

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет Львівського інституту  
(назва факультету)

Рухомий склад залізниць і колія  
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
бакалавр  
(ступінь вищої освіти)

на тему: «Аналіз експлуатаційної надійності колісних пар рухомого складу при наявності приповерхневих концентраторів напружень»

за освітньою програмою Локомотиви та локомотивне господарство  
зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав:

(підпис студента)

студент групи: ЛГ 18118

/ Богдан МИЧКА /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

(підпис)

/ доцент Микола КУЗІН /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

(підпис)

/ викладач Іван КРАВЕЦЬ /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

(назва розділу)

(підпис)

/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) /

(назва розділу)

(підпис)

/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) /

(назва розділу)

(підпис)

/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) /

(назва розділу)

(підпис)

/ (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technologies

Lviv Institute

(faculty)

Railway rolling stock and track

(department)

Explanatory Note  
to Bachelor's Thesis

(higher education degree)

on the topic: Analysis of the operational reliability of rolling stock wheelsets in the presence of near-surface stress concentrators

according to educational curriculum Locomotives and locomotive establishment

in the Speciality: 273 Railway transport

(speciality and its code)

Done by the student of the group:

/ Bogdan Michka /  
(name, surname)

Scientific Supervisor:

/ assistant professor Mykola Kuzin /  
(position, name, surname)

Normative controller :

/ lecturer Ivan Kravets /  
(position, name, surname)

Supervisors

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

/ \_\_\_\_\_ /  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

/ \_\_\_\_\_ /  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

/ \_\_\_\_\_ /  
(position, name, surname)

\_\_\_\_\_  
(Chapter title heading)

/ \_\_\_\_\_ /  
(position, name, surname)

## ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз нормативної та технічної літератури, яка регламентує особливості функціонування колісних пар рухомого складу	7
1.1 Основні дефекти колісних пар рухомого складу, які виявляються в експлуатації	7
1.2 Вимоги нормативної літератури щодо особливостей функціонування колісних пар тягового рухомого складу	13
1.3 Висновки	17
2 Аналіз підходів механіки для тіл із концентраторами напружень при оцінці надійності елементів конструкцій	18
2.1 Аналіз «класичних підходів» при оцінці надійності елементів конструкцій	18
2.2 Аналіз «некласичних підходів» при оцінці надійності елементів конструкцій	20
2.3 Висновки	24
3 Розрахунковий аналіз поведінки тіла із концентраторами напружень	25
3.1 Побудова розрахункової та комп'ютерної схем встановлення напружено-деформованого стану тіл із концентраторами	25
3.2 Надання практичних рекомендацій щодо впливу просторових параметрів концентраторів на надійність конструкцій	28
3.3 Висновки	32
Висновки	33
Перелік посилань	34

0041.180556.01.ВКР.ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
		МИЧКА Богдан		14.05	Аналіз експлуатаційної надійності колісних пар рухомого складу при наявності приповерхневих концентраторів напружень		5	35
		КУЗІН Микола		14.06				
		КРАВЕЦЬ Іван		15.06.22		ЛІ УДУНТ		
		БАЛЬ Олена		13.06.22				

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Львівського інституту  
Кафедра: Рухомий склад залізниць і колія  
Рівень вищої освіти: бакалавр  
Освітня програма: Локомотиви та локомотивне господарство  
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт  
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Олена БАЛЬ \_\_\_\_\_  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата \_\_\_\_\_

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу \_\_\_\_\_  
бакалавра \_\_\_\_\_  
(ступінь вищої освіти)

студенту Мичці Богдану Васильовичу  
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз експлуатаційної надійності колісних пар рухомого складу при наявності приповерхневих концентраторів напружень»

Керівник роботи: Кузін Микола Олегович, д.т.н., доцент  
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від " 26 " 11 2021 р. № 38 ст

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: експлуатаційні параметри колісних пар,  
що наведені у науковій та технічній літературі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: підходи із нормативно-технічної, наукової літератури із експлуатаційної надійності колісних пар

4.2 Основна частина: методи міцнісного аналізу та розрахунку приповерхневих шарів коліс числовими методами

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища:

4.4 Економічна частина:

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
графічна частина не передбачена

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Всі розділи	Кузін М.О., доцент		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз нормативної та технічної літератури щодо особливостей дефектів колісних пар під час експлуатації	28.04.22	
2	Побудова співвідношень для розрахунків задач контактної міцності тіл з дефектами МСЕ	12.05.22	
3	Проведення розрахунку напруженого стану тіл з дефектами МСЕ	26.05.22	
4	Аналіз проведених розрахунків, надання практичних рекомендацій	01.06.22	
5	Оформлення аналітичної частини роботи	08.06.22	
6	Повне оформлення роботи	09.06.22	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	10.06.22	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Богдан МИЧКА

\_\_\_\_\_ (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Микола КУЗІН

\_\_\_\_\_ (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:  
(рівень освіти)

35 с., 7 рис., 15 джерел.

Об'єкт розробки – колісні пари рухомого складу із наявністю концентраторів напружень.

Мета роботи – встановлення оптимальних параметрів зміцнення поверхні кочення коліс, при яких забезпечуються сталий рівень параметрів міцності колісних пар.

Методи дослідження – порівняльні та описові методи аналізу літературних джерел, методи комп'ютерної механіки (метод скінчених елементів), метод зважених невязок.

Визначено технологічні шляхи підвищення довговічності колісних пар із при поверхневими концентраторами напружень.

Результати роботи можуть стати основою для технологічної оптимізації при підвищенні довговічності колісних пар тягового рухомого складу.

Ключові слова: КОНЦЕНТРАТОРИ НАПРУЖЕНЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПОВЕРХНЯ КОЧЕННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Колісні пари тягового рухомого складу є одними із найбільш відповідальних вузлів тертя, і в значній мірі визначають ефективність функціонування локомотивів, крім того відомо, що втрати, що викликані зношуванням в системі колесо-рейка складають від 10 до 30 %, розходу матеріальних цінностей на тягу поїздів.

Тому забезпечення заданих експлуатаційних параметрів колісних пар, зокрема, міцності є однією із найбільш затребуваних проблем сучасного рейкового транспорту.

Розв'язання цієї важливою науково-технічної проблеми дозволить значно підняти ефективність роботи транспортної галузі, її конкурентоспроможність та зменшити екологічний вплив на довкілля.

Тому розрахункове обґрунтування технологій підвищення надійності колісних пар є важливим завдання сучасності.

Ця робота і присвячена питанням створення математичних «двійників» об'єктів, які дозволять у майбутньому підвищити безпеку роботи транспортних систем.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ ТА ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ, ЯКА РЕГЛАМЕНТУЄ ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОЛІСНИХ ПАР РУХОМОГО СКЛАДУ

## 1.1 ОСНОВНІ ДЕФЕКТИ КОЛІСНИХ ПАР РУХОМОГО СКЛАДУ, ЯКІ ВИЯВЛЯЮТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розглянемо основні дефекти колісних пар згідно літературного джерела [1].

