

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

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 металургійного виробництва»

133 Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д.Л. Какарека

Науковий керівник – Іщенко Анатолій Олексійович, д.т.н, професор

Маріуполь, 2020

АНОТАЦІЯ

Какарека Д.Л. Підвищення надійності машин безперервного лиття заготовок – 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, Дніпро, 2020.

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 та динамічного навантаження за допомогою композитного матеріалу.

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 було виявлено, що існує спосіб відновлення обладнання за допомогою нових ремонтних матеріалів, однак, цей спосіб недостатньо вивчений. Виконано аналіз матеріалів різноманітних фірм, із якого зроблені висновки, що виходячи з умов міцності та теплостійкості слід надати перевагу композитним матеріалам фірми «Diamant».

Другий розділ присвячений аналізу виходу з ладу машин безперервного лиття заготовок в умовах конверторного цеху МК «Азовсталь». Встановлено, що найбільш часто відбувається зупинка машин через пориви слябу на криволінійній ділянці. В ході аналізу причин поривів, було виявлено ряд дефектів, котрі впливають на надійність машини. До них відносяться: знос в шарнірах механізму хитання кристалізатору, перегрів роликів в наслідок порушення охолодження, замикання в лініях електропостачання через високу вологість, негерметичність систем охолодження кристалізатора.

Виконано аналіз причин поломок МБЛЗ, і зроблено висновок, що існуючий спосіб ремонту опорної плити за допомоги наплавки є тимчасовим рішенням і для більш ефективного відновлення необхідний комплексний підхід.

У **третьому розділі** були проаналізовані методи дослідження матеріалів для визначення ударної міцності, вібраційної міцності, адгезійної міцності та корозійної стійкості матеріалів. Було розроблено спеціальне обладнання, котре дозволяє виконувати дослідження механічних властивостей композитних матеріалів на полімерній основі. Розроблена методика досліджень композитних матеріалів та визначені експериментальним шляхом механічні характеристики композитного матеріалу на полімерній основі, що застосовується для відновлення металургійного обладнання.

У **четвертому розділі** Проаналізовані існуючі методики розрахунку напружень в опорних поверхнях під підшипниками кочення, виконано математичне і комп'ютерне моделювання процесу ударного навантаження опорних поверхонь відновлених за допомогою композитного матеріалу. Виконано порівняння комп'ютерного моделювання та теоретичного розрахунку. Були зіставлені отриманні результати теоретичних та комп'ютерного моделювання з експериментальними значеннями. Це дозволило отримати аналітичну залежність експериментального та математичного моделювання ударних навантажень.

У **п'ятому розділі** приведенні розробленні технології відновлення та захисту вузлів машини безперервного лиття заготовок, за допомогою композитного матеріалу. На розроблені технології отриманні патенти на корисні моделі та запропоновані для впровадження на металургійних підприємствах.

Також, наведені результати практичного використання результатів дисертаційної роботи, при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт, які виконувались в умовах конверторного цеху комбінату МК «Азовсталь». До них

відносяться відновлення герметичності опорної поверхні під кристалізатором за допомогою композитного матеріалу.

Результати роботи у вигляді методів визначення механічних характеристик композитного матеріалу та технологій відновлення опорних поверхонь під підшипниками впроваджені у навчальний процес ДВНЗ «ПДТУ».

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

SUMMARY

Kakareka D.L. Improvement of reliability of machines without stopping casting of preforms. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.05.08 - "Machines for metallurgical production". - National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem, which consists in increasing the reliability and efficiency of the machine for the casting of the billets of the steelmaking complex by restoring and protecting its parts from the complex influence of corrosion wear and dynamic loading using composite material.

In the first section a literary search of existing methods for the restoration of metallurgical equipment is carried out. There are a number of ways to protect and restore parts of metallurgical equipment, which are designed for a specific type of wear, but in the case of a shorter repair time, they may be ineffective.

The analysis of literary and other types of information sources indicates that existing methods of protection and restoration of worn surfaces are inefficient and rather laborious.

The second section is devoted to the analysis of the failure of the main of the non-stop casting of blanks conditions in the conditions of gas works of Azovstal Iron

& Steel Works. Machines for endless casting of billets are used in the technology of casting steel, the quantity of which varies depending on the degree of preparation of raw materials for melting.

In the third section, the experimental way was to determine the mechanical characteristics of the composite material used for the restoration of metallurgical equipment. On the basis of experimental and theoretical studies, the technology of the use of composite material protected by a patent for a utility model was developed.

In the fourth section mathematical and computer simulation of the shock loading process of the supporting surfaces reconstructed with the help of a polymer material is executed.

The theoretical analysis of the shock loading process is performed in the work. The proposed mathematical model is proposed. This allowed us to obtain the analytical dependence of experimental and mathematical simulation of shock loads.

The results of the work in the form of a study of shock loads and technology for the restoration of supporting surfaces under bearings have been introduced into the educational process of the State Pedagogical University "PDTU".

In the fifth section, the technology of restoration and protection of machine tips for endless casting of blanks, with the help of composite material is given.

At the development of technologies, patents for utility models have been obtained and are proposed for implementation at metallurgical enterprises.

In the sixth section, the welcomed works were carried out at the metallurgical enterprises.

Keywords: reliability, MNLZ, composite material, technology of restoration

Основні положення дисертації надруковані у наступних наукових працях:

Статті у виданнях, що включені до міжнародних 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 // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ «Энергетика» Том 60 №2 2017. Минск , Беларусь - 159с. (EBSCO; РИНЦ ; 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» Выпуск №5 Днепр 2017.- с.80 - 84- (Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, BAK).
3. Ishenko Anatoliy Mechanical propertis of composite materials under conditions of impact loads action / Anatoliy Ishenko, Denys Kakareka // Metallurgical and Mining Industry №8 - 2017. с.8 - 12 (Index Copernicus, eLibrery, Scientific Indexing Services, Ulrichs WEB, BAK).
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» Выпуск №7 Днепр 2018.- с. 56 - 61- (Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, BAK).
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 №2 -2018. с.47-49 (Index Copernicus, eLibrery, Scientific Indexing Services, Ulrichs WEB, BAK).
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» Выпуск №5 Днепр 2018.- с.77-80- (Index Copernicus, Ulrichs Periodicals Directory, BAK).

Статті, що включені до переліку 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» Випуск №17 Маріуполь 2017. -24с.- (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» Випуск №36 Маріуполь 2018. С.181-186- (ВАК).

Публікації апробаційного характеру

9. Ищенко А.А. 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 – 82с.
10. Ищенко А.А. Восстановление работоспособности опорной плиты под кристаллизатором при помощи полимерного материала / А.А. Ищенко, Д.Л. Какарека // международная научно техническая конференция «Университетская наука 2018» Маріуполь -62с.
11. Какарека Д.Л. Определение адгезионных характеристик полимерных материалов / Д.Л. Какарека // VII регіональна студентська науково технічна конференція том 1 Маріуполь 2013 -229 с.
12. Ищенко А.А. 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.Ищенко А.О. Визначення адгезійної міцності композитного матеріалу, який використовують для ремонту металургійного обладнання / А.О. Ищенко, 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 / Красноштан Ю.О., Іщенко А.О., Радіоненко О.В., Какарека Д.Л. // Патент заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» - Патент опубліковано 25.12.2013, бюл. № 24/2013 - 4с.
15. Патент 123128 Україна, МПК: С23С 22/28 (2006.01), С23С 22/73(2006.01) Спосіб відновлення опорної поверхні з отвором / Іщенко А.О., Какарека Д.Л., // Патент заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» - Патент опубліковано 12.02.2018, бюл. № 3/2018-5с.
16. Патент 130007 Україна, МПК (2006): В05D 3/12 (2006.01), В21В 13/00 Спосіб монтажу захисних планок клітей прокатних станів / Іщенко А.О., Кара Є.М., Какарека Д.Л. // Патент заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» - Патент опубліковано 26.11.2018, бюл. № 22/2018-4с.
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 / Іщенко А.О., Танасієнко П.С., Рассохін Д.О., Какарека Д.Л. // Патент заявник і власник ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» - Патент опубліковано 26.11.2018, бюл. № 22/2018-6с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І СПОСОБИ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	17
1.1 Існуючі методи і способи відновлення деталей металургійного обладнання	17
1.2 Висновки.....	29
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК	31
2.1 Аналіз виходу з ладу основних вузлів машини безперервного лиття заготовок в умовах конвертерного цеху ММК «Азовсталь».....	32
2.2 Визначення ймовірності безвідмовної роботи МБЛЗ	42
2.3 Висновки.....	51
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	54
3.1 Алгоритм дисертаційної роботи.....	54
3.2 Обладнання та методи дослідження механічних властивостей композитних матеріалів для відновлення деталей металургійного обладнання ..	55
3.2.1 Обладнання та методика дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах статичного навантажень.	56
3.2.2 Обладнання та методика дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах вібраційних навантажень	59
3.2.3 Обладнання і методика проведення експерименту з метою визначення сприйняття ударних навантажень композитним матеріалом	64
3.2.4 Устаткування та методика досліджень адгезійної міцності композитного матеріалу	72
3.2.5 Устаткування та методика дослідження корозійної стійкості композитного матеріалу	76

