

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

КАКАРЕКА ДЕНИС ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 669.02/09(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ
ЗАГОТОВОК ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МЕТОДІВ
ВІДНОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ, ЩО ШВИДКО ЗНОШУЮТЬСЯ**

Спеціальність: 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Дніпро, 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Механічне обладнання заводів чорної металургії» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
ІЩЕНКО АНАТОЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», професор кафедри механічного обладнання заводів чорної металургії, м. Маріуполь.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
БЕЙГУЛ ОЛЕГ ОЛЕКСІЙОВИЧ,
Дніпровський державний технічний Університет, завідувач кафедри машинобудування, м. Кам'янське;

кандидат технічних наук
БАЮЛ КОСТЯНТИН ВАСИЛЬОВИЧ,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу технологічного обладнання і систем управління, м. Дніпро.

Захист відбудеться «__» _____ 20__ року о ____ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 Національної металургійної академії України (49600, Дніпро, проспект Гагаріна, 4).

E-mail: lydmila_kamkina@ukr.net.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національної металургійної академії України (49600, Дніпро, проспект Гагаріна, 4).

Автореферат розісланий «__» _____ 20__ р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03, д.т.н., проф.

Л. В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Металургійне обладнання працює в екстремальних умовах і тому до нього висувають найжорсткіші вимоги з надійності. Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) конвертерних цехів працюють під впливом підвищених температур та високої вологості повітря, що призводить до інтенсивної корозії опорних поверхонь металоконструкцій. Внаслідок огляду умов експлуатації МБЛЗ та проведеного аналізу відмов її вузлів набувають чинності, що більшість металоконструкцій схильні до корозії внаслідок негерметичності систем охолодження кристалізатора та неефективного паровидалення під час охолодження. Також встановлено, що шарнірні з'єднання в механізмі хитання схильні до зносу та руйнування внаслідок динамічного навантаження. Для рішення проблеми підвищення довговічності цих вузлів існують різноманітні засоби захисту та відновлення деталей, наприклад, наплавка із застосуванням спеціальних електродів, легування металів, термічна обробка, хіміко-термічна обробка, інгібування і деаерація середовища, захисні неорганічні покриття металевого і неметалевого складу. Вирішення завдань захисту та відновлення деталей металургійного обладнання є актуальним науковим напрямком протягом тривалого часу, який не втратив свою новизну в сучасних умовах. Про це свідчить значна кількість робіт, виконаних вітчизняними та закордонними дослідниками, а саме: Гребеник В.М., Цапко В.К., Тилкін М.А., Касаткін Н.Л., Плахтін В.Д., Седуш В.Я., Жиркін Ю.В., Семенова І.В., Родіонов М.А. та ін. Однак існуючі засоби захисту металоконструкцій та відновлення деталей обладнання не дозволяють у повній мірі використовувати їх в специфічних умовах роботи МБЛЗ.

Одним з перспективних рішень цього питання є вдосконалення технологій ремонту та застосування новітнього композитного матеріалу, який би одночасно відновлював та захищав поверхні металоконструкцій МБЛЗ від впливу різноманітних видів зносу. І тому розроблення та впровадження сучасних технологій підвищення експлуатаційної надійності МБЛЗ, яким присвячена ця дисертаційна робота, дозволяє класифікувати цей напрям, як актуальний.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», є складовою частиною НДР на тему: «Оцінка шляхів підвищення довговічності та міцності вузлів металургійного обладнання» (№ держреєстрації 0118U006935), «Розробка нових технологій комплексного відновлення металообробного обладнання підприємств оборонпрому та машинобудування за допомогою композитних матеріалів» (№ держреєстрації 011U002271), а також держбюджетної НДР на тему «Розробка нових технологій відновлення обладнання турбоагрегатів теплових електростанцій за допомогою композитних матеріалів» (№ держреєстрації 0115U000175).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є створення та вдосконалення науково-обґрунтованих методів та підходів до розробки

технічних рішень по відновленню працездатності основних вузлів та підвищення їх надійності.

Для досягнення поставленої у роботі мети визначені такі завдання дослідження:

– дослідження надійності роботи машини безперервної розливки сталі в умовах конвертерного цеху МК «Азовсталь»;

– дослідження механічних характеристик композитних матеріалів, які можуть бути застосовані для відновлення вузлів машин безперервного лиття заготовок:

а) дослідження можливості відновлення підшипникових вузлів композитними матеріалами в умовах дії ударних та вібраційних навантажень;

б) дослідження можливості відновлення герметичності опорних плитовин механізму хитання кристалізатора;

в) дослідження можливості захисту броні та металоконструкції зони вторинного охолодження МБЛЗ за допомогою композитного матеріалу;

– експериментальне визначення корозійної стійкості композитного ремонтного матеріалу;

– підвищення експлуатаційної надійності за рахунок розробки технології відновлення вузлів машини безперервного лиття заготовок з використанням композитного матеріалу.

Об'єкт дослідження – процеси відновлення вузлів механізмів МБЛЗ та дослідження надійності їх роботи.

Предмет дослідження – надійність експлуатації вузлів МБЛЗ та закономірності поведінки композитних матеріалів в умовах дії експлуатаційних навантажень, що виникають в цих вузлах.

Методи дослідження включають фізичне та експериментальне моделювання, визначення стійкості композитних матеріалів для відновлення обладнання, виконання математичного моделювання при визначенні параметрів стійкості, застосування методу кінцевих елементів при дослідженні ударних напружень на підшипниковій опорі, відновленій за допомогою композитного матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів:

– Вперше для підвищення міцності та надійності підшипникового вузла, а також зменшення навантажень здійснено його відновлення шляхом залучення матеріалу з питомою енергоємністю, що перевищує енергоємність сталевий поверхні та сприяє поліпшенню умов працюючих підшипників;

– Вперше при відновленні опорних поверхонь МБЛЗ визначені та залучені характеристики композитного матеріалу при розташуванні його у замкненому об'ємі та отримані залежності для визначення його межі міцності на стиснення від товщини відновленого шару композиту. Таким чином, отримані залежності дозволяють відновлювати деталі з мінімальною товщиною, що дозволяє значно знизити витрати матеріалу та досягти максимальних показників міцності;

– Вперше на основі теоретичних та експериментальних досліджень при відновленні опорної поверхні підшипникових вузлів, котрі працюють в умовах ударних та вібраційних навантажень, для оцінки коливань використано співвідношення двох послідовних амплітуд a_i та a_{i+1} , згідно енергетичного

балансу, що дозволяє розраховувати кількість енергії, яка витрачається системою за один цикл. На основі аналізу осцилограм відносно згасань навантажень встановлені величини коефіцієнтів розсіювання та показано підвищення цього коефіцієнту при відновленні підшипникової опори за допомогою нового методу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені методи, моделі та технології дають змогу у комплексі відновлювати працездатність обладнання та підвищувати надійність, зокрема відновлювати герметичність вузлів охолодження кристалізатора, відновлювати опорні поверхні підшипників та шарнірного з'єднання кристалізатора, захищати металоконструкції МБЛЗ від корозійних ушкоджень.