Основними дефектами поверхні кочення є наступні:

- Повзун – це є плоске місце глибиною понад допустиму. Основними причинами утворення повзунів на колесах є: несправності гальмівних приладів; порушення правил регулювання важільної передачі; неправильне керування гальмами локомотива; гальмування вагонами знімним башмаком на сортувальній гірці. Повзуни глибиною більшу за допустиму норму усувають обточуванням коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Навар – це зсув металу на поверхні обода колеса висотою понад допустиму. Причиною виникнення є пластична деформація металу при короткочасному заклинюванні коліс (юзі). Даний вид дефекту усувають обточуванням коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Вищербини по світлих плямах – це ділянки поверхні кочення, які викришилися понад допустимі розміри, чи за наявності в них тріщин, чи розшарувань, що йдуть углиб металу. Причиною є утворення «білих плям» при циклічному гальмуванні. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Вищербини по тріщинах втоми – це ділянки поверхні кочення, які викришилися понад допустимі розміри, чи з наявністю в них тріщин або розшарувань, що йдуть у глибину металу. Причиною утворення даного типу

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

дефектів є поширення тріщин у металі від втоми під час багаторазових повторюваних контактних навантажень. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Вищербини по сітці термотріщин – це ділянки поверхні кочення, які викришилися понад допустимі розміри, чи за наявності в них тріщин або розшарувань, що йдуть углибину металу. Причиною утворення даного типу дефектів є наявність неметалевих включень різної природи. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Розчавлювання обода – це місцевий наплив у зоні фаски понад допустимий. Причиною утворення даного виду дефектів є фізична нелокальність (неоднорідність) властивостей металу. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Поверхневий відкол зовнішньої грані обода понад допустимі розміри. Причиною даного дефекту є внутрішні дефекти у металі металургійного виробництва. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

- Відкол кругового напливу понад допустимі розміри. Причиною даного дефекту є внутрішні дефекти у металі металургійного виробництва або неправильна експлуатація рухомого складу. Даний вид дефекту усувається обточуванням поверхні коліс, у випадку неможливості усунення дефекту або його розміру більше допустимого колісна пара бракується.

Відкол на поверхні кочення шару металу з ознаками втомлення. Причиною даного дефекту є внутрішні дефекти у металі металургійного виробництва або неправильна експлуатація рухомого складу. До експлуатації не допускаються колеса із даним видом дефекту.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Розглянемо тепер тріщини та злами у колісних парах.

Згідно [1], ці дефекти бувають наступними: повздовжні тріщини, поперечні поодинокі тріщини у ободі, сітка термічних тріщин у ободі, формування кільцевих тріщин, які паралельні поверхні кочення, тріщини в диску біля маточини, тріщини у диску біля обода, тріщини у маточині, злам колеса по тріщині біля маточини, злам колеса по тріщині в ободі.

Розглянемо етапи розвитку тріщин.

Згідно [2], є наступні етапи розвитку тріщин у тілі: утворення «понаднормативної» пошкодженості у тілі, утворення субмікротріщин, утворення мікротріщин, об'єднання мікротріщини у магістральну тріщину, розвиток магістральної тріщини та розділення тіла (деталі).

При цьому змінюється також і залишкова міцність деталі. Схематичне зображення надійності деталі від розміру тріщини подана на рис. 1.1.

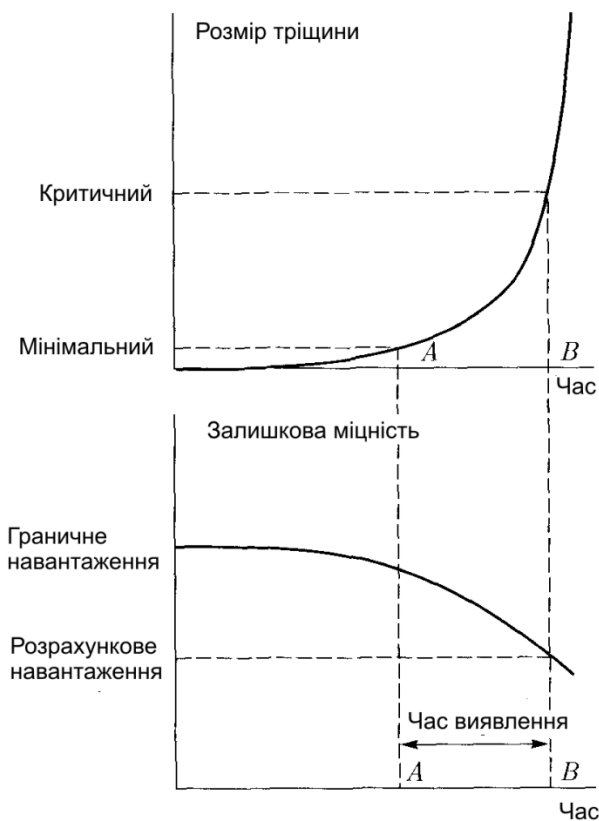


Рисунок 1.1 – Залежність залишкової міцності деталі від розміру тріщини [2]

Як видно з даного рисунку, при зростанні тріщини зменшується залишкова міцність деталі.

В цьому зв'язку важливим є оцінка залишкової міцності деталі при наявності концентраторів напружень типу «тріщини».

Тому більш детально розглянемо «стадії» руйнування тіл [3].

Згідно [3], практично всі технічні матеріали спочатку містять велику кількість різних дефектів різної природи. В умовах природного старіння або при температурно-силових впливах щільність ушкоджень та їх розміри, як правило, збільшуються, з'являються пори та тріщини, які, розвиваючись, призводять до повного руйнування тіла.

Таким чином, процес накопичення пошкоджень можна за масштабною ознакою дефектів, що розвиваються, розділити на три стадії. На першій стадії відбувається накопичення субмікро- і мікроушкоджень, що мають локальний характер. Субмікроушкодження мають розмір набагато менше елементів структури, близько 5-2000 А, і виникають в результаті взаємодії дислокацій між собою, а також з межами зерен під дією напруги зсуву. Тому, якщо говорити про стан мікроструктури матеріалу, то можна вважати, що до вихідного стану воно суттєво не змінюється. Також відомо, що на цій стадії матеріал деформується пружно і паралельно з процесом виникнення субмікро- та мікроушкоджень йде процес їх "заліковування" (самозникнення), тобто на першій стадії процес виникнення пошкоджень носить, як правило, оборотний характер.

Велике практичне значення має вивчення другої стадії, на який процес накопичення розсіяних пошкоджень носить незворотний характер. При цьому виникнення мікроефектів, розмір яких становить від 0.2 до 1000 мкм, призводить, перш за все, до погіршення працездатності та вичерпання ресурсу пластичності матеріалу.

При навантаженні тіла у вигляді структурного середовища, одно-, дво- та тривимірні елементи якої у вихідному стані стосуються один одного "без зазорів", а сили взаємодії між ними в площинах стиків забезпечують

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

цілісність тіла, спочатку внаслідок неузгодженості розмірів та геометричних форм, а також анізотропії та відмінності властивостей елементів структури в окремих мікронах виникають спалахи напруги, що призводять до локальних пластичних деформацій і надривів у вигляді мікропорів і мікротріщин, розміри яких можна порівняти або менше розмірів елементів. Подальше навантаження супроводжується збільшенням числа мікродфектів, проте темп зростання їх кількості в процесі деформування знижується, що пов'язано із взаємною адаптацією структурних елементів та їх самоорганізацією. Цей період відповідає стійкого пружнопластичного деформування на стадії зміцнення.

У певному інтервалі макродеформацій відбувається насичення тіла мікродфектами до деякого характерного для даного матеріалу рівня, при якому мікророзпушення за рахунок зростання кількості мікродфектів змінюється розпушенням за рахунок зростання їх розмірів, у тому числі шляхом злиття окремих мікропор та мікротріщин.

Темп розпушення зі зростанням макродеформації починає збільшуватися і зрештою призводить до утворення макротріщин, подальший розвиток яких (третя стадія) описується методами механіки тріщин (механіки руйнування).

При цьому випробування зразків з різного роду концентраторами напружень, що забезпечують деформування металу при тривісному розтягуванні, дозволяють отримати як якісну, а й кількісну інформацію про кінетиці зародження та розвитку руйнування, обумовленого впливом виду напруженого стану.