3.3 Результати досліджень механічних властивостей композитних матеріалів.....	83
3.3.1 Результати дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах статичних навантажень	83
3.3.2 Результати дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах вібраційних навантажень	87
3.3.3 Результати дослідження несучої здатності композитного матеріалу в умовах дії ударних навантажень	93
3.3.4 Результати дослідження адгезійної міцності композитного матеріалу	100
3.3.5 Результати експериментальних досліджень корозійної стійкості композитного матеріалу	105
3.4 Висновки	110
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РЕМОНТІ ВУЗЛІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	
4.1 Теоретичний аналіз навантаження опорних поверхонь підшипникових вузлів металургійного обладнання.....	112
4.2 Моделювання ударних навантажень на опорні поверхні вузлів.	118
4.3 Порівняння експериментальних та теоретичних результатів визначення напружень у полімерному матеріалі застосованих у деталях металургійного обладнання	129
4.4 Порівняльний аналіз питомої енергоємності та коефіцієнт дисипації зразків зі сталі та композиту.....	132
4.5 Висновки	136
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК	
5.1 Відновлення вузлів роликів проводок.....	137
5.2 Відновлення герметичності вузлів хитання кристалізатору	139
5.3 Розробка технологій захисту металоконструкцій.....	143

5.4 Висновки	145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
ДОДАТОК А	165
ДОДАТОК Б	168
ДОДАТОК В.....	170

ВСТУП

Актуальність теми. Металургійне обладнання працює в екстремальних умовах і тому до нього висувають найжорсткіші вимоги з надійності. Машини 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 установлено, 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, інгібітування 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 сталевих 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ І СПОСОБИ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.

1.1 Існуючі методи і способи відновлення деталей металургійного обладнання

При ремонті та відновленні зношених або дефектних поверхонь можливі наступні методи їх відновлення, показані на (рис 1.1) [1-17].

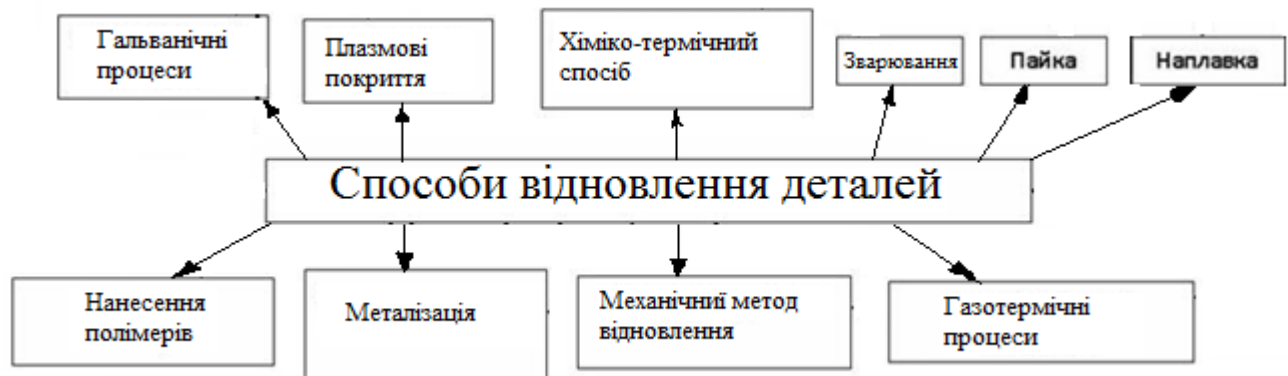


Рисунок 1.1 - Способи відновлення деталей.

Механічні методи відновлення металургійного обладнання

Цей спосіб полягає у тому, що одну з деталей, що з'єднуються (зазвичай складну і дорогу) ремонтують механічною обробкою до заданого ремонтного розміру, а іншу деталь, просту по конструкції і більш дешеву замінюють новою відповідного ремонтного розміру. Призначення ремонтних розмірів повинно проводитися в межах, що забезпечує достатню міцність обох деталей. При цьому, в залежності від величини зносу поверхонь деталей складається ремонтні креслення і розраховується черговий ремонтний розмір [1].

При розробці технології механічної обробки слід мати на увазі, що механічна міцність валів, осей, що піддаються обробці, знижується за рахунок зменшення діаметра основного тіла деталі. Тому у відповідальних випадках

механічній обробці має передувати перевірочний розрахунок деталі на міцність і довговічність.

Відновлення за допомогою гальванічних процесів

Хромування – це процес електролітичного нарощування хрому на поверхню ремонтованих деталей [2]. Хромове покриття має високу твердість з низьким коефіцієнтом тертя і великий супротив до зносу. В процесі хромування при певній щільності струму і температурі електроліту на хромовому покритті з'являється сітка тріщин. Обсяг хрому, що осідає внаслідок переходу з гексагональної форми решітки в кубічну зменшується. Скороченню обсягу обложеного шару хрому перешкоджає основний метал деталі, що супроводжується виникненням в покритті розтягуючих зусиль. У міру збільшення товщини покриття розтягують зусилля зростають і досягають величини, що перевищує межу міцності хрому на розрив. Ці напруги в шарі хрому і є причиною утворення тріщин в покритті. Для збільшення густоти і глибини тріщин застосовують хімічне і електролітичне травлення покриття, іноді пористість отримують механічним шляхом.

Після анодного травлення, на поверхні хромового покриття утворюється сітка, що складається з невеликих майданчиків. При відновленні хромуванням деталей великих розмірів виникають труднощі через відсутність необхідних ванн, складнощі в ізоляції поверхонь, які не покривають хромом, недостатня потужність живлення та ін. Хромування зношених поверхонь деталей котрі неможливо занурити до ванни, здійснюють поза ванни в струмені електроліту або за допомогою переносних ванн. При розмірному хромуванні рельєфних поверхонь для рівномірного покриття застосовують спеціальні екрани, що забезпечують кращий розподіл силових ліній.

Осталювання (залізення) – це спосіб відновлення деталей електролітичним нарощуванням шару заліза [1]. Перевагою його перед хромуванням є те, що процес осадження заліза протікає в 10-20 разів швидше і,

крім того, можна наносити більш товстий шар металу до – 2 мм (при більшій товщині міцність цього шару зменшується). Але основною перевагою покриттів, одержуваних остальюванням, є міцність зчеплення їх з основним металом. Шар, нанесений при остальюванні, за своїми фізико-механічними властивостями нагадує середньовуглецеві сталі.

Відновлення деталей хіміко-термічним способом

Борування – хіміко-термічна обробка деталей, що сприяє підвищенню зносостійкості поверхневих шарів [1]. Для здійснення цього процесу в тигель електropечі закладають сіль тетраборної кислоти (буру). В тиглі бура, нагріваючись, утворює розплавлену рідину з температурою близько 1000°C . У цю ванну на підвісці або в металевому кошику опускають деталь. Поверхня сталевих деталей насичується розплавленим бором, відбувається хіміко-термічна реакція, при якій утворюється борид заліза. В результаті підвищуються твердість деталей, її стійкість проти окислення і корозії, кислототривкість, жаростійкість.

У наслідку проведеного аналізу методів відновлення хіміко-термічними способами, можливо зробити висновок, що ці методи є ефективними тільки при захисті та відновлюванні невеликих товщини зношеної поверхні. При відновлюванні зносу більш ніж 2 мм цей метод є не ефективним, оскільки при такому відновленні знижується міцність деталей, окрім того цей метод потребує багато часу, оскільки нарощування зношеного шару виконується за допомогою осадження металу на поверхні. До недоліків слід, також, віднести необхідність попередньої механічної обробки, щоб компенсувати наявність рисок, раковин, та інше.

Електродугова наплавка вручну

При використанні цього методу нарощування, поверхні виконується "валиками", при чому, на один наплавлений шар наносяться послідовно нові шари, перед накладенням яких попередній шар повинен бути зачищений [4]. Для зменшення викривлення відновлюваної деталі, наплавку виконують короткими валиками, розташованими окремими ділянками по наплавленій поверхні з тим, щоб нагрівання деталі відбувалось менш інтенсивно. При необхідності забезпечити щільність наплавляемого шару, його проковують за допомогою зубила, а потім наносять наступний шар. Щоб забезпечити хороше відведення тепла, частину відновлюваної деталі можна занурити у ванну з водою або вести шар наплавлення під воду. Електроди, які застосовуються при наплавленні поверхонь для утворення нерухомих з'єднань, повинні відповідати матеріалу деталі.

При рухомих з'єднаннях бажано вести наплавку електродами, що підвищують твердість і зносостійкість нарощуваних поверхонь. Наплавлена поверхня підшипникової опори представлена на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Наплавлена опорна поверхня.