Вперше відновлена опорна поверхня під кристалізатором за допомогою композитного матеріалу та скорочено час відновлення до 48 годин.

Отримані теоретичні та практичні результати використовуються у навчальному процесі ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» на кафедрі «Механічне обладнання заводів чорної металургії» при вивченні дисципліни «Нові ремонтні матеріали та технології у металургії та машинобудуванні».

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Усі принципові теоретичні та експериментальні результати, що отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених автором самостійно. Особистий внесок здобувача в публікаціях зі співавторами полягає в наступному: застосування композитного матеріалу при ремонті різноманітних вузлів промислового обладнання [1]; виконані дослідження механічних властивостей композитних матеріалів при ударних навантаженнях [2]; проаналізовані існуючі способи відновлення металургійного обладнання [5,6]; розроблена теоретична модель визначення ударних напружень [4]; розроблені технології відновлення металургійного обладнання за допомогою композитного матеріалу [3,7,8,9,10].

Апробація результатів дисертації.

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на міжнародних науково-технічних конференціях «Університетська наука» (м. Маріуполь 2013-2018рр.), VII регіональній студентській науково-технічній конференції (м. Маріуполь), всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» 2017 (м. Дніпро), міжнародній науково-технічній конференції «Надійність та динаміка важких машин» RDHM-2018 (м. Дніпро), V міжнародній науково-практичній конференції «Наукові розробки, передові технології, інновації» 2019 (м. Київ), VI всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві СТПВ-2019» (м. Суми).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 8 наукових працях, 6 з них входять до наукометричних баз даних, одна з них включена до бази даних Scopus та 2 – у фахових виданнях, 4 патентах України, 6 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 169 сторінок, у тому числі 120 сторінок основного тексту, 23 таблиці, 87 рисунків, список використаних джерел з 112 найменувань на 11 сторінках, 6 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Дана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок здобувача, представлено дані про апробацію досліджень і про публікації у відкритих виданнях.

У **першому розділі** виконано літературний огляд існуючих методів відновлення металургійного обладнання. Існує велика кількість способів захисту та відновлення деталей металургійного обладнання, котрі розраховані на окремий тип зносу, але у разі стислого часу ремонту вони можуть бути неефективними.

В результаті літературного аналізу відомих джерел виявлено, що існує спосіб відновлення обладнання за допомогою нових ремонтних матеріалів, але, цей спосіб недостатньо вивчений. З аналізу матеріалів різноманітних фірм, зроблені висновки, що з умов міцності та теплостійкості слід надати перевагу композитним матеріалам фірми «Diamant».

Другий розділ присвячений аналізу відмов машин безперервного лиття заготовок в умовах конвертерного цеху МК «Азовсталь». Встановлено, що найбільш часто відбуваються зупинки машин через пориви сляба на криволінійній ділянці. В ході аналізу причин поривів виявлено ряд дефектів, котрі впливають на надійність машини. До них відносяться знос в шарнірах механізму хитання кристалізатора, перегрів роликів внаслідок порушення охолодження, замикання в лініях електропостачання через високу вологість, негерметичність системи охолодження кристалізатора.

Однією з проблем металоконструкції МБЛЗ є схильність до корозійного зносу, що призводить до зниження несучої здатності металоконструкції, а разом з тим, зниження надійності та підвищення аварійності машини. Базові деталі машини безперервного лиття заготовок схильні до корозії в основному через підвищені вологість та температуру, зокрема, це стосується зони охолодження сляба на криволінійній ділянці МБЛЗ. Дана ділянка негерметична і пар, який утворюється під час охолодження, осідає за межами криволінійної ділянки. Основні місця корозії показані на рис.1,2.



Рисунок 1 – Результат корозійного зносу опори поворотного стенда МБЛЗ



Рисунок 2 – Результат корозійного зносу броні струмків МБЛЗ

З цих рисунків видно, що деякі з несучих елементів металоконструкції схильні до корозійного зносу. Це призводить до відмови вузлів обладнання, спричиняє аварійну зупинку та приводить до фінансових втрат. За результатами аналізу частоти відмов обладнання побудована діаграма відмов вузлів МБЛЗ, яка приведена на рис.3.

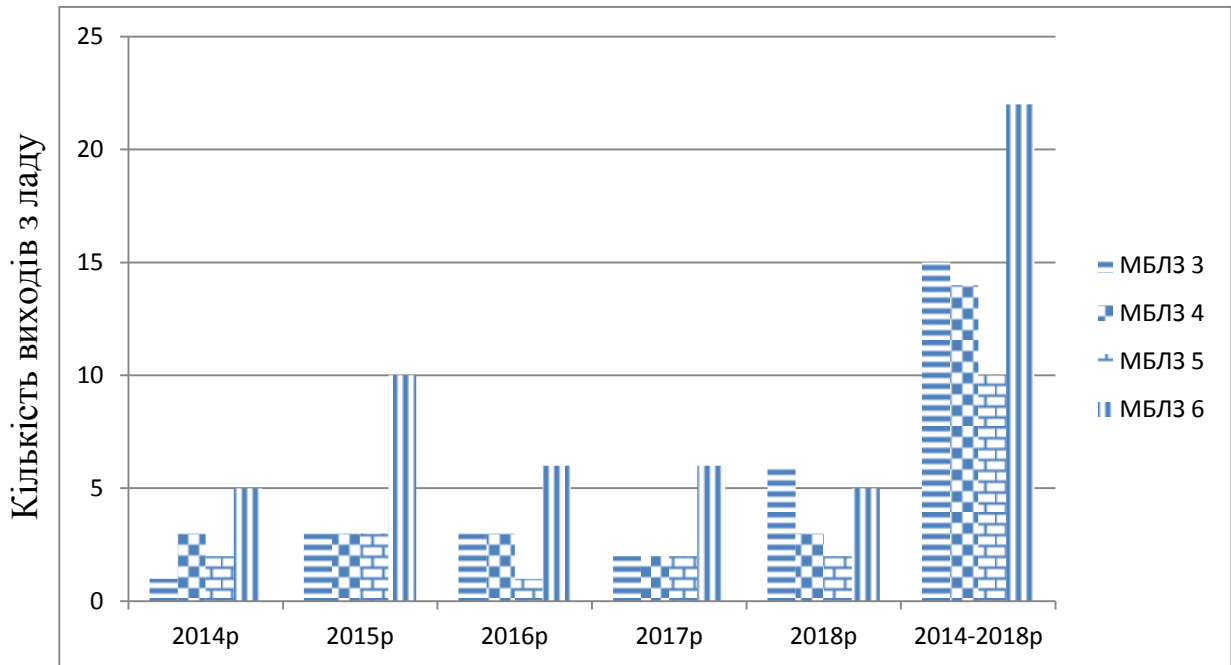


Рисунок 3 – Діаграма відмов МБЛЗ

Таким чином, МБЛЗ №6 частіше підлягає відмовам, аналіз причин відмов проводиться на підставі агрегатних журналів, які наведені у табл. 1.