Аналіз результатів проведених досліджень показав, що тріщини завжди зароджуються у полі великих градієнтів напружень і деформацій. Відзначається стійка стадійність процесу накопичення ушкоджень, загальна для зразків із різними концентраторами.

Залежно від жорсткості концентратора макротріщина може зароджуватися як у центрі зразка, так і на поверхні, причому для кожного

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

матеріалу існує такий концентратор напруг, при якому зародження та розвиток макротріщини відбувається одночасно з центру зразка і з поверхні. Лінійність окремих ділянок спадаючої гілки пояснюється тим, що макротріщина, що утворилася, поширюється в адекватних полях пошкоджень (на кшталт пошкоджень та їх статистичного розподілу), сформованих у процесі попереднього статичного деформування.

Встановлено, що вид напруженого стану матеріалу, в першу чергу, позначається на параметрах структури матеріалу в граничному стані (змінюється ширина зони процесу, в якій відбувається безпосереднє злиття пір і мікротріщин у макротріщину, змінюється тип пошкоджень та їх статистичне розподілення). При цьому, зі збільшенням жорсткості напруженого стану енергоємність руйнування зменшується, що свідчить про стійку тенденцію до крихкнення матеріалу.

Встановлено сильний вплив на енергетичні характеристики руйнування та на зміну мікромеханізмів руйнування температурних умов на різних стадіях зростання макротріщини, причому основну роль відіграє рівень та характер пошкодження матеріалу, досягнутий на попередньому етапі теплового навантаження. Цей вплив має неоднозначний характер для різних класів матеріалів.

Відмінність фізичної природи окремих пошкоджень, їх геометрії та розмірів, а також масштабна стадійність розвитку вимагають використання різних підходів при побудові феноменологічних моделей, зокрема, що описують кінетику накопичення пошкоджень на окремих стадіях. Як зазначалося, великий практичний інтерес представляє моделювання процесів накопичення розсіяних ушкоджень (друга стадія) та розвитку локальних ушкоджень (третья стадія). Тут найменш вивченою залишається друга стадія, в основному, у зв'язку зі складністю вибору параметра (системи параметрів), що характеризують зміну структури та властивостей матеріалу, які можна ставити у відповідність до узагальненого поняття "ушкодженість" або швидкості її зростання в процесі напрацювання.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Використовувані нині силові, деформаційні та енергетичні характеристики який завжди досить адекватні, а їх визначення часто потрібне застосування спеціального приладового забезпечення.

## **1.2 Вимоги нормативної літератури щодо особливостей функціонування колісних пар тягового рухомого складу**

Розглянемо вимоги нормативного документа [4] до колісних пар тягового рухомого складу.

Згідно п. 5.2 Інструкції [4] є наступні несправності бандажів та ободів суцільнокатаних коліс, що потребують ремонт або заміну:

- тріщини поперечні або косі незалежно від розміру, кількості і місця розташування (спосіб усунення - бандаж (суцільнокатане колесо) бракується.

У депо допускається усунути обробленням термічні тріщини на вершині гребеня глибиною до 5 мм із зняттям металу за її межі на глибину 1,5-2,0 мм.);

- тріщини і плени поздовжні: а) на поверхні кочення бандажа або обода суцільнокатаного колеса, поверхні гребеня і внутрішньої бічної поверхні; б) на зовнішніх бічних гранях бандажа або обода суцільнокатаного колеса; в) на внутрішній поверхні бандажа й виточці для бандажного кільця (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті до повного зникнення.

Усувається вирубкою або шліфувальною машинкою з плавним переходом до основної поверхні бандажа або обода. Глибина вирубок допускається не більше 5 мм. Загальна довжина вирубок на однім бандажі або ободі суцільнокатаного колеса не повинна перевищувати 300 мм. Кількість вирубок на одному поперечному перетині не повинно бути більше двох у бандажів і більше трьох на ободах суцільнокатаних коліс. Бандаж бракується.);

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

- раковини на поверхні кочення бандажа або обода суцільнокатаиого колеса (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті до повного зникнення.);

- вищерблини на поверхні кочення бандажа, обода суцільнокатаного колеса (спосіб усунення - дозволяється залишати без виправлення до першого викочення або оброблення колісної пари: у локомотива і моторного вагона довжиною не більше 10 мм, глибиною не більше 3 мм; у причіпного вагона довжиною не більше 25 мм, глибиною не більше 3 мм. Вищерблини більших розмірів усувають обробленням.);

- виїмки (борозни) на вершині гребеня (спосіб усунення - незалежно від довжини і глибини усунути обробленням на верстаті до повного зникнення);

- сколи, викришування, вищерблини, раковини, що йдуть під упорний бурт або бандажне кільце (незалежно від розмірів); при цьому дефекті бандаж бракується;

- задири у підніжжя робочої частини гребеня та у районі круга кочення (незалежно від розмірів); спосіб усунення – усувається обточуванням на верстаті до повного зникнення;

- повзун (вибоїна) на поверхні кочення бандажів або суцільнокатаних коліс більше допустимого значення; спосіб усунення - усувається обточуванням;

- ослаблення бандажа на ободі центру, визначене по звуку при ударі слюсарним молотком по бандажу або по взаємному зсуві контрольних відміток на бандажі й ободі (спосіб усунення - якщо при зрушенні контрольної відмітки звук при ударі по бандажу підтверджує його ослаблення, усунути заміною бандажа. якщо при зрушенні контрольної відмітки звук при ударі по бандажу не підтверджує його ослаблення і бандажне кільце не ослабло, дозволяється подальша експлуатація); При цьому на МВРС, пасажирських локомотивах і локомотивах, що обертаються зі швидкістю до 100 км/год, проти відмітки на бандажі поставити нову

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

відмітку на ободі з записом у журнал технічного стану локомотива (форми ТУ 152), книгу ремонту (форми ТУ28) та технічний паспорт колісної пари, а стару зачеканити. На МВРС, пасажирських локомотивах, локомотивах, що обертаються зі швидкостями вище 100 км/год, перенос відміток забороняється. Бандаж підлягає заміні. Постановку нових контрольних кернів повинні робити комісійно інженер з приймання локомотивів і майстер, які мають право на проведення опосвідчення колісних пар. За роботою колісних пар в таких випадках повинно бути встановлене спостереження. На першому виді ремонту, що передбачає викочення колісної пари з під ТРС, бандаж підлягає заміні. При повторному зрушенні бандажа, навіть без ознак його ослаблення, повторне перенесення відмітки не допускається. Бандаж підлягає заміні.