Механізоване наплавлення під шаром флюсу

Винахід цього методу, розробка технології та обладнання для його здійснення належить радянському вченому акад. Е. О. Патону. У ремонтній практиці наплавка під шаром флюсу застосовується, головним чином, для відновлення тіл обертання і площин. Суть автоматичної наплавки в тому, що електрод-дріт подається до місця зварювання автоматично, а зварювальна дуга, що виникає між електродом та наплавленою деталлю, також автоматично подається порошкоподібним флюсом, що оберігає зварювальну ванну від зіткнення з киснем та азотом у повітрі та зберігає тепло процесу. Автоматичне зварювання продуктивніше а якість отриманого шва висока, процес ведеться без розбризкування металу, дуга прихована під флюсом і не засліплює робітника. Цим методом можна нарощувати шар до 45 мм. Для наплавлення тіл обертання може бути пристосований токарний верстат, на який монтується головка автоматичної наплавки. Переміщення зварювальної головки по траверсі – ручне і механічне. Установка траверси по висоті – ручна. Швидкість обертання задається змінними зубчастими колесами. Наплавляюча деталь має можливість нахилитися по відношенню до зварювальної голівці.

Плазмова наплавка металів

Плазма – високотемпературний, сильно іонізований газ, який створюється дуговим розрядом, порушених між двома електродами, через який газ пропускається у вузькому каналі. Плазмоутворюючим газом служить аргон. Струмінь плазми забезпечує стабільність дугового розряду і високу концентрацію теплової енергії. Температура плазмового струменя 10000-15000⁰С, що досить для розплавлювання будь-яких металів. Від впливу атмосфери плазмовий струмінь захищається захисними газами: аргоном, азотом, вуглекислим газом. Дуга створюється між електродами які не

плавляться з вольфраму або вольфраму з присадками торію або лантану. Для створення плазмового струменя застосовуються спеціальні плазмові головки.

Струмінь низькотемпературної плазми використовується для плавки різних металів з метою створення біметалевих деталей. Розплавлення металів, в тому числі і тугоплавких, дозволяє наплавити або напилити поверхні деталей для отримання шару металу, відмінного від основного. При ремонті плазмова наплавка і напилення застосовуються, головним чином, з метою збільшення зносостійкості певних поверхонь деталей обладнання. Присадний матеріал для наплавлення або напилення може мати вигляд дроту, стрічки або порошку. Для наплавлення застосовуються тверді сплави: стеліт, сормайт, сталініт. Наплавлення може проводитися присадочним токопровідним дротом (прутами) або порошками. Дріт (прутки) подаються безпосередньо під плазмову голівку; порошки відповідної присадки можуть бути насипані на наплавляєму поверхню рівним шаром. Порошок розплавляється за допомогою плазмового струменя; він може також вдуватися в струмінь зі спеціального бункера. Плазмовим наплавленням можна наносити шар металу від 0,5 до 5-6 мм (максимальний шар при напавленні в один прохід). Ширина напавлення залежить від конструкції зварювального устаткування і може досягати 50-60 мм.

Електровібраційне напавлення.

Суть вібраційного напавлення полягає в тому, що електрод при зварюванні вібрує. В результаті безперервна дуга перетворюється в переривчасту – метал, за допомогою якого напавляють поверхню, подається на неї невеликими порціями. Крім того, наплавка може виконуватися в струмені рідкого електроліту або захисного газу, які охолоджують електрод, місце зварювання і захищають дугу від впливу навколишньої атмосфери. Результатом цих особливостей є мінімальна деформація деталей.

Наплавлення може вестися в один чи кілька шарів. За один прийом можна наростити шар металу до 3 мм. При необхідності наростити більший шар металу рекомендується обробити поверхню наплавленого шару, а потім нанести другий.

Електровібраційним наплавленням можна нарощувати як тіла обертання, так і площини, шліци на валах, торці деталей і т.д. При підготовці деталей під наплавлення всі шпонкові пази, канавки, отвори, які необхідно зберегти, закладають графітом або сталевими вставками.

Металізація.

Процес нанесення на поверхню розпорошеного розплавленого металу називається металізацією. Методи розплавлення металу можуть бути різними: електротягою, струменем палаючого газу, електро або газового нагріву в тиглі. Розплавлений метал розпорошується струменем стисненого повітря, що надає найдрібнішим його частинкам кінетичну енергію. Завдяки цьому, вони з великою швидкістю вдаряються об попередньо підготовлену поверхню деталі. При ударі об тверду поверхню частинки, будучи в пластичному стані, деформуються і зчіплюються з нею. Наступні шари зчіплюються з попередніми, і так до припинення процесу.

Металізація не викликає деформації відновлюваної деталі. Найкраще відновлювати сталеві і чавунні деталі, що працюють на тертя при спокійному навантаженні без значних ударів з окружною швидкістю обертання відновлюваних шийок до 25 м / хв. Нарощуваний металізацією шар може мати товщину в межах від 1,5 до 12 мм. Матеріалом для нарощування сталевих і чавунних деталей служить сталевий дріт. Шар металу, отриманий металізацією, являє собою губчасту масу з помітними порами, досить активно вбирає масло. Для отримання хорошого зчеплення шару металу, що наноситься, з основним важливо правильно провести підготовку поверхні. Вона полягає в очищенні

поверхні деталі від жиру, бруду, вологи, оксидів і т. д. і створенні шорсткості поверхні. Очищення поверхні деталі від забруднень проводиться хімічними розчинниками, піском або дробом; створення потрібної шорсткості досягається механічною обробкою або іншими методами.

Відновлення зношених поверхонь металізацією без нагріву

Нова технологія нанесення металевих покриттів здійснюється за рахунок надзвукового удару металевих частинок об поверхню виробу. Необхідна швидкість надається частинкам за допомогою спеціального портативного технологічного обладнання. Конструкція обладнання забезпечує створення повітряного надзвукового потоку, введення в цей потік частинок напилюваного порошкового матеріалу і прискорення цих частинок до швидкостей, достатніх для ефективного формування металевих покриттів, що мають високі експлуатаційні властивості. Для роботи обладнання необхідне стиснене повітря тиском 0,6-1,0 МПа і витратою 0,3-0,4 м³/хв, і електромережу напругою 220 В.

Усунення пошкоджень деталей з легких сплавів, перш за все алюмінієвих або алюмінієво-магнієвих, що виникають як у процесі їх виробництва, так і в процесі експлуатації, є найбільш ефективним напрямком застосування нової технології. Низька енергетика процесу дозволяє усувати дефекти і пошкодження навіть тонкостінних деталей, відновлення яких іншими способами виявляється неможливим. Причиною високої ефективності є важлива особливість технології: відсутність нагріву оброблюваної деталі - деталь не нагрівається вище 100-150⁰С, і звідси відсутність окислення напилюваного матеріалу і підкладки, відсутність теплових деформацій і внутрішньої напруги в деталі. Області застосування технології:

- Ремонт виливків. У виробництві виливків з легких сплавів технологія застосовується для усунення дефектів лиття (свищі, каверни, раковини), в тих випадках, коли вони не впливають на характеристики міцності виробу, але

порушують їх герметичність, необхідні геометричні параметри або товарний вигляд. Економічна ефективність ремонту зростає, якщо дефекти є прихованими і виявляються тільки на етапі механічної обробки.

- Усунення механічних пошкоджень. Найбільш характерні пошкодження легко усуваються з використанням даної технології, пов'язані з винесенням маси металу – корозійні пошкодження, знос, відколи, прогари, тріщини, пробоїни та ін.

- Відновлення посадочних місць підшипників. Покриття наносяться безпосередньо на зношену поверхню, процес нарощування металу уніфікується в силу того, що покриття можуть наноситися на будь-які метали, з яких можуть бути виготовлені підшипникові вузли.

- Герметизація течі рідин і газів. Технологія дозволяє усувати течі робочих газів і рідин у випадках, коли неможливе використання герметиків: для ремонту ємностей, що працюють під тиском або при низьких і високих температурах, елементів кріогенних систем, систем охолодження, трубопроводів, теплообмінників і т.п.

- Антифрикційні покриття. Досить ефективним виявляється застосування нової технології для усунення локальних ушкоджень (відколів, подряпин, задирів і т.п.) поверхонь ковзання шляхом нанесення покриттів на дефектні місця. Використання цього способу дозволяє продовжити ресурс підшипника і уникнути складної процедури повної його перезаливання або заміни.

- Ефективне застосування технології можливо і для забезпечення захисту від високотемпературної корозії, запобігання захоплювання в силових різьбових з'єднаннях, герметизації теплообмінників і хладоагрегатів, створення світловідбивних технічних і декоративних виробів.

У проведеному аналізі відновлення обладнання за допомогою термічних методів є ефективним при відновленні великих товщин, проте отримання міцної поверхні можливо тільки на поверхнях з низьким змістом вуглецю. Для

відновлення деталей з вмістом вуглецю більш 0,2% потрібні спеціальні технології, котрі дуже ускладнюють відновлення. Також, після відновлення за допомогою термічних методів, необхідна подальша механічна обробка, що при великих розмірах металургійного обладнання, потребує спеціального верстатного обладнання. Таким чином, в наслідку проаналізованих методів відновлення можна зробити висновки, що необхідний пошук новітніх методів відновлення металургійного обладнання.