В процесі роботи МБЛЗ канавки опорної плити піддаються корозійному зносу з боку охолоджуючих каналів, який спричиняє протікання води в місці роз'єму кристалізатора та опорної плити, що є неприпустимим для експлуатації машин. Зношені канавки до відновлення показані на рис. 4.



Рисунок 4 – Зношена канавка під ущільнення

Таблиця 1 – Причини відмов МБЛЗ №6

2014р	2015р	2016р	2017р	2018р
–Порив металорукава сервоциліндра, –Відмова двигуна на криволінійній ділянці –Знос кристалізатора –Знос тягнучих роликів –Відмова двигуна роликового сегменту вторинного охолодження –Знос манжети ущільнювача сервоциліндра –Відмова підшипників на тягнучій правлячій машини –Відмова циліндра на правлячій ділянці	– Відмова пром. вала приводного ролика тягнучої секції, – Порив рукава охолодження не приводного ролика. – Корозійний знос опорної поверхні кристалізатора. – Знос манжети сервоциліндрів механізму хитання. – Відмова роликів, та їх підшипникових вузлів.	–Знос осі механізму хитання кристалізатору та їх підшипникових вузлів, –Відмова двигуна роликів зони вторинного охолодження. –Порив нагнітаючої магістралі до сервоциліндрів –Відмова розподільника тягнучих роликів. –Знос внутрішньої поверхні кристалізатора –Відмова двигуна на криволінійній ділянці.	– Відмова роликів зони вторинного охолодження та їх підшипникових вузлів, – Знос не приводних роликів (тягнучої правлячої секції). – Відмова двигуна роликів зони вторинного охолодження – Знос манжет циліндрів притиску роликів. – Відмова газоріз. машини	– Відмова сервоциліндрів. – Відмова привідних роликів та їх підшипникових вузлів. – Відмова двигуна привідних роликів. – Порив нагнітаючої лінії сервоциліндрів. – Відмова системи подачі мастила. – Засмічення форсунок вторинного охолодження

Також зупинка МБЛЗ відбувається внаслідок відмов сегментів. Сегменти МБЛЗ відмовляють з різних причин:

- поламання роликів через перегрів та дію перемінних навантажень показанні на рис. 5;
- заклинювання підшипників, що приводить до заїдання ролика, перегріву та зносу опорних поверхонь підшипникового вузла;
- пориви системи охолодження;
- відмови формуючих циліндрів.

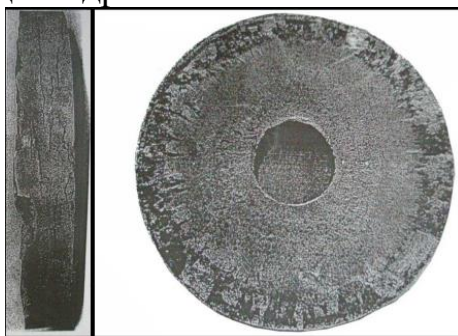


Рисунок 5 – Зріз зруйнованого ролика

Для механізму хитання кристалізатора в зазначений період зафіксовані наступні відмови і несправності: руйнування ексцентрикового вала і деталей ексцентрикової муфти привода, знос підшипників шарнірів та опор механізму; ослаблення різьбових з'єднань кріплення механізму хитання. Спільними для механізмів хитання кристалізатора є такі несправності та відмови: знос підшипників шарнірів та опор механізму хитання («розбивання» посадочних місць та збільшення радіальних зазорів підшипників), руйнування ексцентрикового вала привода. Методика визначення кількісних показників надійності зводиться до послідовного вирішення таких завдань: збір даних, встановлення закону відмов, ступеня близькості емпіричного і теоретичного розподілів, обчислення параметрів закону відмов і надійності виробу, який досліджується.

У підсумку імовірність безвідмовної роботи $p(t)$, щільність розподілу $f(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$ при нормальному законі розподілу знаходимо за формулами:

$$\rho(t) = \frac{1 + \Phi \cdot \left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma} \right)}{1 + \Phi \cdot \left(\frac{t_0}{\sigma} \right)} \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi \cdot \left(\frac{t_0}{\sigma} \right) \right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi \cdot \left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma} \right) \right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

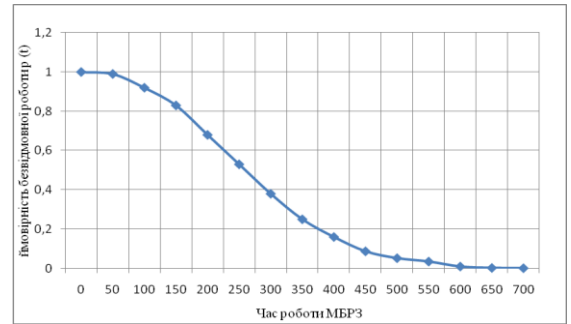
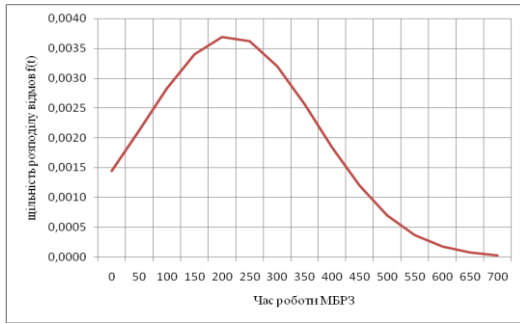
де t_i – дійсний варіаційний ряд;

t_0 – термін напрацювання на відмову, діб;

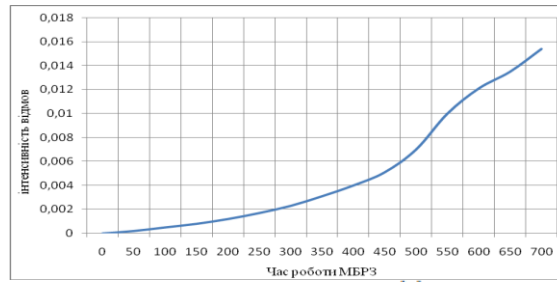
σ – середньоквадратичне відхилення;

Результати розрахунків показників надійності МБЛЗ наведені на рис. 6.

З графіків рис.6 витікає, що щільність розподілення відмов $f(t)$ у МБЛЗ збільшується в проміжку відпрацьованого часу від 150 до 300 діб. Ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ прагне до нуля через 700 відпрацьованих діб. Відповідно інтенсивність відмов зростає до 700 годин роботи. З чого виходить, що існуючі способи ремонту швидкозношуваних вузлів МБЛЗ є тимчасовим рішенням і для більш ефективного відновлення необхідний пошук нових відновлювальних технологій.