- прокат бандажів або суцільнокатаних коліс більше допустимого значення (спосіб усунення – усувається обробленням на верстаті);

- місцеве або по всій поверхні кочення збільшення ширини бандажа або обода суцільнокатаного колеса більше допустимого значення (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті до повного зникнення);

- товщина гребеня менше допустимого значення (спосіб усунення – усунути обробленням на верстаті. При ремонті в депо гребінь дозволяється відновлювати електронаплавленням із наступним обточуванням на верстаті, крім колісних пар МВРС (моторвагонного ремонтного складу) і пасажирських локомотивів);

- вертикальний підріз гребеня (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті. При ремонті в депо гребінь дозволяється відновлювати електронаплавленням із наступним обточуванням на верстаті, крім колісних пар МВРС і пасажирських локомотивів.);

- гострокінцевий накат на гребені (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті. Виведення гострокінцевого накату шліфувальними машинками забороняється.);

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

- небезпечна форма гребеня, що вимірюється (спосіб усунення - усунути обробленням на верстаті);

- товщина і ширина бандажа або обода суцільнокатаного колеса менше допустимих значень (спосіб усунення - бандаж або суцільнокатане колесо бракується);

- навар металу на поверхні кочення (спосіб усунення - усунути обточуванням на верстаті до повного зникнення);

- ослаблення бандажного кільця більше допустимих розмірів (можлива ознака - відставання бруду між бандажним кільцем і центром) (спосіб усунення - не допускається, усунути шляхом заміни бандажного кільця або обтисканням притискного бурту бандажа на вальцювальному верстаті, пневматичним молотком з обтискачем або кувалдою під гладилку. До обтискання притискного бурту бандаж нагріти до 220-270 °С);

- товщина притискного і упорного буртів бандажа менше допустимого значення (спосіб усунення - бандаж бракується);

- зазор між бічною гранню обода і упорним буртом бандажа (спосіб усунення - допускається не більше 0,5 мм по всьому колу на глибину не більше половини висоти бурту, при більших розмірах бандаж бракується);

- різниця відстаней між внутрішніми гранями бандажів або ободів суцільнокатаних коліс в одній колісній парі більше допустимого значення або невідповідність цих відстаней встановленим нормам, вимірювати в непідкоченій колісній парі в чотирьох місцях у двох взаємно перпендикулярних площинах, що проходять через центр осі (спосіб усунення - усунути обробленням або заміною бандажів, перепресуванням центрів і суцільнокатаних коліс, перенасаджуванням бандажів із наплавленням і наступним обробленням бічних граней обода, заміною осі при її зігнутості).

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

### 1.3 Висновки

1. Проведено аналіз основних дефектів колісних пар, які проявляються у колісних парах рухомого складу.

2. Показано, що наявність дефектів зменшує експлуатаційну надійність деталей.

3. Встановлено, що концентратори напружень, в зоні яких є великі градієнти напружень і деформацій, виступають як джерело зародження тріщин. Дане питання є важливим і даний момент мало дослідженою проблемою для розвитку залізничного транспорту.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

## **2 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ МЕХАНІКИ ДЛЯ ТІЛ ІЗ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ОЦІНЦІ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ**

### **2.1 Аналіз «класичних» підходів при оцінці надійності елементів конструкцій**

Слідуючи сучасним роботам з теорій міцності [2, 3], серед існуючих теорій міцності можна виділити три основні напрямки розвитку: експериментально-феноменологічний, де основна увага приділяється експериментальному вивченню поведінки реальних матеріалів під зовнішнім навантаженням і при руйнуванні; розрахунково-аналітичне, засноване на узагальнених математичних моделях вивчення критеріїв; міцності для безперервних середовищ з урахуванням їх в'язкопружності, пластичності, повзучості та реологічної поведінки без заглиблення у фізику процесів структурно-фізичне, у якому розглядають закономірності структурних змін у матеріалі при його навантаженні, наприклад, дислокаційні механізми субмікроскопічні порушення в кристалічній решітці та спричинені навантаженням їх зміна, що призводить до руйнування.

Серед другого напрямку, де переважають математичні підходи до опису пластичного поведінки матеріалів (переважно металів), можна назвати: деформаційні теорії пластичності, засновані на вивченні зв'язку повної деформації з напруженнями; теорії течіння на основі зв'язку напружень із збільшенням деформацій; теорія ідеально пластичних матеріалів, коли приймається закон ідеальної пластичності (без зміцнення).

Випробування міцності матеріалів твердих тіл проводять найчастіше у стандартних умовах. У конкретних випадках розрахунку міцність і напружений стан твердого тіла може бути різним. Існуючі теорії міцності дозволяють з деякими припущеннями вести розрахунки на міцність, спираючись на показники міцності або пластичності, отримані при

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

стандартних випробуваннях, не вдаючись до спеціальних випробувань у складному напруженому стані.

Сучасні теорії міцності створювалися головним чином для конструкційних матеріалів, а тому для них в якості характеристики граничного стану приймається досягнення межі текучості твердого тіла і лише для крихких тіл - межі міцності.

Класичні теорії міцності. Перші дослідження в галузі міцності матеріалів, пов'язані з іменами Леонардо да Вінчі та Галілея, привели до створення першої теорії міцності, згідно з якою граничний стан досягається тоді коли досягне граничного значення одна з головних напружень:

$$\sigma_e = \sigma_1 \leq [\sigma_p], \quad (2.1)$$

$$\sigma_e = \sigma_2 \leq [\sigma_p], \quad (2.2)$$

$$\sigma_e = \sigma_3 \leq [\sigma_p], \quad (2.3)$$

де  $\sigma_e$  - еквівалентні напруження,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - головні напруження,

$[\sigma_p]$  - межа міцності при розтягу.

Згідно з другою теорією міцності граничний стан досягається тоді, коли досягне граничного значення величина головної деформації:

$$\sigma_e = [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq [\sigma_p], \quad (2.4)$$

де  $\mu$  - лінійний коефіцієнт.

Третя теорія міцності полягає в гіпотезі, що у процесі руйнування чи досягнення пластичного стану вирішальну роль грають дотичні напруження, і, відповідно, руйнування починається тоді, коли дотичні напруження досягають свого критичного значення:

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq [\tau_{\max}], \quad (2.5)$$

де  $[\tau_{\max}]$  - максимальний рівень граничних напружень.

Четверта, або енергетична, теорія міцності полягає в припущенні, що руйнування досягається чи пластичний стан настає тоді, коли питома енергія формозміни досягає граничного значення:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (2.6)$$

Дана гіпотеза міцності враховує відмінність у властивостях матеріалів при розтягуванні та стиску. Умова міцності з гіпотези Мора має вигляд:

$$\sigma_e = \sigma_1 - k\sigma_3 \leq [\sigma_p], \quad k \approx \frac{\sigma_p}{\sigma_{cm}}, \quad (2.7)$$

де  $\sigma_1, \sigma_3$  - головні напруження,

$\sigma_p$  - межа міцності при розтягу,

$\sigma_{cm}$  - межа міцності при стиску.

## 2.2 Аналіз «некласичних» підходів при оцінці надійності елементів конструкцій

Розвиток машинобудування вимагає зниження матеріаломісткості та маси виробів з одночасним підвищенням їхньої надійності в умовах зростаючих нестационарних навантажень [5].

У цьому найважливішою проблемою є забезпечення міцності поверхневих шарів матеріалу деталей, а також опір руйнування у процесі експлуатації [3].

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Традиційні шляхи вирішення даних питань, що пропонують суттєву економію енергоресурсів за рахунок розробки аналогів матеріалів або їх модифікації, досягли певних меж. У зв'язку з цим у сучасній інженерії поверхні склалися пріоритетне напрямки: розробка та широке застосування багатофункціональних покриттів, які як зміцнюють, так і захищають від зовнішніх впливів поверхні відповідальних елементів конструкцій [6].

Характерною особливістю будови поверхневих шарів, отриманих в результаті технологічної або експлуатаційної модифікації, є чітко виражена неоднорідність властивостей, яка має 3-d функціонально-градієнтні параметри.

Топологічна та розмірна неоднорідність геометричної будови поверхневих шарів, яскраво виражена локальність передачі навантажень в умовах контактної взаємодії, а також гетерогенність властивостей матеріалів, призводить до неоднорідності напружено-деформованого стану та його суттєвого впливу на експлуатаційні характеристики деталей.

На даний момент, як в інженерній практиці, так і в дослідній роботі при оцінці параметрів міцності функціонально-градієнтних конструкцій найчастіше використовується «традиційний підхід», що не враховує особливості поведінки матеріалу за наявності концентраторів напруг різного походження, їх ієрархічної вкладеності, наявності яких істотно змінює експлуатаційні параметри виробів проти однорідним напруженим станом.