Відновлення за допомогою полімерних матеріалів.

Ремонти за допомогою полімерних матеріалів знайшли найбільш широке застосування в даний час в різних областях промисловості. Ефективність саме цього виду ремонту пояснюється досить просто. Відновлення за допомогою полімерних матеріалів в більшості випадків не потребує подальшої механічної обробки. На дану годину існують багато різних полімерних матеріалів, котрі використовуються до відновлення зношених поверхонь, класифікація яких приведена на рисунку 1.3. [3].

В літературі [3] приведені технічні характеристики полімерних матеріалів та галузі їх використання. Було встановлено, що полімерний матеріал фірми «Diamant», який використовувався для відновлення вузлів металургійного обладнання, по технічним характеристикам перевищував аналоги. Технічні характеристики цього композитного матеріалу та його модифікацій приведені в таблицях 1.1.

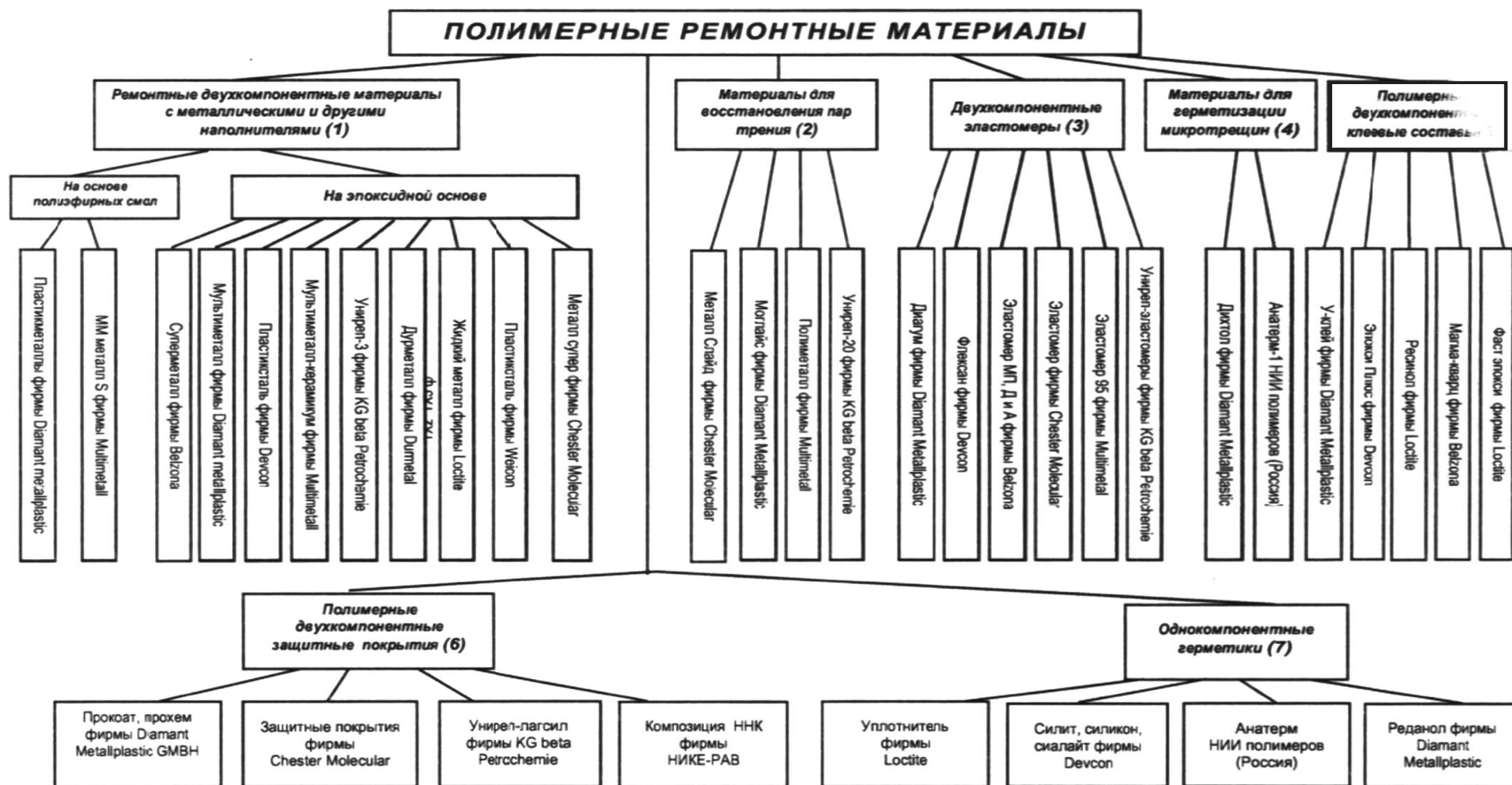


Рисунок 1.3 - Классификация полимерных ремонтных материалов

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики матеріалів Мультиметал

	Чавун		Сталь		Алюміній		Бронза	
	Р (пасто- подібний)	F1 (рідинно- текучий)	Р (пасто- подібний)	F1 (рідинно- текучий)	Р (пасто- подібний)	F1 (рідинно- текучий)	Р (пасто- подібний)	F1 (рідинно- текучий)
Межа міцності на стиск, МПа	160	156	160	156	145	141	155	151
Межа міцності при розтягуванні, МПа	76	76,6	76	76,6	72	72,5	62	62,5
Межа міцності при вигині, МПа	89	87	89	87	82	82,5	79,5	80
Ударна в'язкість, Н/мм ²	5,2	5,0	5,2	5,0	5,4	5,2	5,4	5,2
Термостійкість С ⁰								
Короткочасна	-32 +350							
Тривала	-32 +200							
Питома вага г/см ²	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	2,2	2,1
час вироблення, хв	60	60	60	60	60	60	60	60
час отвердіння, год								
Легке навантаження, через, год	5-6	5-6	5-6	5-6	5-6	5-6	5-6	5-6
Повне навантаження, через, год	24	24	24	24	24	24	24	24
Усадка після отвердіння, мм	0,004	0,005	0,004	0,005	0,004	0,005	0,004	0,005
Термін зберігання, рік	2	2	2	2	2	2	2	2

Технічні характеристики інших полімерних матеріалів приведені в Додатку А.

Однак ті характеристики, котрі приведені в таблицях, не дають уявлення щодо поведінці цих матеріалів в умовах динамічного та вібраційного навантаження, корозійної стійкості і т. ін. Тому необхідне дослідження тих механічних властивостей, котрі визначають можливість застосування композитного матеріалу в умовах роботи вузлів МБЛЗ конвертерного цеху.

1.2 Висновки

В результаті проведеного аналізу систематизовано основні методи відновлення та захисту обладнання. Встановлено, що відомі методи захисту і відновлення зношених поверхонь є недостатньо ефективними, оскільки для відновлення деталей обладнання необхідна розробка спеціальних технологій та обладнання для механічної обробки деталей. Це підвищує вартість відновлюючих робіт та потребує багато часу, що при роботі машини безперервної розливки сталі стає неприпустимим.

Аналіз новітніх ремонтних матеріалів показав, що на ринку існують багато фірм, котрі виготовляють композитні матеріали, однак вони не дають гарантій для застосування їх у металургійній промисловості. Дані, котрі приведені в таблицях виробника, не дають повну картину поведінки матеріалу у відновлених вузлах.

Оскільки використання новітніх ремонтних матеріалів дозволяє скоротити час відновлення і скоротити витрати на ремонт, то використання даних матеріалів є актуальним завданням. Однак, без попередніх досліджень не можливо рекомендувати для застосування композитні матеріали для відновлення металургійних машин, які працюють з великим навантаженням, в умовах дії ударних імпульсів, дії води та температури.

У зв'язку з цим в даній роботі для вирішення завдання дослідження і розробки способів підвищення технічного ресурсу машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) необхідно виконати наступні етапи:

- 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) визначення межі міцності при впливі ударних навантажень.
 - б) визначення межі міцності при вібраційних навантаженнях
 - в) визначення адгезійної міцності;
 - г) експериментальне визначення корозійної стійкості ремонтного матеріалу;
- розробка теоретичного, способу досліджень динамічних навантажень на ремонтний матеріал.
 - підвищення експлуатаційної надійності за рахунок розробки технології відновлення вузлів машини безперервного лиття заготовок з використанням композитного матеріалу.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

Спосіб безперервного розливання полягає в тому, що рідку сталь заливають в інтенсивно охолоджувану наскрізну форму – кристалізатор. Частково затверділий злиток безперервно простягають через нього і додатково охолоджують в, так званій, зоні вторинного охолодження [28]. В процесі безперервної заливки металу і його затвердіння утворюється безперервний злиток. Агрегати для розливання сталі цим методом називають машинами безперервного лиття заготовок або установками безперервного розливання сталі (УНРС) схема машини безперервної розливки сталі зображена на рис. 2.1. Розливання ведуть до витрачання металу в сталерозливних ковшах а бо розливають без перерви метал з декількох ковшів (розливання методом "плавка на плавку").

