоронпраці.
21. Правила будови і безпечної експлуатації підйомників: НПАОП 00.0-1.36-04. Затв. 08.12.2003 № 232 / Держнаглядохоронпраці.

Додатки

Технічна характеристика стрічки *EP Normalgum*

Тип	Од.вим.	EP-160	EP-200	EP-250	EP-315	EP-400	EP-500
Кількість прокладок	шт.	2	2	2	3	3	4
Товщина обкладок	мм	2,1	3,2	4,2	4,2	4,2	5,2
Товщина стрічки	мм	4,5	6,2	7,4	8,0	8,3	10,5
Вага стрічки	кг/м ²	5,2	7,4	8,8	9,6	10,0	12,6
Робочий натяг	Н/мм	16	20	25	32	40	52
Видовження	%	1,3					
Діаметр приводного барабана	мм	200	250	250	315	315	500
Розтяг	%	2,0					

Технічна характеристика стрічки *DBP-POWAPLY*

Тип стрічки	Максимальний натяг, кН/м	Параметр	Структурні шари				
			2	3	4	5	6
EE-200	20	Вага, кг/м ²	2,5				
		Товщина, мм	1,8				
EE-250	25	Вага, кг/м ²	2,6				
		Товщина, мм	1,9				
EE-315	32	Вага, кг/м ²	2,7	3,7			
		Товщина, мм	2,2	2,9			
EE-400	40	Вага, кг/м ²	3,3	4,0	5,0		
		Товщина, мм	2,6	3,1	4,1		
EE-500	50	Вага, кг/м ²	3,4	4,1	5,3	6,3	
		Товщина, мм	2,5	3,6	4,3	5,2	
EE-630	63	Вага, кг/м ²	3,9	4,9	5,5	6,6	7,5
		Товщина, мм	3,0	4,1	4,9	5,5	6,3
EE-800	80	Вага, кг/м ²	4,7	5,1	6,6	6,9	7,9
		Товщина, мм	3,9	4,0	5,7	6,2	6,7
EE-1000	100	Вага, кг/м ²	5,9	6,1	6,8	8,2	8,2
		Товщина, мм	4,7	5,1	5,5	7,2	7,6

Технічна характеристика транспортерної стрічки *Extra D*

Тип	Од.вим.	D-800	D-1000	D-1250	D-1600	D-2000	D-2500
Кількість обкладок	мм	5-2	5-2	5-2	6-3	6-3	6-3
Товщина стрічки	мм	8,4	9,0	10,6	13,0	14,0	15,0
Вага стрічки	кг/м ²	8,6	8,9	10,2	12,9	13,6	14,8
Робочий натяг	Н/мм	80	100	125	160	200	250
Видовження	%	0,3					
Діаметр приводного барабана	мм	500	630	800	1000	1250	1500