а) щільність розподілу відмов $f(t)$ МБЛЗ б) ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ МБЛЗ



в) інтенсивність відмов $\lambda(t)$ МБЛЗ

Рисунок 6 – Показники надійності МБЛЗ №6

У **третьому розділі** виконанні дослідження можливості використання композитних матеріалів для умов роботи вузлів МБЛЗ, зокрема визначення їх ударної міцності, вібраційної міцності, адгезійної міцності та корозійної стійкості матеріалів. Розроблена методика дослідження композитних матеріалів та визначені експериментальним шляхом механічні характеристики композитного матеріалу, що застосовується для відновлення металургійного обладнання. В роботі дослідженні композитні матеріали Multimetall Stahl 1018 та вітчизняний композитний матеріал ДК-2 на поліуретановій основі.

Результати експериментів з визначення статичної міцності виконані на зразках різної товщини та навантаження виконуються на розривній машині РМ 20, отримані результати відображені на рис.7 та рис.8. При цьому зразки використовуються у вільному стані та у металевому контейнері, як зображено на рис.9.

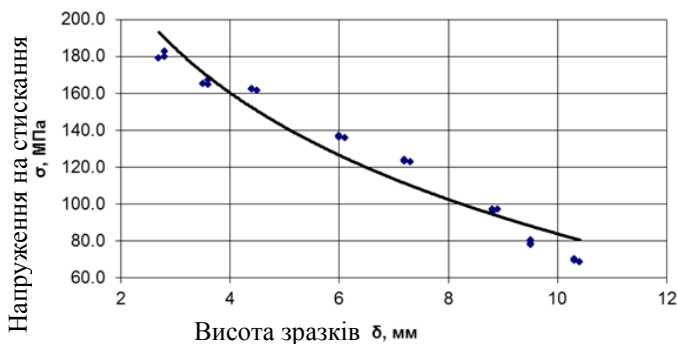


Рисунок 7 – Графік залежності граничного напруження від висоти зразків для композитного матеріалу у вільному стані

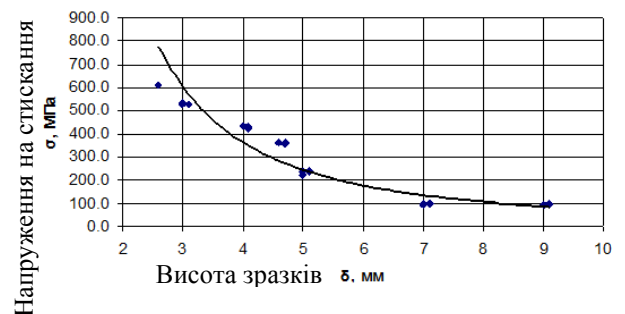
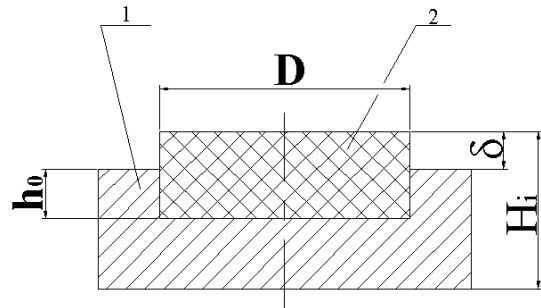


Рисунок 8 – Графік залежності граничного напруження від висоти зразків для композитного матеріалу в замкненому стані.



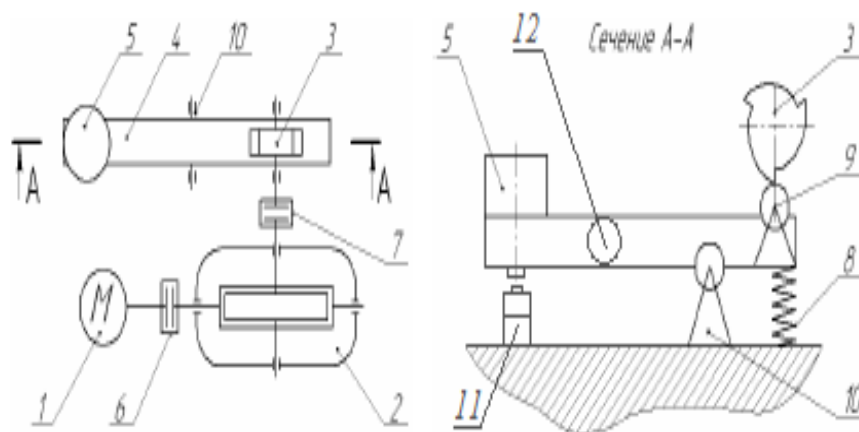
1 - корпус; 2 - металополімер

Рисунок 9 – Схема випробувального зразка

Встановлено, що при збільшенні товщини зразка з 2 мм до 4 мм напруження зменшуються на 30%, а при збільшенні висоти зразка з 2,5 мм до 9,1 мм несуча здатність композитного матеріалу знижується в 6,4 рази. При висоті зразка понад 4-5 мм несуча здатність значно зменшується. А розміщення зразка у металевому контейнері дозволяє підвищувати несучу здатність зразків з 160МПа до 360МПа.

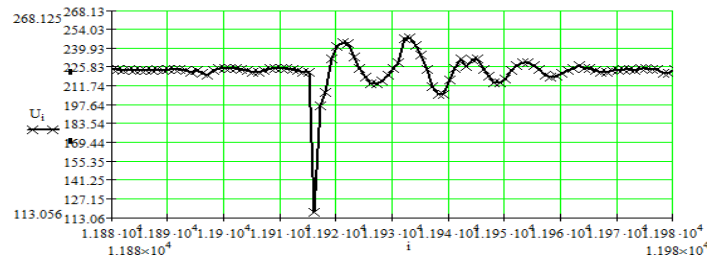
Експерименти по вібраційному навантаженню композитних матеріалів виконувались на універсальній випробувальній машині типу ГРМ-1. Несуча здатність композитного матеріалу значно перевищує можливі експлуатаційні значення вібраційного і теплового навантаження, які можуть мати місце при роботі вузлів МБЛЗ.

Експериментальне дослідження ударних навантажень виконувалось на спеціальній установці, розробленій на кафедрі механічного обладнання заводів чорної металургії (МОЗЧМ) «Приазовського державного технічного університету», яка показана на рис. 10.

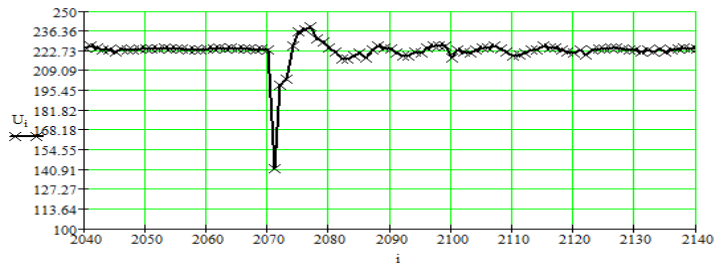


1 – електродвигун; 2 – черв'ячний редуктор; 3 – профільний кулачок; 4 – балка; 5 – вантаж; 6 – моторна муфта; 7 – муфта МУВП; 8 – пружина; 9 – ролик; 10 – опора; 11 – досліджувані зразки; 12 – акселерометр.