Таким чином, вихід із ладу якогось із вузлів МБЛЗ, приводить до припинення процесу розливання сталі, що тягне за собою значні витрати. Також, при неправильній роботі машини може відбуватися прорив слябу, що призводить до заливання рідким металом вузлів машини і створює аварійну обстановку.

Для підвищення надійності були зібрані данні по виходу з ладу МБЛЗ на прикладі комбінату «Азовсталь», також був проведений огляд машин, який показав, що вузли УНРС схильні до корозійному зносу, а підвищена запарованості приводить до збільшення його інтенсивності. Це негативно позначається на надійності механізмів та систем постачань охолоджуючої рідини.

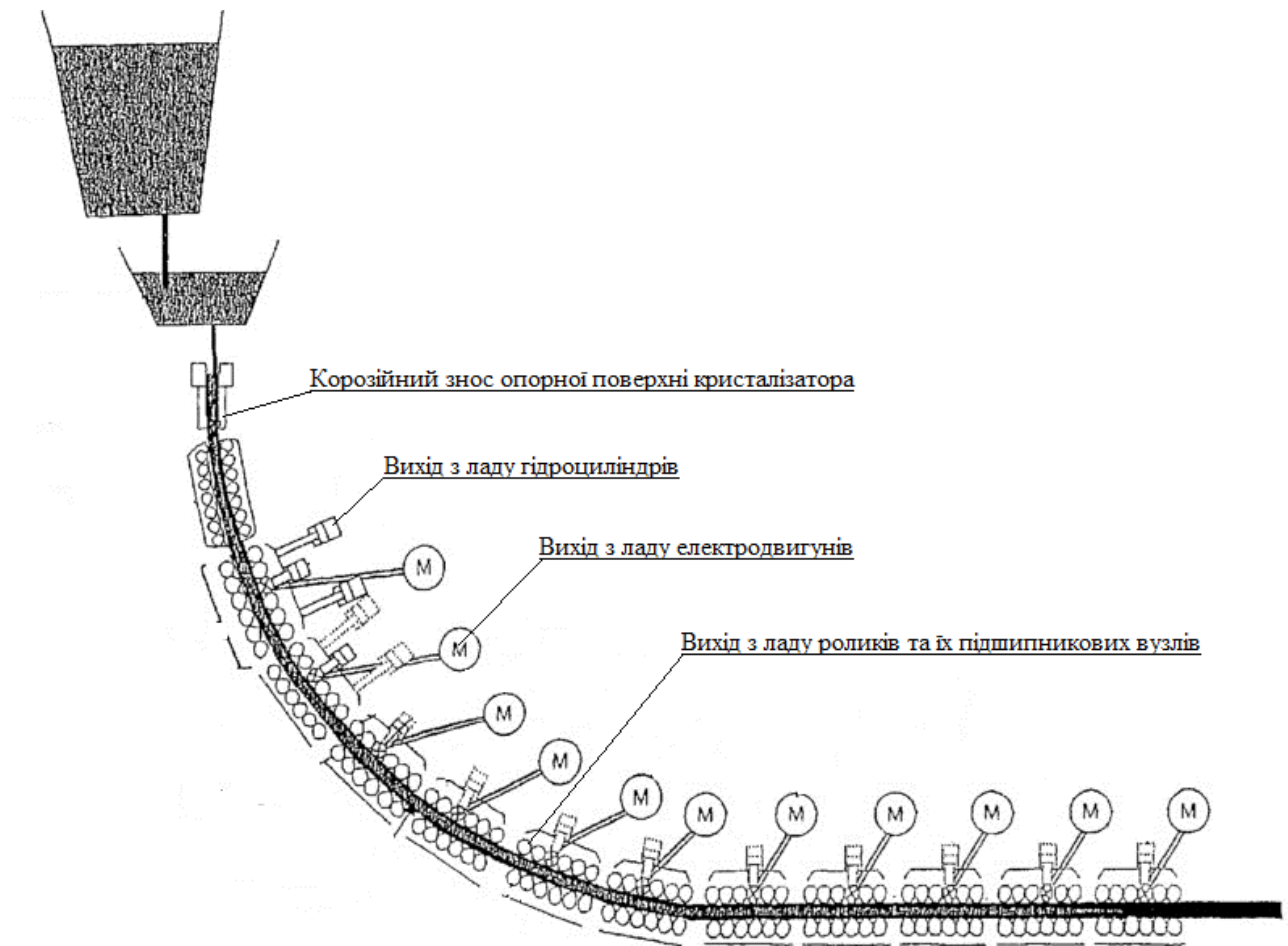


Рисунок 2.1 – Схема розташування швидкозношуваних вузлів МБЛЗ

2.1 Аналіз виходу з ладу основних вузлів машини безперервного лиття заготовок в умовах конвертерного цеху ММК «Азовсталь»

Аналіз виходу з ладу стін бункера вторинного охолодження машини безперервного лиття заготовок. Вторинне охолодження заготовки починається безпосередньо під кристалізатором, що обумовлюється тим фактом, що тверда скоринка металу, що сформувалася в кристалізаторі, ще досить тонка і недостатньо міцна.

Зазвичай, говорячи про зону вторинного охолодження (ЗВО), мають на увазі ту частину МБЛЗ під кристалізатором, де охолодження відбувається інтенсивніше, ніж просто при охолодженні на повітрі. Функціонально зона вторинного охолодження є вкрай важливою з точки зору якості заготовки. Це, в

першу чергу, відноситься до запобігання формуванню різного роду термічних внутрішніх напружень в твердому каркасі заготовки. Параметри вторинного охолодження впливають на геометричну форму заготовки і якість макроструктури [29].

Система вторинного охолодження МБЛЗ складається з опорних елементів, що підтримують заготовку, пристроїв, що забезпечують охолодження зливка, а також спеціальних пристроїв, що впливають на структуру кристалізації заготовки (електромагнітний вплив, м'яке обтиснення, і т.д.).

Однією з проблем металоконструкції МБЛЗ є її схильність до корозійного зносу, що призводить до зниження несучої здатності металоконструкції, отже, зниження її надійності і підвищення аварійності машини. Машина безперервного лиття заготовок схильна до корозії в основному через підвищену вологість та підвищену температуру, зокрема це стосується зони охолодження сляба на криволінійній ділянці МБЛЗ. Дана ділянка негерметична і пар, який утворюється в час охолодження, осідає за межами криволінійної ділянки. Основні місця корозії показані на рис.2.2, рис.2.4.



Рисунок 2.2 – Результат корозійного зносу
опори поворотного стенда МБЛЗ



Рисунок 2.3 – Результат корозійного зносу
броні струмків МБЛЗ



Рисунок 2.4 – Результат корозійного зносу
металоконструкції МБЛЗ (несучі перекриття криволінійної ділянки)

З цих рисунків видно, що одні з несучих елементів металоконструкції схильні до корозійного зносу. Це призводить до виходу з ладу вузлів обладнання, та створює аварійну зупинку, що приводить до фінансових втрат. За результатами аналізу частоти виходу з ладу обладнання були побудовані діаграми виходу із ладу приводу струмка МБЛЗ через пропуски пари крізь

стінки бункеру вторинного охолодження, дані приведені в табл.2.1. Для вирішення даної проблеми необхідно провести дослідження, щоб визначити інтенсивність корозії даного обладнання необхідно визначити швидкість корозії метала, а також умови, які впливають на цей процес.

Таблиця 2.1 - Позаплановий вихід з ладу МБЛЗ

№ Машини		Рік					
		2014р.	2015р.	2016р.	2017р.	2018р.	2014-2018р.
МБЛЗ 3	5	1	2	1	1	2	7
	6	-	1	2	1	1	5
МБЛЗ 4	7	1	2	2	1	1	7
	8	2	1	1	1	1	6
МБЛЗ 5	9	1	2	-	1	-	4
	10	1	1	1	1	1	5
МБЛЗ 6	11	2	4	2	2	1	11
	12	3	6	4	4	1	18