У зв'язку з цим є актуальним використання при оцінці експлуатаційних параметрів конструкцій нелокальних критеріїв міцності, які дозволять враховувати поведінку матеріалу під навантаженням як від його будови, так і особливо напруженого стану [5].

Питання важливості оцінки міцності матеріалу у локальних зонах у сфері концентрації напруг, мабуть, вперше було піднято Серенсенем [5, 7]. Труднощі вирішення даної проблеми, яка є відкритою і на даний момент, пов'язані з необхідністю одночасного обліку як неоднорідності розподілу

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

напруги, так і внутрішніх характеристик пов'язаних зі структурою матеріалу в поточний момент часу.

Більшість традиційних класичних критеріїв міцності, що використовуються в механіці (описані у попередньому розділі роботи), не дозволяють враховувати нелокальні характеристики поведінки конструкції.

Вперше можливість урахування впливу структури матеріалу та її неоднорідності на параметри міцності конструкції при узагальненні класичних критеріїв було запропоновано в роботі [8].

За основу було взято критерій міцності Писаренко-Лебедева:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 < \sigma_{міц}, \quad (2.8)$$

який з урахуванням функції впливу має вигляд:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 P < \sigma_{міц}. \quad (2.9)$$

У співвідношеннях (2.8) та (2.9)  $\sigma_i$  - інтенсивність напружень;  $\sigma_1$  - перше головне напруження;  $\sigma_{міц}$  - межа міцності;  $P$  - функція впливу;  $\chi = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$ , де  $\sigma_p$  - межа міцності при розтягуванні;  $\sigma_{сж}$  - межа міцності при стисканні.

Для визначення функції  $P$  було запропоновано таке співвідношення:

$$P = A^{1-3\bar{\sigma}/\sigma_i}, \quad (2.10)$$

де  $A$  - параметр неоднорідності структури;  $\bar{\sigma}$  - гідростатичне напруження.

Зазначимо, що часто в машинобудівних конструкціях розмір зони структурної неоднорідності можна порівняти з розміром зони неоднорідності

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

напруг. Цей факт призводить до необхідності врахування поведінки матеріалу у певній області кінцевого розміру, а не лише в одній точці.

Одним із можливих шляхів обліку впливу структурних параметрів на експлуатаційні характеристики є використання інтегральних критеріїв міцності, які у загальному випадку описуються нерівністю:

$$\langle \sigma_e \rangle_d < \sigma_m, \quad (2.11)$$

де  $\langle \sigma_e \rangle_d$  – середнє значення еквівалентної напруги за параметром  $d$ .

Розмір зони  $d$  вважають константою матеріалу.

У зарубіжній літературі для цих критеріїв використовують позначення ASC (average stress criterion – критерій середньої напруги), а вітчизняної називають критеріями Нейбера-Новожилова [5].

Істотне спрощення інтегральних критеріїв з урахуванням апріорного припущення про розподіл напружень, у результаті інтегрування замінюється обчисленням напружень від точки максимуму еквівалентних напружень прийнято називати критеріями міцності по напружень у точці або PSC (point stress criterion) [5].

Зазначимо, що PSC-критерії на даний момент набули досить широкого поширення.

Можливість обліку в умовах міцності також і зміна властивостей матеріалів зони передруйнування запропонована у FPZ-критеріях (fracture process zone).

Ряд моделей FPZ базується на підходах лінійної механіки руйнування, з використанням яких досліджується асимптотична поведінка напруг поблизу вершини тріщини [5]. При цьому як міра напруженого стану розглядається не залежить від координат коефіцієнт інтенсивності напружень.

Більш складні FPZ моделі враховують сили зчеплення, деградацію пружних постійних матеріалів, розподіл локальної пошкодженості у зоні передруйнування [5].

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Для врахування масштабних ефектів механічних властивостей матеріалу конструкції використовують статистичні чи градієнтні моделі міцності.

У першому випадку характерні розміри структурних параметрів враховуються за допомогою стохастичних розподілів, зокрема, теорії Вейбулла [5].

У разі апріорного припущення, що настання граничного стану визначається як значення самої напруги, так і їх градієнтів, використовуються градієнтні критерії міцності [9, 10]. Зазначимо, що ці теорії також мають ряд обмежень, особливо якщо градієнти напружень перетворюються в нуль (наприклад, у випадку симетрії області тіла).

Зазначимо, що на даний момент питання вибору оптимального критерію міцності нелокального для опису функціонально-градієнтних конструкцій в умовах локальних зосереджених контактних розподілених навантажень є відкритим.

### 2.3 Висновки

1. Проаналізовані «класичні» підходів, що використовуються при оцінці міцності елементів конструкцій, та дозволяють на основі аналізу напружено-деформованого стану проводити розрахунок втрати міцнісних параметрів елементів конструкцій.

2. Проведено огляд сучасних підходів механіки, які використовуються при аналізі та оцінці надійності елементів конструкцій.

3. Встановлено, що на даний момент питання вибору оптимального критерію міцності нелокального для опису функціонально-градієнтних конструкцій в умовах локальних зосереджених контактних розподілених навантажень є відкритим.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ТІЛА ІЗ КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ

#### 3.1 Побудова розрахункової та комп'ютерної схем встановлення напружено-деформованого стану тіл із концентрами напружень

Проведемо побудову розрахункової схеми згідно наукового джерела [11]. Результати використовуються відповідно до дозволу авторів цієї роботи.

Для аналізу контактної міцності тіл з концентраторами напружень розглянемо наступне узагальнене математичне формулювання:

1. Нехай досліджуване тіло (деталь) займає область простору  $X$ , поверхню тіла позначимо  $\partial X$ .

2. В тілі задамо області  $Y_1, \dots, Y_n$ , які є джерелами концентрації напружень ( $Y_i \subset Y$ ,  $i=1..n$ ) із параметрами  $R_1, \dots, R_n$ ,  $R_i, i=1..n$  - радіуси відповідних концентраторів, та  $Z_1, \dots, Z_n$ ,  $Z_i, i=1..n$  - відповідні їм координати.

3. Поверхню тіла представимо у вигляді сукупності непересічних множин  $\partial X = \partial X_1 \cup \partial X_2 \cup \partial X_3$ , де  $\partial X_1$  - область тіла, в якій задані силові навантаження,  $\partial X_2$  - область тіла, з заданими обмеженнями по переміщенню,  $\partial X_3$  - ненавантажена поверхня. Области  $\partial X_1$ ,  $\partial X_2$ ,  $\partial X_3$  в свою чергу можуть складатися з простих підобластей:  $\partial X_1 = \bigcup_{i=1}^n \partial X_1^i$ ,  $\partial X_2 = \bigcup_{j=1}^m \partial X_2^j$ ,  $\partial X_3 = \bigcup_{l=1}^k \partial X_3^l$ .

4. В кожній з елементарних підобластей  $\partial X_1^i$  заданий силовий вектор  $\vec{F}_1^i$ , а на  $\partial X_2^j$  - вектор переміщень  $\vec{u}_2^j$ , які в  $\partial X$  мають наступний розподіл  $\vec{F}_1^i = \vec{F}_1^i(x)$ ,  $\vec{u}_2^j = \vec{u}_2^j(x)$ ,  $x \in \partial X$ .