Рисунок 10 – Кінематична схема ударної установки.



а)



б)

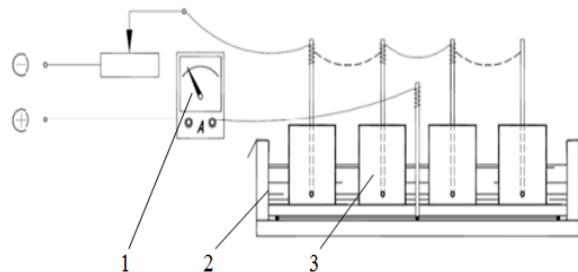
а – удар об сталеву поверхню;

б – удар об шар композитного матеріалу

Рисунок 11 – Типова осцилограма процесу удару

Розроблена методика та виконане дослідження ударних навантажень, дозволяють визначати закономірності цих навантажень при дії на опорну поверхню підшипників МБЛЗ, (рис. 11). Згідно отриманих результатів можна зробити висновок, що полімерний матеріал демпфує ударне навантаження порівняно з металом та скорочує час затухання ударних коливань на 48%, що характеризує демпфуючі властивості матеріалу, які дозволяють поглинати енергію удару.

Для дослідження та розробки технології захисту металу створена лабораторна установка для визначення інтенсивності електрохімічної корозії, оскільки вона є найбільш інтенсивною в порівнянні з іншими видами корозії (рис. 12). Зразки, які використовуються в експерименті виконані у трьох варіантах – металеві незахищені, частково захищені та повністю захищені композитним матеріалом.



1– джерело постійного струму; 2– хімічно стійка ємність; 3– зразки.

Рисунок 12 – Схема установки для випробування на корозійний знос

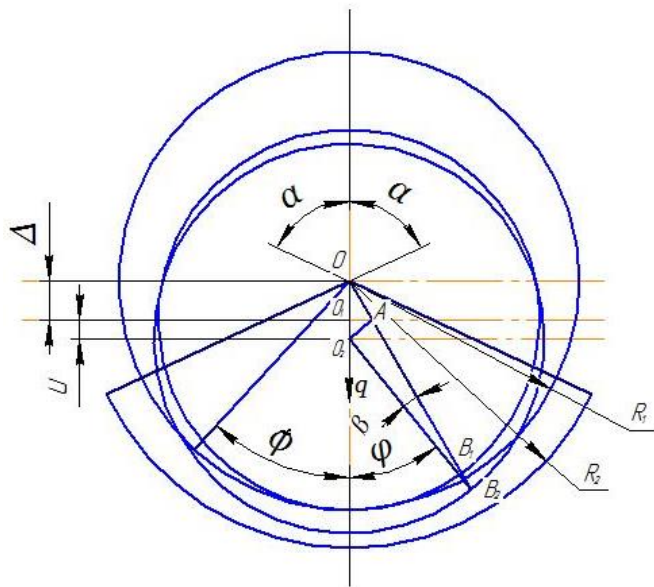
Результати дослідження показують що композитний матеріал може повністю захистити металеві конструкції МБЛЗ від корозії.

У **четвертому розділі** проаналізовані існуючі методики розрахунку напружень в опорних поверхнях під підшипниками, виконані математичне і комп'ютерне моделювання процесу ударного навантаження опорних поверхонь відновлених за допомогою полімерного матеріалу. Виконане порівняння результатів комп'ютерного моделювання та теоретичних розрахунків.

Порівняння теоретичного моделювання та експериментальних результатів підтверджує можливість використання інженерної методики розрахунку напруженого стану композитного матеріалу для подальшого використання при відновленні опорних поверхонь підшипникових вузлів.

Метою даної роботи є аналіз навантаження опор підшипникових вузлів, відновлених за допомогою композитних матеріалів, розробка інженерної методики оцінки напруженого стану шару металополімерного матеріалу, котрий використовувався при відновленні підшипникових опор, на прикладі полімерного матеріалу Multimetal сталь 1018.

На рис. 13 зображена розрахункова схема переміщення підшипника на податливому полімерному матеріалі.



d – зовнішній діаметр підшипника; R_1 та R_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси полімеризованого матеріалу; Δ – установочний радіальний зазор; u – радіальна деформація полімерного матеріалу в довільній точці; ρ – радіус-вектор точки; φ – полярний кут точки. O – центр циліндричного отвору підшипника; O_1 – центр кола зовнішнього кільця розвантаженого підшипника; O_2 – центр кола зовнішнього кільця навантаженого підшипника; α – кут між за фіксованими стопорними планками.

Рисунок 13 – Розрахункова схема переміщення підшипника на податливому металополімерному матеріалі.

Для плосконапруженого стану відносно радіальне і тангенціальне подовження описуються наступними диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi) &= \frac{d}{d\rho} \cdot u(\rho, \varphi); \\ \varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi) &= \frac{u(\rho, \varphi)}{\rho}.\end{aligned}\quad (4)$$

Згідно із законом Гука для плоско-напруженого стану:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho}(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi) + \nu \cdot \varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi)] \\ \sigma_{\varphi}(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi) + \nu \cdot \varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi)]\end{aligned}\quad (5)$$

де E – модуль пружності металополімерного матеріалу;
 ν – коефіцієнт Пуассона або коефіцієнт поперечної деформації.

Записуючи умову рівноваги підшипника, отримуємо формулу для розрахунку погонного навантаження на одиницю ширини підшипникового вузла:

$$q = -2 \cdot \int_0^{\phi} \sigma_{\rho}(R_1, \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot R_1 d\varphi. \quad (6)$$

Дана методика використовується в інженерних розрахунках, якщо потрібно оцінити напружений стан відновленої підшипникової опори при навантаженні, знаючи значення деформації осі або вала в напрямку дії сили.

Завдяки отриманим даним побудований 3-D аналог деталі, яка досліджується зображена на рис. 14. Виконані експерименти з порівнянням розподілу напружень при ударних навантаженнях по поверхні підшипникової опори. На рис. 15 зображений розподіл напружень по поверхні підшипникової опори.