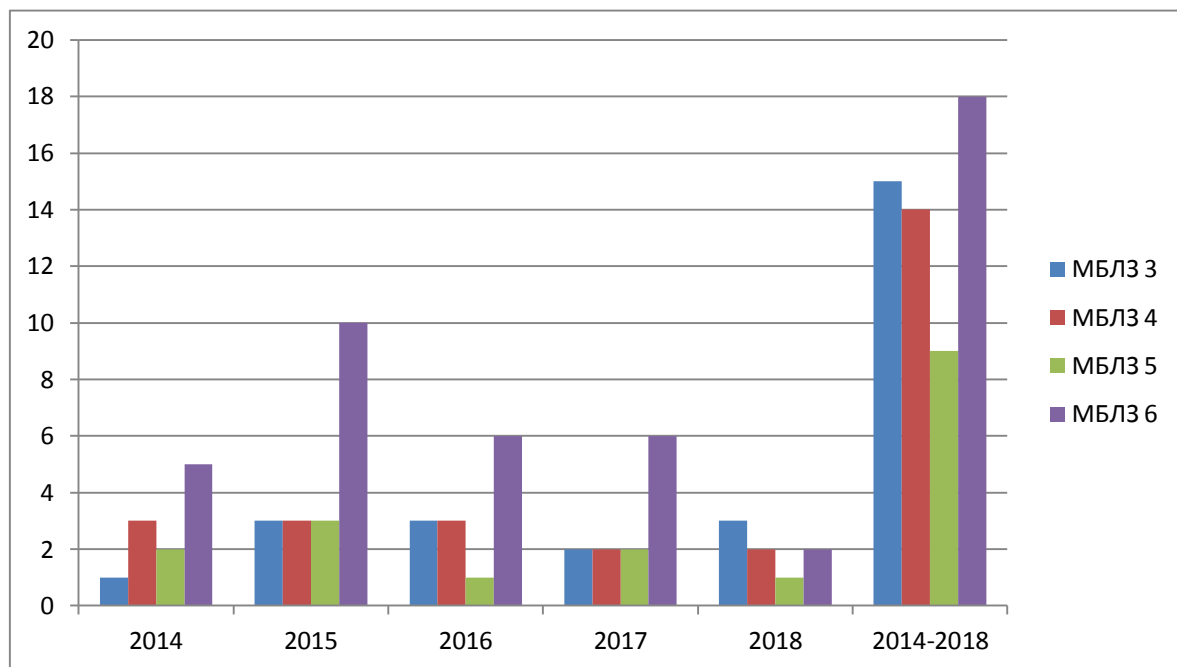


Рисунок 2.5 – Діаграма відмов МБЛЗ

Таким чином можна побачити, що МБЛЗ №6 частіше виходить із ладу, було проведено аналіз причин виходу з ладу на підставі агрегатних журналів, дані приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - 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 кристалізатора та 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

В ході обробки результатів були зроблені висновки, що по причинні підвищеної вологості частіше виходить із ладу механізм хитання кристалізатору, по причині поривів трубопроводів гідравлічних систем, а також систем охолодження. Це обумовлено тим, що сталеві закладення на армованих рукавах виконані зі звичайної стали, котра підчас роботи піддається впливу пару та високим температурам, що призводить до інтенсивнішої корозії.

Також було зроблені висновки, що частіше виходить із ладу електрообладнання, яке працює в місцях виходу пару, внаслідок зносу броні зони вторинного охолодження.

Аналіз виходу з ладу опорних плитовин під кристалізатором. У процесі формування твердої скоринки досить часто спостерігається явище її прилипання до поверхні кристалізатора. В цьому випадку, в ній виникають напруження розтягу, які викликаються витягуванням заготовки з кристалізатора. В кінцевому рахунку, в твердій скоринці можуть виникати розриви, які потім призводять до проривів і витікання сталі під кристалізатором. Це трапляється через порушення теплового балансу або недостатньої частоти коливання кристалізатору.

В конструкції вузла установки кристалізатора МБЛЗ подача води для його охолодження і її відведення передбачається через спеціальні отвори різного діаметру в опорній плиті, на яку встановлюється кристалізатор. По периметру цих отворів виконані канавки, в які закладаються гумові ущільнення, що забезпечує герметичність з'єднання при подачі води під тиском 8 атм.

В процесі роботи МБЛЗ канавки опорної плити піддаються корозійному зносу, з боку охолоджуючих каналів і починаються протікання води в місці роз'єму кристалізатора і опорної плити, що є неприпустимим з точки зору безпечної експлуатації машин. Зношені канавки до відновлення показані на рисунку 2.6



Рисунок 2.6 - Зношена канавка під ущільнення

Даний знос вимагає заміни вузла або ремонту, який фінансово затратний. В ході початку пропусків та негерметичності, під час поточного ремонту замазують роз'єм герметиком, але з часом цього недостатньо. Дана несправність виникає приблизно через 5 років роботи. Це впливає на інтенсивність процесу охолодження, а внаслідок призводить до перегріву кристалізатору. При перегріванні відбувається закипання води, що призводить до утворення накипу на стінках кристалізатору та до зниження теплопередачі, що в подальшому призводить до погіршення утворення кірки і зменшує її товщину, що призводить до поривів при подальшій експлуатації машини.

Аналіз виходу з ладу роликів проводок машини безперервного лиття заготовок. Конструкція зони вторинного охолодження (ЗВО) складається з системи опорних елементів (роликів), що підтримують і направляють заготовку, і пристроїв, що забезпечують охолодження злитка за рахунок розпилення охолоджуючої води. Точність розташування опорних роликів є дуже важливим елементом в системі забезпечення якості безперервно литої заготовки, оскільки будь-які відхилення положення роликів від

номінальної позиції призводять до додаткової деформації заготовки в процесі її руху по ЗВО.

Для забезпечення рівномірного охолодження заготовки по довжині ЗВО, зазвичай, розбивається на кілька секцій. Як правило, їх число коливається від 3 до 5 для сортових і блюмової МБЛЗ, і від 8 до 15 для слябових. Розбивка ЗВО на сегменти спрощує монтажні роботи на МБЛЗ, а також дозволяє виконувати налаштування сегментів за її межами. У конструкційному плані сегменти представляють собою дві зварні рами з роликами, які жорстко стягнуті між собою спеціальними стяжками (рисунок 2.7) [40].



Рисунок 2.7 – Сегменти роликової проводки слябової МБЛЗ.

У металургійній практиці перевага віддається товстостінним роликам, які мають різні системи внутрішнього водяного охолодження. Ролики без внутрішнього охолодження водою використовуються, як правило, в сортових і блюмових МБЛЗ. Їх охолодження досягається шляхом зрошення водою.

У найбільш складних умовах працюють ролики слябових МБЛЗ, оскільки вони мають велику відстань між підшипниковими опорами і максимальне теплове навантаження внаслідок великої ширини сляба. Ролики сучасних

слябових МБЛЗ складаються з трьох обичайок, що спираються на чотири підшипника кочення, встановлені в подушках (рисунок 2.8).

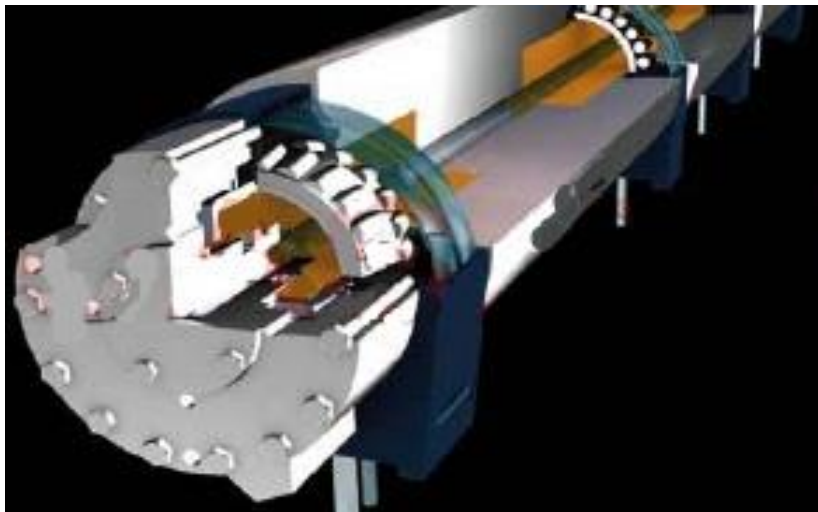


Рисунок 2.8 - Конструкція комбінованих роликів МБЛЗ

В процесі роботи МБЛЗ сегменти виходять з ладу з різних причин:

- поломка роликів через перегрів і мінливих навантажень показанні на рис. 2.9;
- заклинювання підшипників, що веде до заїдання ролика, а внаслідок до його перегріву;
- пориви системи охолодження;
- вихід з ладу формуючих циліндрів і т.д.

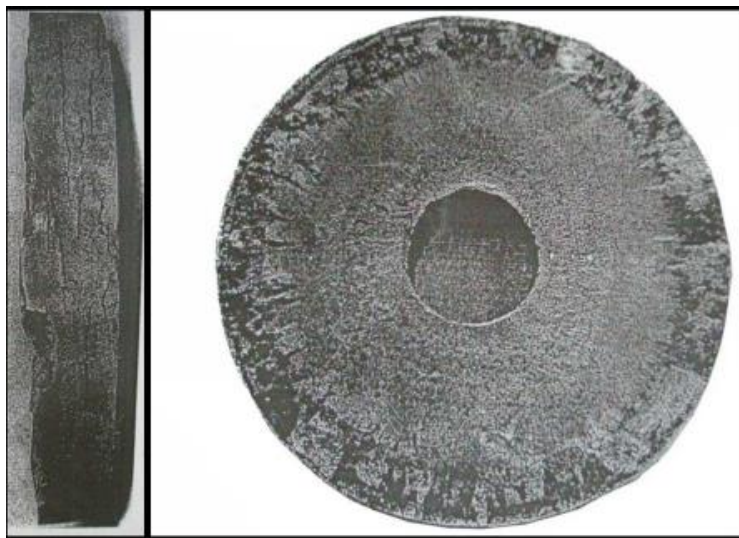


Рисунок 2.9 - Зріз зруйнованого ролика

Заміна сегменту відбувається з досвіду «Азовсталі» коли він відпрацював 1000 плавок, приблизно, це відбувається раз в 3 місяці. Зношені сегменти відправляють на ремонт, де виконують заміну роликів, циліндрів та металорукавів. Зношені поверхні під роликowymi опорами відновлюють, при необхідності, за допомогою наплавки та механічної обробки.