При розгляді поведінки деталей в умовах контактних навантажень використаємо математичну модель пружного континууму з розподіленою пошкодженістю, яка наведена в роботі [12]:

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

$$\bar{\nabla} \cdot \left\{ \frac{K(x)}{1 - \sqrt{\alpha_1 (\omega(x))^2 + \alpha_2 (|\bar{\nabla} \omega(x)|)^2 + \alpha_3 \left( \frac{1}{V_0} \int_V \omega dV \right)^2}} (\bar{\nabla} \cdot \bar{u}) \hat{I} + \frac{2G(x)}{1 - \sqrt{\alpha_1 (\omega(x))^2 + \alpha_2 (|\bar{\nabla} \omega(x)|)^2 + \alpha_3 \left( \frac{1}{V_0} \int_V \omega dV \right)^2}} \left( \bar{\nabla} \otimes \bar{u} - \frac{1}{3} (\bar{\nabla} \cdot \bar{u}) \hat{I} \right) \right\} = 0, \quad (3.1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - числові константи,

$\omega(x)$  - пошкоджуваність,

$\bar{u}$  - вектор переміщень,

$\hat{I}$  - одиничний тензор,

$\bar{\nabla}$  - диференційний оператор Гамільтона,

$K(x)$  - модуль об'ємного стиснення,

$G(x)$  - модуль зсуву,

$\otimes$  - тензорний добуток,

$\cdot$  - скалярний добуток,

$V_0$  - характерний розмір області матеріалу на мезорівні дорівнює трьом діаметрам зерен.

В результаті силових навантажень в деталі формується напружений стан, який характеризується в кожній точці тензором  $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}(x)$ ,  $x \in X$ .

Оскільки номінальні напруження однозначно не визначають експлуатаційні параметри конструкцій [1], для аналізу контактної міцності використовували вираз:

$$k(x) = 1 - \frac{\sigma_m(x)}{\sigma^*(x)}, \quad (3.2)$$

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

де  $k(x)$  – коефіцієнт запасу контактної міцності,

$\sigma_m(x)$  - еквівалентне подання тензора напружень в формі Мізеса,

$\sigma^*(x)$  - властивості міцності матеріалу в точці.

Величина  $k(x)$  змінюється в інтервалі  $(-\infty; 1]$ , при  $k(x)=1$  - відсутнє знеміцнення, при  $k(x) \leq 0$  - пройшло знеміцнення.

Задача підвищення контактної міцності тіла  $X$  із заданої множини концентраторів напружень  $\{Y_1, \dots, Y_n\}$  зводиться до пошуку такого структурно-енергетичного стану тіла, що забезпечує стабільність стану експлуатаційної надійності конструкції:

$$L(R_i, Z_i) = \dim_{x \in V} (k(x) \leq 0) \rightarrow const, \quad (3.3)$$

де  $\dim(\dots)$  - розмір області, що задовольняє заданій умові.

В якості прикладу для дослідження розглянемо одну із найбільш поширених технологій інженерії поверхні – плазмове зміцнення бандажа колеса локомотива, яке змінює структурно-енергетичний стан матеріалу як в поверхневих шарах, так і в глибині за рахунок цілеспрямованого теплового впливу на деталь [6]. В результаті в приповерхневих зонах формуються градієнтні структури, властивості яких істотно відрізняються в різних зонах.

При дослідженні розглянемо двовимірне прямокутне тіло з симетричним розподілом концентраторів напружень радіусом  $R_1$ , що знаходиться на віддалі  $Z_1$  від зони фрикційних навантажень (рис. 3.1).

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

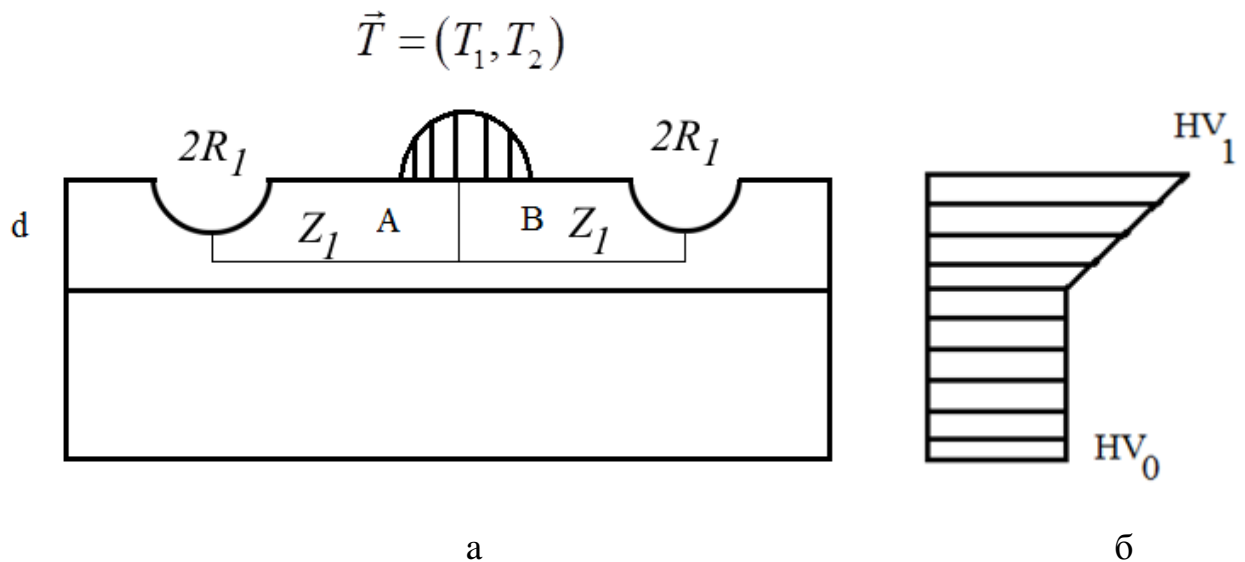


Рисунок 3.1 – Об'єкт дослідження: АВ - пляма контакту (область контактної взаємодії),  $\vec{T} = (T_1, T_2)$  - вектор навантаження,  $d$  - товщина зони зміцнення,  $R_1$  - радіус концентраторів напружень,  $Z_1$  - віддаль між зоною контакту і концентраторами напружень; б) епюра розподілу мікротвердості по глибині:  $HV_1$  - значення мікротвердості на поверхні,  $HV_0$  - значення мікротвердості в глибині матеріалу

### 3.2 Надання практичних рекомендацій щодо впливу просторових параметрів концентраторів на надійність конструкцій

Перед проведенням розрахунків було встановлено, що безпосередньо на поверхні бандажа локомотивного колеса в результаті плазмового зміцнення мікротвердість становить  $HV_1 = 3900$  МПа, вихідна мікротвердість –  $HV_0 = 2600$  МПа, яка виявляється на глибині  $d=2$  мм від поверхні, величину вихідної силового навантаження взяли рівній  $12.5 \cdot 10^4$  Н, а коефіцієнт тертя - 0.25.

Значення навантаження прийmemo  $12.5 \cdot 10^4$  Н, а коефіцієнт тертя рівний 0.25. Для розрахунків додатково прийmemo величину  $R_1 = 3$  мм, а  $Z_1 = 10$  мм. Така постановка задачі відповідає контактній взаємодії колесо-рейка, при наявності на колесі пошкоджень у вигляді симетричних концентраторів напружень експлуатаційного або технологічного походження.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		28

В результаті розрахунків отримаємо поле напружень, яке буде мати вид, що показаний на рис. 3.2.