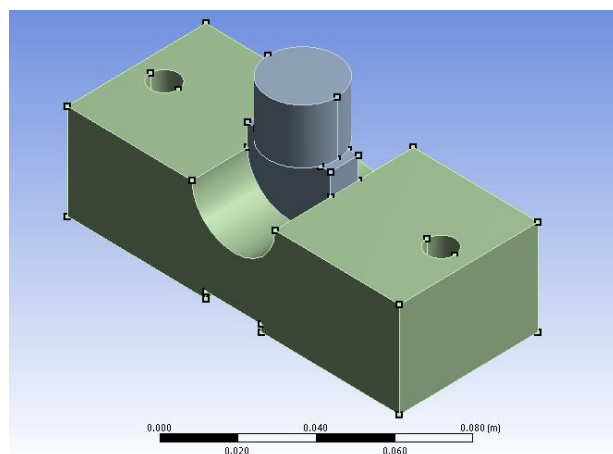
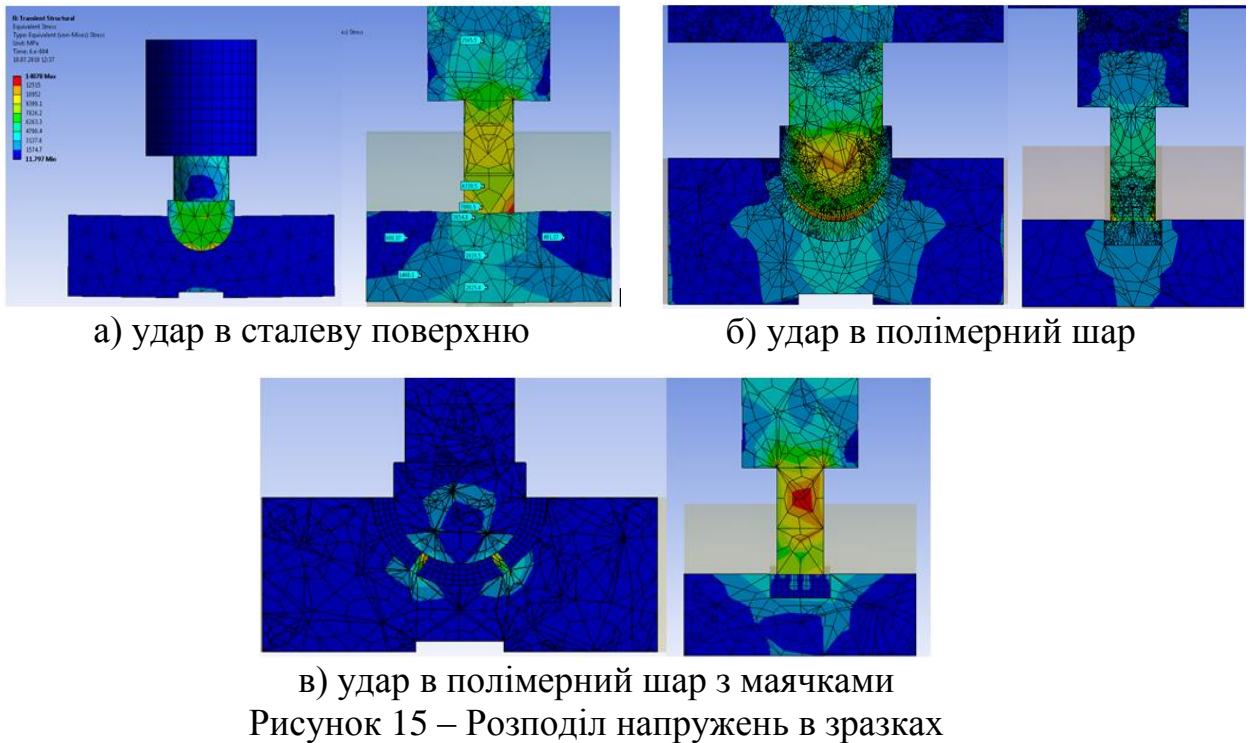


Рисунок 14 – 3-D аналог опорної поверхні



Для визначення напружень при експериментальному дослідженні виконаний розрахунок, котрий дозволяє виконувати конвертацію ударних прискорень в напруження на поверхні полімерного матеріалу. Конвертація виконується за допомогою формули:

$$\sigma = \frac{m \cdot A}{(\pi \cdot d \cdot h) / 2} \quad (12)$$

де, m – маса ударяемого вантажу, кг;

A – максимальні ударні прискорення, m/s^2 ;

d – діаметр зовнішнього кільця, м;

h – ширина зовнішнього кільця, м.

Експериментальні результати та результати, отримані теоретичним шляхом за формулою (6), дані різняться між собою не більше, ніж на 20%. Результати порівняння зображені на рис. 16.

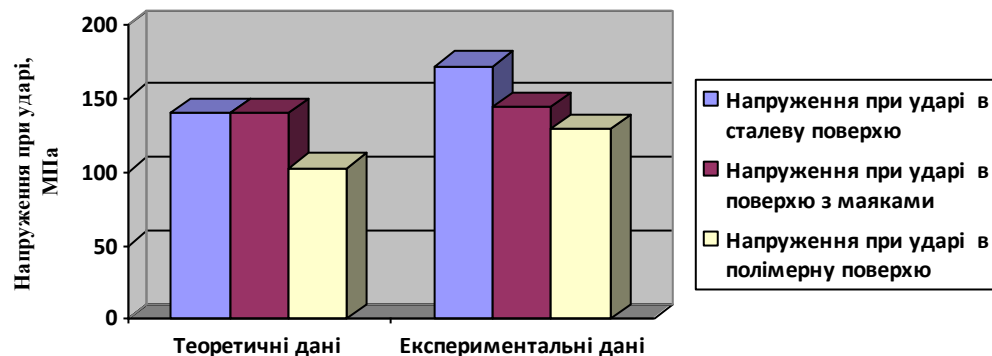


Рисунок 16 – Порівняння теоретичного та експериментального досліджень

Задовільна схожість результатів теоретичного аналізу динамічного навантаження відновленої підшипникової опори та експериментального дослідження, дозволяє стверджувати, що запропонована методика визначення напружень, що виникають в шарі полімеру при прикладенні ударного навантаження, може бути використана в практичних розрахунках.

Міцність підшипникового вузла, що зазнає ударне навантаження, забезпечується в тому випадку, якщо потенційна енергія пружної деформації не менша, ніж енергія удару. Тому однією з основних характеристик композиту або сталі, як амортизатора, є його енергоємність. В табл. 2 наведені результати розрахунку енергоємності композитного матеріалу у порівнянні зі сталлю.

Таблиця 2 – Енергоємність пружних елементів

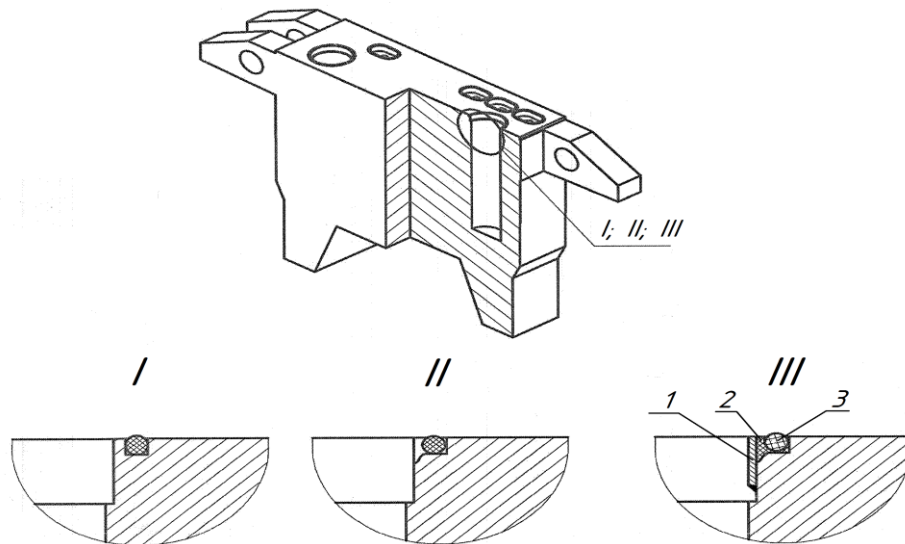
Матеріал	Модуль пружності E, МПа	Максимальне напруження σ , МПа	Питома енергоємність матеріалу	Питома енергоємність елемента
			$Pv_{\text{мат}}$, МПа	Pv , МПа
Сталь	$2,15 \cdot 10^5$	470	1,02	0,32
Композит Мультиметал	$1,4 \cdot 10^4$	160	1,82	0,58