Аналіз виходу з ладу механізму хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок. Для даного механізму хитання кристалізатора в зазначений період були зафіксовані наступні відмови і несправності:

- руйнування ексцентрикового вала і деталей ексцентрикової муфти приводу;
- знос підшипників шарнірів і опор механізму;
- ослаблення різьбових з'єднань кріплення механізму хитання.

Спільними для механізмів хитання кристалізатору є такі несправності та відмови, як знос підшипників шарнірів і опор механізму хитання («розбивання» посадочних місць і збільшення радіальних зазорів підшипників), руйнування ексцентрикового валу приводу.

Знос підшипників шарнірів і їх посадкових місць викликають додатковий рух ланок, котрі впливають на різноманітні експлуатаційні характеристики, зокрема знижується точність руху кристалізатора щодо технологічної осі струмка МБЛЗ, змінюється час випередження, виникають ударні навантаження в підшипниках, з'являється горизонтальний хід і биття при русі столу гойдання. Проблема зносу підшипників розглянута в роботі Сотнікова А.Л. [27], в цій роботі приведені основні причини виходу із ладу підшипників приводу механізму хитання кристалізатору, приведені на рис. 2.10.

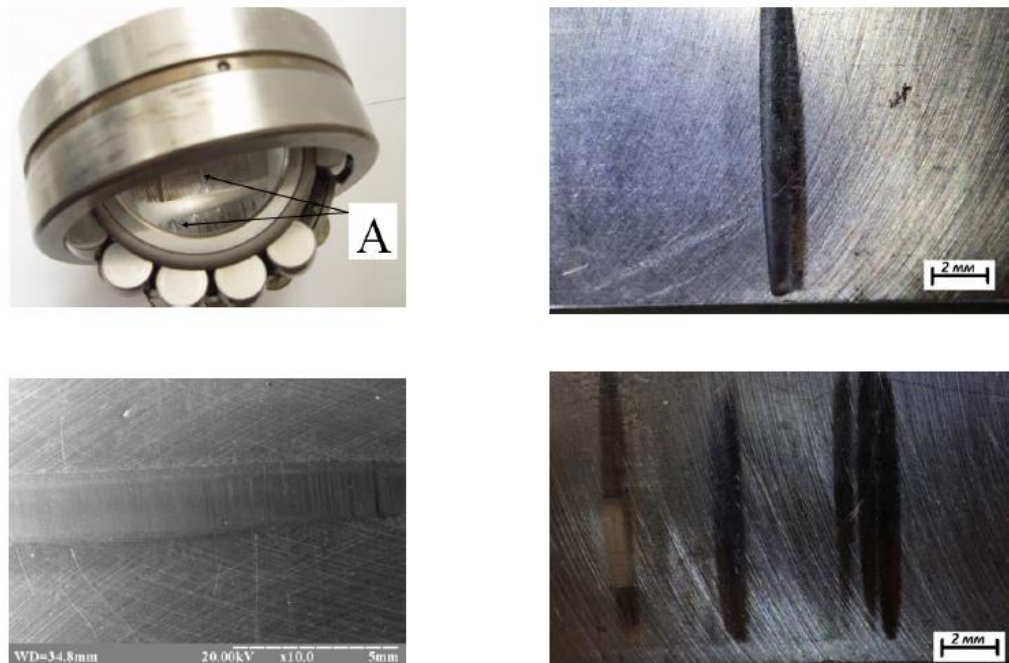


Рисунок 2.10 - знос зовнішнього кільця підшипника механізму хитання кристалізатора.

В даному випадку, ушкодження викликані зупинками підшипника, внаслідок особливостей кінематики, коли між роликами і доріжкою кочення зникає мастильний шар і виникає безпосередній контакт. Також, накладаються вібраційні та ударні навантаження, в такому випадку виникають незначні переміщення між тілами кочення і кільцями підшипника, що приводить до виникнення пошкоджень. Початкові стадії зносу мало впливають на експлуатаційні параметри, однак, інтенсифікація зносу викликає нерівномірність руху і порушує кінематику переміщення кристалізатора МБЛЗ.

2.2 Визначення ймовірності безвідмовної роботи МБЛЗ

Методика визначення кількісних значень показників надійності зводиться до послідовного вирішення таких завдань, як збір даних, встановлення виду закону відмов, ступеня близькості емпіричного і теоретичного розподілів, обчислення параметрів закону відмов і надійності виробу, який досліджується.

Потік відмов МБЛЗ (напрацьованих до відмови) в добах за 1825 діб (5 років) їх експлуатації виражається наступним рядом:

Таблиця 2.3 – Потік відмов МБЛЗ

МБЛЗ	Час напрацьований до відмови (в добах)
	53; 55; 60; 60; 65; 72; 82; 85; 86; 87; 90; 90; 91; 93; 93; 93; 95; 95; 100; 105; 105; 110; 120; 165; 165; 165; 178; 180; 180; 180; 182; 183; 186; 186; 187; 200; 200; 200; 230; 250; 260; 260; 280; 280; 295; 300; 300; 330; 348; 350; 350; 357; 360; 360; 362; 365; 400; 400; 450; 545; 600; 665; 700

Попередня обробка експериментальних даних полягає в табулюванні за прийнятою ознакою, у нашому випадку за кількістю відмов, що припадають на заданий інтервал часу Δt . Кількість інтервалів приймають в межах 7:12.

Орієнтовне значення інтервалу Δt можна визначити за формулою

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{1 + 3.3 \cdot \log n}, \quad (2.1)$$

де Δt — середній інтервал між відмовами МБЛЗ;

$t_{\max}$, $t_{\min}$ — максимальний та мінімальний доробок до відмови, год;

n — загальна кількість відмов.

В нашому випадку

$$\Delta t = \frac{700 - 53}{1 + 3.3 \cdot \log 63} = 93.3,$$

Будемо вважати, що $\Delta t = 100$ діб для МБЛЗ. У кожному інтервалі підраховуємо кількість відмов n_i . В результаті отримуємо варіаційний ряд випадкової величини (перший і другий стовбці табл. 2.4).

Таблиця 2.4 - Варіаційний ряд відмов МБЛЗ

Δt , годин	n_i	n	$\frac{n_i}{n}$	$\sum \frac{n_i}{n}$	$\frac{n_i}{n \cdot \Delta t}$
1	2	3	4	5	6
0 - 100	18	63	0,2857	0,2857	0,0029
100 - 200	17	63	0,2698	0,2698	0,0027
200 - 300	10	63	0,1587	0,1587	0,0016
300 - 400	11	63	0,1746	0,1746	0,0017
400 - 500	3	63	0,0476	0,0476	0,0005
500 - 600	2	63	0,0317	0,0317	0,0003
600 - 700	2	63	0,0317	0,0317	0,0003

Статистична функція розподілу розрахована шляхом послідовного обчислення частоти $\frac{n_i}{n}$, накопиченої частоти $\sum \frac{n_i}{n}$ і емпіричної щільності ймовірності $\frac{n_i}{n \cdot \Delta t}$. Для визначення виду закону відмов статистичну функцію розподілу (перший і п'ятий стовбці табл. 2.4) представляємо гістограмою (рис. 2.11), візуальний аналіз якої дозволяє прийняти гіпотезу про те, що відмови МБЛЗ описуються нормальним законом.