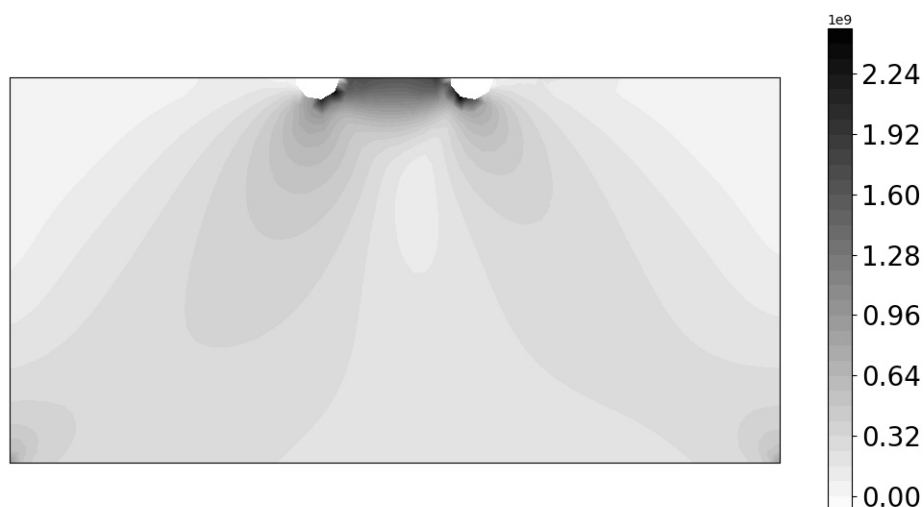


Рисунок 3.2 – Розподіл напружень в досліджуваній конструкції за наявності симетричних концентраторів при навантаженні  $12.5 \cdot 10^4$  Н,  $10^9$  Па

Оскільки напружений стан однозначно не визначає міцнісні показники об'єкта, як характеристику його експлуатаційних властивостей приймемо знеміцнення конструкції згідно співвідношення (3.2).



Рисунок 3.3 – Розподіл величини знеміцнення в тілі за наявності симетричних концентраторів напружень

Проведемо дослідження впливу розміру концентраторів напружень на знеміцнення конструкції в залежності від глибини зміцнення шару матеріалу. Для цього в якості критерія оптимізації виберемо функціонал (3), а під керуючим параметром будемо розглядати товщину зміцненого шару  $d$ .

Величину  $d$  будемо змінювати від 0 до 10 мм, а розмір радіуса концентратора напружень  $R_l$  від 1 до 3 мм. В результаті отримаємо наступну залежність максимальної зони знеміцнення  $d$  (рис. 3.4, 3.5, 3.6).

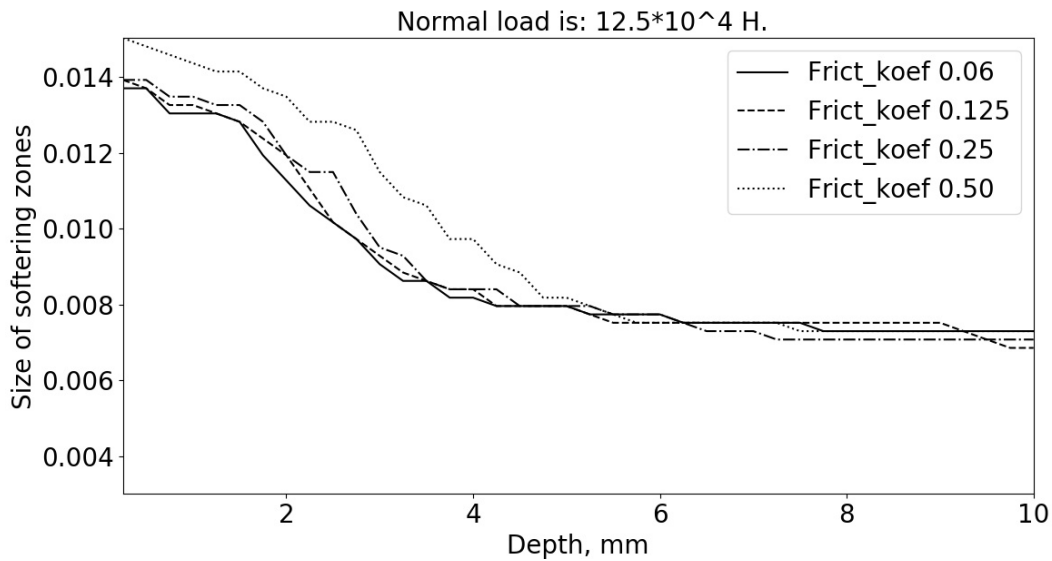


Рисунок 3.4 – Значення величини знеміцненої зони для нормального навантаження  $12.5 \cdot 10^4$  Н і розмірі концентраторів напружень  $R_l = 1$  мм

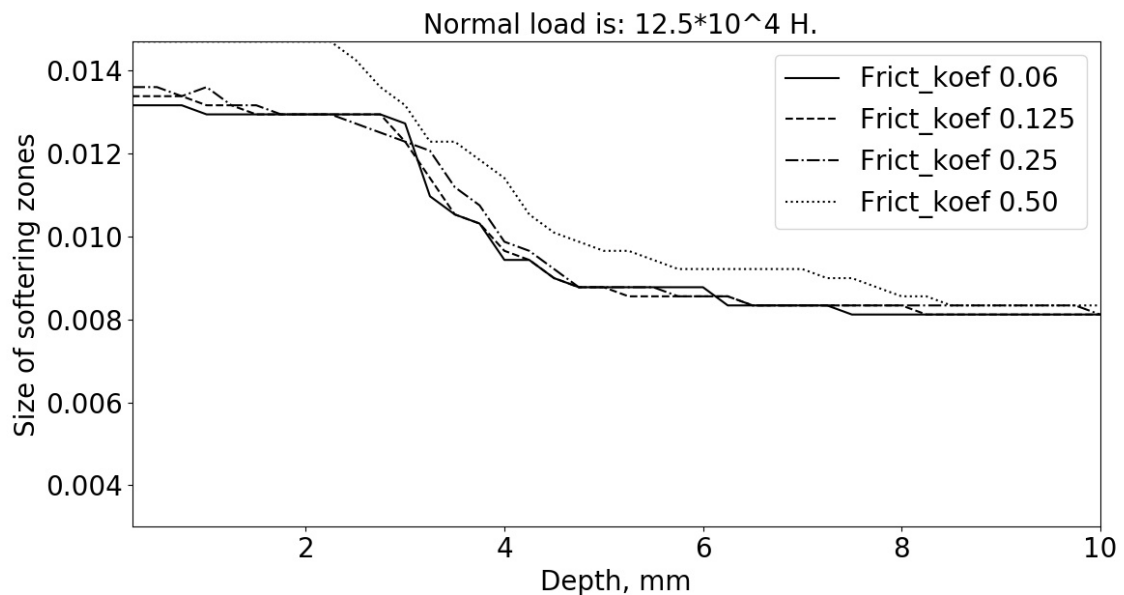


Рисунок 3.5 – Значення величини знеміцненої зони для нормального навантаження  $12.5 \cdot 10^4$  Н і розмірі концентраторів напружень  $R_l = 2$  мм