Таким чином, питома енергоємність композитного матеріалу при використанні його у відновленні підшипникового вузла дозволяє значно зменшити напруження на зовнішньому кільці підшипника внаслідок більш високої енергоємності і, тим самим, збільшити термін експлуатації підшипників і підшипникових вузлів в умовах дії ударних навантажень. Коефіцієнт розсіювання енергії композиту ψ_k більший, ніж сталі $\psi_{ст}$ в 1,3 рази. Тому, за рахунок застосування композитного матеріалу є можливість інтенсивніше гасити коливання, які виникають при ударних навантаженнях і знижувати напруження на зовнішньому кільці підшипника. Це може суттєво підвищити надійність підшипникового вузла і всієї машини безперервного лиття заготовок.

Таким чином, використання композиту дозволяє значно покращувати умови експлуатації підшипникових вузлів, оскільки питома енергоємність гнізда відновленого за допомогою композитного матеріалу, в 1,8 рази вища ніж сталюого гнізда, а коефіцієнт дисипації відновленого вище у 1,3 рази.

У **п'ятому розділі**, базуючись на результатах виконаних в роботі досліджень, приведені розроблені технології відновлення та захисту вузлів машини безперервного лиття заготовок за допомогою композитного матеріалу. На розроблені технології отримані патенти на корисні моделі, які запропоновані для впровадження на металургійних підприємствах.

Розроблена технологія відновлення герметичності опорної поверхні під кристалізатором за допомогою композитного матеріалу в умовах конвертерного цеху комбінату МК «Азовсталь», як це показано на рис. 17. Ця технологія впроваджена у виробництві на МБЛЗ №6 на МК «Азовсталь».



I – канавка під ущільнення в початковому положенні; II – канавка під ущільнення пошкоджена корозійним зносом; III – канавка під ущільнення відновлена за допомогою композитного матеріалу; 1 – стальна пластина; 2 – композитний матеріал; 3 – ущільнювальне кільце.

Рисунок 17 – Відновлення опорної поверхні під кристалізатором

Розроблена технологія відновлення опорної поверхні гнізда підшипника, яка впроваджена у виробництві, крім того, розроблена технологія захисту металоконструкцій МБЛЗ від корозії.

Основні розробки дисертаційної роботи у вигляді результатів дослідження ударних навантажень і технології відновлення опорних поверхонь під підшипниками впроваджені у навчальний процес ДВНЗ «ПДТУ».

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково - дослідною роботою, в якій розв'язана актуальна наукова задача, яка має важливе практичне значення для розробки технології відновлення вузлів МБЛЗ.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Встановлено, що відновлення окремих деталей та вузлів машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) за допомогою полімерних матеріалів є технічно доцільним, оскільки дозволяє скоротити час ремонту, сприяє зниженню вартості відновлювальних робіт та скорочує простій обладнання, що в умовах безперервної технології процесу виготовлення сталі позитивно впливає на стабільність технологічного процесу. При цьому характеристики відновлювальних композитних матеріалів, вказані їх виробниками, є недостатніми для розробки ефективних технологій відновлення деталей та вузлів МБЛЗ.

2. Аналіз надійності вузлів МБЛЗ, виконаний за період з 2014р по 2018р на 4 машинах МК «Азовсталь», дозволяє усвідомлювати, що існуючі способи відновлення швидкозношуваних деталей та вузлів МБЛЗ дозволяють досягати не більше 700 діб їх безвідмовної роботи, що вказує на необхідність

пошуку методів підвищення ресурсу експлуатації даного типу обладнання за допомогою розробки нових технологій ремонту та відновлення з використанням композитних матеріалів.

3. Внаслідок виконаних експериментів з використанням композитного матеріалу Multimetall Stall 1018 в умовах його роботи у вузлах підшипників кочення встановлено, що композитний матеріал може працювати в умовах, коли напруження стискання складають 230МПа, а це в 1,5-1,7 рази вище, ніж задані, котрі приведені у характеристиках самого матеріалу. Отриманні дані, котрі вказують, що композитний матеріал може поглинати енергію удару на 26% більшу порівняно з відновленою поверхнею за допомогою наплавки.

4. Комп'ютерне моделювання процесу ударних навантажень на композитний матеріал Multimetall Stall 1018 в різних варіаціях його застосування дозволяє визначати напруження на поверхні композитного матеріалу. За допомогою комп'ютерного моделювання отримані значення напружень та переміщень у шарі полімеру. Внаслідок порівняння результатів, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання, які різняться не більш, ніж на 20%, і тому можна рекомендувати запропоновану методику розрахунків цих напружень при прийнятті рішень відносно доцільності відновлення опорних поверхонь підшипникових вузлів кочення. Встановлено, що питома енергоємність композитного матеріалу при використанні його для відновлення підшипникових вузлів дозволяє констатувати, що використання композиту дозволяє значно покращувати умови експлуатації підшипникових вузлів, оскільки питома енергоємність гнізда, відновленого за допомогою композитного матеріалу, в 1,8 рази вища, ніж сталюого гнізда, а коефіцієнт дисипації відновленого вищий у 1,3 рази.

5. Розроблені ефективні технології відновлення обладнання МБЛЗ, які базуються на отриманих даних щодо характеристик композитних матеріалів. Ці технології дозволяють в термін поточного ремонту (48 годин) відновляти працездатність механізму хитання кристалізатора за рахунок відновлення герметичності водопостачальних каналів кристалізатора на опорній поверхні. Крім того, запропонований метод відновлення підшипникових опор, який дозволяє скоротити діючі навантаження на підшипники та виконувати ці роботи у термін поточного ремонту. Для підвищення терміну служби металоконструкцій МБЛЗ запропоновано спосіб захисту композитним матеріалом, що дозволяє виключати корозійний знос металоконструкцій та підвищувати термін їх придатності.

Основні положення дисертації надруковані у наступних наукових працях:

Статті, що входять до наукометричних баз

1. Ищенко А.А. Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами /А.А.Ищенко, В.М. Кравченко, Е.В.Дашко, Д.Л. Какарека // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединение СНГ. – 2017г. – Т 60, Вып. №2. – С. 159-166. (EBSCO; Scopus).
2. Ищенко А.А Исследование механических свойств композитного материала в условиях действия ударных нагрузок / А.А. Ищенко, Д.Л. Какарека. //

- «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2017. – №5. – С. 80-84. (Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, ВАК).
3. Ishenko Anatoliy Mechanical properties of composite materials under conditions of impact loads action / Anatoliy Ishenko, Denys Kakareka // Metallurgical and Mining Industry.– 2017. – №8. – С.8-12. (Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, Ulrichs WEB, ВАК).
 4. Ищенко А.А Исследования несущей способности композитного материала при действии ударных нагрузок / Ищенко А.А., Рассохин Д.А., Какарека Д.Л. // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2018г. – №7. – С. 56-61. (Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, ВАК).
 5. Ishenko Anatoliy The current experience of applying the composites in practicing the industrial equipment maintenance / Anatoliy Ishenko, Dmitry Rassokhin, Denys Kakareka// Metallurgical and Mining Industry. – 2018г. –№2 – С.47-49. (Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, Ulrichs WEB, ВАК).
 6. Ищенко А.А Накопленный опыт применения композитов в практике ремонта промышленного оборудования / А. А. Ищенко, Д. А. Рассохин, Д. Л. Какарека // «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2018г. –№5 – С.77-80.(Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, ВАК).

Статті, що включені до переліку тільки фахових видань

7. Ищенко А.А. Анализ существующих способов защиты от коррозионных повреждений металлоконструкций машины непрерывного литья заготовок / А. А. Ищенко, Д. Л. Какарека // Міжвузівський тематичний збірник наукових праць «Наука та виробництво». – 2017г. – №17 – С.24– 29. (ВАК).
8. Ищенко А.А Анализ современных методов восстановления промышленного оборудования / Ищенко А.А., Рассохин Д.А., Какарека Д.Л. // «Вісник приазовського державного технічного університету». – 2018г. – №36 – С.181-186. (ВАК).

Публікації апробаційного характеру

9. Исследование механических свойств композитного материала в условиях действия ударных нагрузок / А. А. Ищенко, Д. Л. Какарека. // Всеукраїнського наукового-технічної конференції «Механіка машин-основна складова прикладної механіки» частина 1 Дніпро-2017 – С.82.
10. Восстановление работоспособности опорной плиты под кристаллизатором при помощи полимерного материала / А.А. Ищенко, Д.Л. Какарека // Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2018» Мариуполь –С.62.
11. Определение адгезионных характеристик полимерных материалов / Д,Л Какарека // VII регіональна студентська науково-технічна конференція том 1 Маріуполь 2013 –С.229.
12. Применение композитного материала при восстановлении металлургического оборудования / А.А. Ищенко, Д.Л. Какарека // 5 международная научно-практическая конференция «Наукові розробки, передові технології, інновації» тез. докл. (Прага, 6-8 травня-2019 г.). – С. 319-321.

13. Визначення адгезійної міцності композитного матеріалу, який використовують для ремонту металургійного обладнання / А.О. Іщенко, Д.Л. Какарека // 6 Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві» тез. докл. (Суми, 16-19 квітня-2019 г.). – С. 133.

Патенти

14. Патент №86359 Україна, МПК В23Р 6/00. Спосіб відновлення поверхонь тертя полімерним матеріалом / Ю.О. Красноштан; А.О. Іщенко, О.В. Радіоненко, Д.Л. Какарека. Заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» – № u201308535; Заявл. 08.07.2013; опубл. 25.12.2013. Бюл. № 24/2013– С4.
15. Патент №123128 Україна, МПК С23С 22/28 (2006.01), С23С 22/73(2006.01) Спосіб відновлення опорної поверхні з отвором / А.О. Іщенко, Д.Л. Какарека, Заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» – № u201708842; Заявл. 04.09.2017; опубл. 12.02.2018. Бюл. № 3/2018 – С5.
16. Патент №130007 Україна, МПК (2006): В05D 3/12 (2006.01), В21В 13/00 Спосіб монтажу захисних планок клітей прокатних станів / А.О. Іщенко, Є.М. Кара, Д.Л. Какарека. Заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» – № u201804785; Заявл. 02.05.2018; опубл. 26.11.2018. Бюл. № 22/2018– С4.
17. Патент №130011 Україна, МПК (2006): F16С 33/00, В05D 1/26 (2006.01), В23Р 9/02 (2006.01), В23Р 6/00. Спосіб відновлення підшипникового гнізда полімерними матеріалами / А.О. Іщенко, П.С. Танасієнко, Д.О. Рассохін, Д.Л. Какарека. Заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» – № u201804797; Заявл. 02.05.2018; опубл. 26.11.2018. Бюл. № 22/2018 – С6.

АНОТАЦІЯ

Какарека Д.Л. Підвищення надійності машин безперервного лиття заготовок шляхом застосування нових методів відмовлення вузлів, що швидко зношуються – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва». – Національна металургійна академія України, Маріуполь, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі, яка полягає у підвищенні надійності та ефективності роботи машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) сталеплавильного комплексу шляхом відновлення і захисту її деталей від комплексного впливу корозійного зносу, вібраційного та динамічного навантаження за допомогою композитного матеріалу.

В роботі були виконані дослідження надійності МБЛЗ та проаналізовані причини виходу з ладу вузлів. Для рішення проблем МБЛЗ були виконані дослідження механічних властивостей композитного матеріалу, котрий застосовується для відновлення обладнання. Отримані результати дали можливість визначити поведінку композитного матеріалу при відновленні вузлів МБЛЗ, це дозволило розробити технологію відновлення елементів МБДЗ.

Результати роботи у вигляді методів, моделі і технології впроваджені у навчальному процесі ДВНЗ «ПДТУ».

Ключові слова: надійність, МБЛЗ, композитний матеріал, технологія відновлення, навантаження, корозія.

SUMMARY

Kakareka D.L. Improving the reliability of continuous billet casting machines through the use of new fast-wear failure methods - Qualification of scientific knowledge as a manuscript.

Dissertation on the scientific stage of the candidate of technical sciences for specialty 05.05.08 - "Machines for metal-based virobnitstva". - National Metallurgy Academy of Ukraine, Mariupol, 2019.

Dissertation in the robot boules viconos dosdidzhenny nadiynost continuous casting machine that proanalizovi cause vizdu zladu vuzliv. For solving the problems of the continuous casting machine, they were the victors of the complete composition of the mechanical powers of the composite material, which was staggered for vidovlennya possession. Otrimani results gave mozhn vstnitnitsvnit behavior of the composite material at the time of higher education institutions allowed the development of technology continuous casting machine.

The results of the work are in the field of methods, models and technologies in the advanced training process of DVNZ "PDTU". Rozblelen metodi vidnovlennya hermetic water supply channels of the baseplate by the crystallizer of Azovstal Iron & Steel Works.

Key words: nadiynist, MBLZ, composite material, technology vidnovlennya, navantazhennya, koroziya.