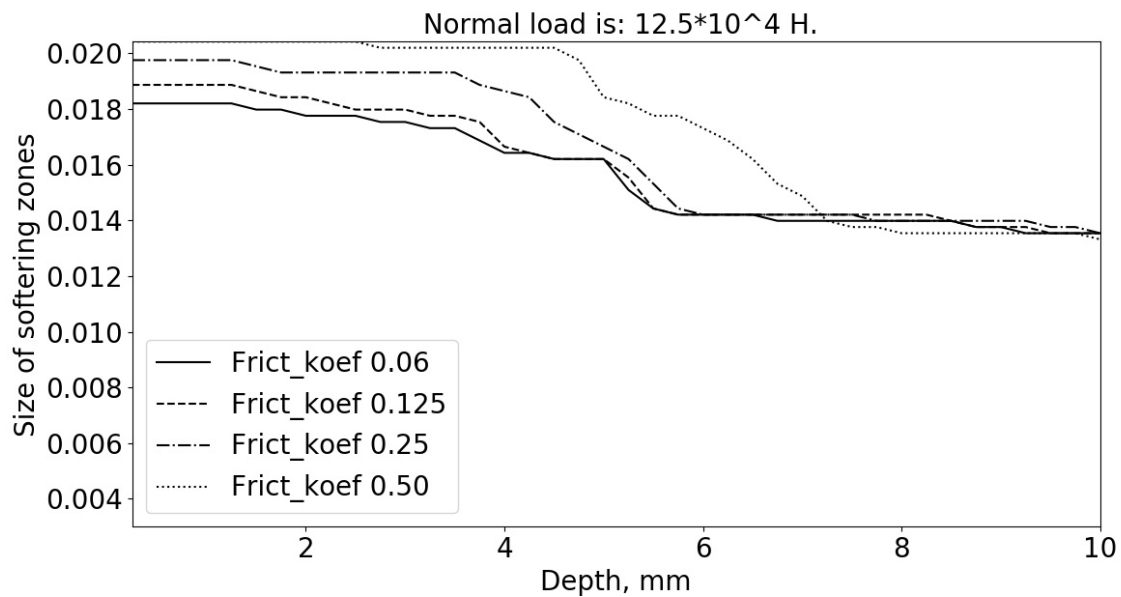


Рисунок 3.6 – Значення величини знеміцненої зони для нормального навантаження  $12.5 \cdot 10^4$  Н і розмірі концентраторів напружень  $R_1 = 3$  мм

Аналіз проведених розрахунків вказує на те, що в залежності від розміру поверхневого концентратора напружень і коефіцієнту тертя існує деяке значення глибини зміцненого шару  $d^*$ , яке приблизно в 2.5..4.0 рази більше радіуса концентраторів напружень, при досягненні якого параметр знеміцнення істотно не змінюється. Подальше зміцнення буде недоцільним, оскільки при тих самих параметрах експлуатаційної міцності збільшуються енерговитрати на технологічний процес поверхневої обробки.

Додатково спостерігається нелінійна залежність росту зон знеміцнення зі зміною розміру концентраторів напружень: при збільшенні  $R_1$  від 1 до 3 мм, зростання розміру знеміцнених зон відбувається в 2 рази.

Також спостерігається зміна параметра знеміцнення в залежності від коефіцієнта тертя, що вказує на вплив процесів, які відбуваються у зоні фрикційного контакту, на міцнісні параметри коліс. Для забезпечення функціонування колісних пар в умовах, коли коефіцієнт тертя буде близьким до 0.5, необхідно додатково на 15..25% збільшити товщину шару поверхневого зміцнення.

Розроблений підхід дозволяє проводити вибір режимів плазмового зміцнення для управління експлуатаційними параметрами колісних пар локомотивів з наявністю концентраторів напружень. Оптимізація режимів

обробки забезпечує міцність та довговічність деталей у відповідності із умовами безпеки функціонування залізничної інфраструктури, які наведені у нормативних документах [4, 13-15].

### 3.3 Висновки

1. Проведено побудови розрахункової схеми для встановлення напружено-деформованого стану тіл з концентраторами напружень.

2. Проведені відповідні розрахунки та встановлено, що в залежності від розміру концентратора напружень необхідно проводити зміцнення бандажів коліс на різну глибину, яка має бути в 2.5..4.0 рази більше радіуса концентраторів. Зміцнення бандажів коліс локомотивів на більшу глибину недоцільно, оскільки при тих же самих параметрах експлуатаційної міцності зростають витрати на технологічний процес.

3. Для забезпечення функціонування колісних пар в умовах, коли коефіцієнт тертя буде близьким до 0.5, необхідно на 15..25% збільшити товщину шару поверхневого зміцнення

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних дефектів колісних пар, які проявляються у колісних парах рухомого складу. Показано, що наявність дефектів зменшує експлуатаційну надійність деталей. Встановлено, що концентратори напружень, в зоні яких є великі градієнти напружень і деформацій, виступають як джерело зародження тріщин. Дане питання є важливим і даний момент мало дослідженою проблемою для розвитку залізничного транспорту.

2. Проаналізовані підходи, що використовуються при оцінці міцності елементів конструкцій, та дозволяють на основі аналізу напружено-деформованого стану проводити розрахунок втрати міцнісних параметрів елементів конструкцій. Встановлено, що на даний момент питання вибору оптимального критерію міцності нелокального для опису функціонально-градієнтних конструкцій в умовах локальних зосереджених контактних розподілених навантажень є відкритим.

3. Проведено побудови розрахункової схеми для встановлення напружено-деформованого стану тіл з концентраторами напружень.

4. Проведені відповідні розрахунки та встановлено, що в залежності від розміру концентратора напружень необхідно проводити зміцнення бандажів коліс на різну глибину, яка має бути в 2.5..4.0 рази більше радіуса концентраторів. Зміцнення бандажів коліс локомотивів на більшу глибину недоцільно, оскільки при тих же самих параметрах експлуатаційної міцності зростають витрати на технологічний процес. Для забезпечення функціонування колісних пар в умовах, коли коефіцієнт тертя буде близьким до 0.5, необхідно на 15..25% збільшити товщину шару поверхневого зміцнення.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дефекти залізничних коліс: Монографія/ І.О. Вакуленко, В.Г. Анофрієв. М.А. Грищенко, О.М. Перков. – Д.: Вид-во Маковецький, 2009. – 112 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
3. Прочность материалов и конструкций. – К: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
4. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. – К., 2011. – 168 с.
5. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций/ Н.О. Кузин, Б.А. Ляшенко, В.П. Ламашевский// Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. - № 6/1 (26). – с. 4 – 8.
6. Харченко, В. В. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости [Текст] / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко и др.; под ред. В. В. Харченко. – К.: Ин-т проблем прочности, 2010. – 193 с.
7. Серенсен, С. В. О гипотезах прочности и расчетных формулах [Текст] / С. В. Серенсен // Вестник инженеров и техников. – 1938. – № 7. – С. 430–433.
8. Лебедев, А. А. Критерий прочности структурно-неоднородных материалов [Текст] / А. А. Лебедев // Проблемы прочности. – 1969. – № 1. – С. 57–60.
9. Леган, М. А. О взаимосвязи градиентных критериев локальной прочности в зоне концентрации напряжений с линейной механикой разрушения [Текст] / М. А. Леган // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – № 4. – С. 146–154.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

10. Харлаб, В. Д. Градиентный критерий хрупкого разрушения [Текст]: Межвуз. темат. сб. тр. СПБИСИ / В. Д. Харлаб // Исследование по механике строительных конструкций и материалов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1993. – С. 4–16.

11. Stotsko, Z., Kuzin, O., Kuzin, M. The Optimal Thickness of the Surface Plasma Hardening Layer of Functional-Gradient Parts with Symmetrical Stress Concentrators// Lecture Notes in Mechanical Engineering. - 2021. - p. 75–83.

12. Kuzin O., Lukiynates B., Kuzin N. Continual description of polycrystalline systems taking into account their structure// Technology audit and production reserve. – 2019. - № 1/1 (45). – p. 25-30.

13. Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects. Technical Review. - NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 105 DECEMBER 2013.

14. EN 12663-1:2010 “Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies - Part 1: Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons)”.

15. DIRECTIVE (EU) 2016/798 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 May 2016 on railway safety.

					6.273.180556.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		35