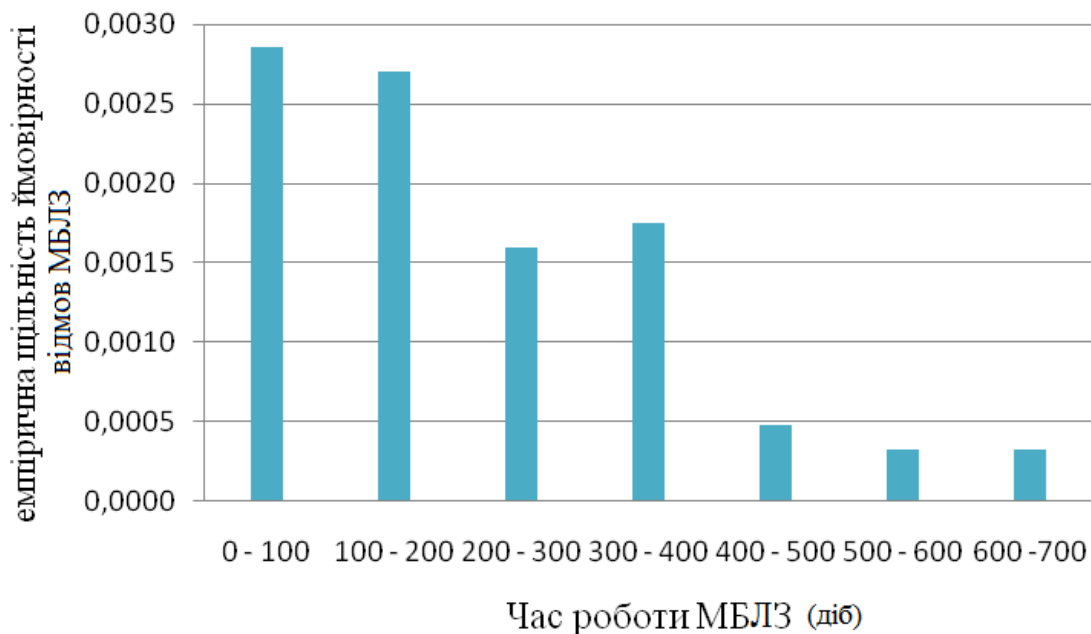
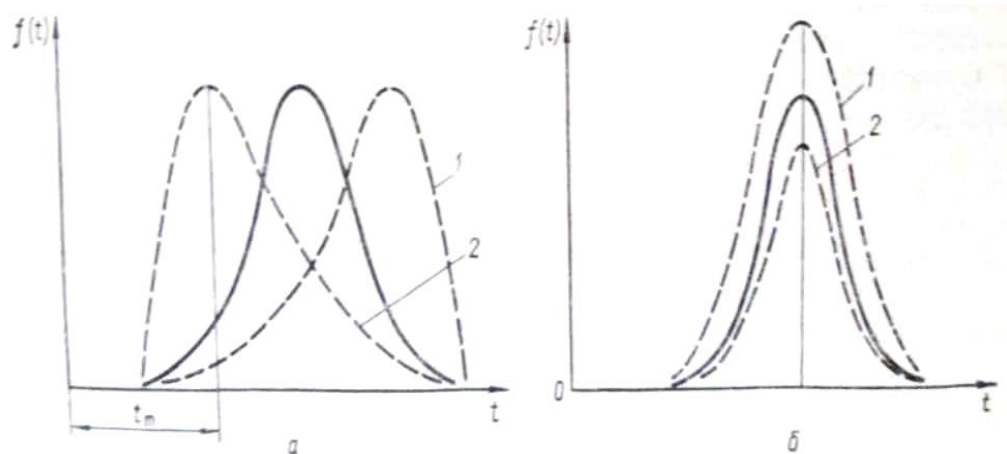


Рисунок 2.11 – Гістограма відмов МБЛЗ

Цей закон характеризується двома параметрами: математичним очікуванням напрацювання до відмови t_0 і середньоквадратичним відхиленням

σ. Експериментальний розподіл відрізняється від теоретичного наявністю асиметрії (рис. 2.12, а) и ексцесу (рис. 2.12, б).



1- позитивні асиметрія і ексцес; 2- негативна асиметрія ексцес

а — додатні, б — від'ємні асиметрії и ексцес

Рисунок 2.12 – Характерні похибки теоретичної кривої нормального розподілу.

Для визначення параметрів закону відмов застосовуємо аналітичний спосіб. Для цього використовуємо метод моментів. [33]. Початковий емпіричний момент порядку ν_k визначаємо за формулою:

$$\nu_k = \frac{\sum n_i t_i^k}{\sum n_i}, \quad (2.2)$$

Перший емпіричний початковий момент ν_1 , що є оцінкою математичного очікування доробок до відмови t_0 , дорівнює:

$$\nu_1 = \frac{\sum n_i t_i}{\sum n_i} = \bar{t}_0, \quad (2.3)$$

Центральний емпіричний момент порядку k дорівнює:

$$\mu_k = \frac{\sum n_i (t_i - \bar{t}_0)^k}{\sum n_i}, \quad (2.4)$$

Другий емпіричний центральний момент μ_2 є оцінкою дисперсії випадкової величини і дорівнює:

$$\mu_2 = \frac{\sum n_i (t_i - \bar{t}_0)^2}{\sum n_i} = \sigma^2, \quad (2.5)$$

Міру асиметрії, що характеризує зміщення кривої розподілу щодо центру t_0 визначаємо за формулою [34]:

$$A = \frac{\sum n_i (t_i - \bar{t}_0)^3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{\sqrt{\mu_2^3}}, \quad (2.6)$$

Показник ексцесу K (крутизна кривої розподілу) дорівнює:

$$K = \frac{\sum n_i (t_i - \bar{t}_0)^4}{\sigma^4} - 3 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3, \quad (2.7)$$

Крім того, експериментальний розподіл оцінюється модальним значенням t_m , під яким розуміють значення випадкової величини, що має найбільшу частоту.

Таким чином, для визначення параметрів закону відмов МБЛЗ необхідно обчислити перший початковий і перші чотири центральних моменти.

Зв'язок між центральними і початковими моментами виражається наступними залежностями:

$$\mu_2 = \nu_2 - \nu_1^2; \quad (2.8)$$

$$\mu_3 = \nu_3 - 3\nu_2\nu_1 + 2\nu_1^3; \quad (2.9)$$

$$\mu_4 = \nu_4 - 4\nu_3\nu_1 + 6\nu_2\nu_1^2 - 3\nu_1^4 \quad (2.10)$$

Розрахунки параметрів нормального закону відмов пов'язані з виконанням великої кількості обчислень. Спростити обчислення можна наступним чином. Центральні моменти μ_i не залежать від початку відліку. Тому за початок відліку приймаємо умовну середину варіаційного ряду (значення t_n відповідне максимальному n_i), а дійсний варіаційний ряд замінюємо наведеним (табл. 2.5), члени якого отримуємо відніманням $t_n = 50$ з усіх значень t_i (другий стовпець табл. 2.5). Це призводить до зменшення оцінки математичного очікування доробок до відмови на величину t_n . Отримані значення ділимо на Δt , що знову зменшить в Δt раз, а оцінку дисперсії – в $(\Delta t)^2$ раз. Після перетворень змінна t_i замінюється змінною x_i (четвертий стовпець табл. 2.5), яку визначаємо

$$x_i = \frac{t_i - t_n}{\Delta t}, \quad (2.11)$$

Сукупність x_i є наведений варіаційний ряд, для якого

$$\bar{t}_0 = t_n + \bar{x}\Delta t; \quad (2.12)$$

$$\mu_2 = \overline{\sigma^2} = (\overline{x_i^2} + \overline{x_i^2})\Delta t^2; \quad (2.13)$$

$$\mu_3 = (\overline{x_i^3} - 3\overline{x_i}\overline{x_i^2} + 2\overline{x_i^3})\Delta t^3, \quad (2.14)$$

де $\overline{x_i^k}$ - середнє значення відповідної величини.

Таблиця 2.5 - Наведений варіаційний ряд відмов МБЛЗ

								Перевірка	
Δt	t_i	n_i	X_i	$n_i X_i$	$n_i X_i^2$	$n_i X_i^3$	$n_i X_i^4$	X_{i+1}	(X_{i+1})
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0 - 100	50	18	-1	-18	18	-18	18	0	0
100 - 200	150	17	0	0	0	0	0	1	17
200 - 300	250	10	1	10	10	10	10	2	160
300 - 400	350	11	2	22	44	88	176	3	891
400 - 500	450	3	3	9	27	81	243	4	768
500 - 600	550	2	4	8	32	128	512	5	1250
600 - 700	650	2	5	10	50	250	1250	6	2592
ВСЬОГО :		63		41	181	539	2209		5678

Щоб переконатися в правильності обчислень, в розрахунки вводимо додаткову функцію, яка включає в себе всі підсумкові результати. В цьому випадку необхідно обчислити перші чотири початкових моменти. Тому додаткову функцію (дев'ятий стовпець табл. 2.4) запишемо у вигляді:

$$y = x + 1, \quad (2.15)$$

Тоді вираз:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{\Sigma(x+1)^4 n_i}}{\Sigma n_i} &= \frac{4 \Sigma \bar{x} n_i}{\Sigma n_i} + \frac{6 \Sigma \bar{x}^2 n_i}{\Sigma n_i} + \frac{4 \Sigma \bar{x}^3 n_i}{\Sigma n_i} + \frac{\Sigma \bar{x}^4 n_i}{\Sigma n_i} + 1 = \\ &= 4\nu_1 + 6\nu_2 + 4\nu_3 + \nu_4 + 1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

дає змогу сформулювати правило контролю обчислень, яке зводиться до визначення різниці між сумою результатів стовпців 3, 5, 6, 7, 8 табл. 2.5 і результатом стовпця 10:

$$4 \Sigma \bar{x} n_i + 6 \Sigma \bar{x}^2 n_i + 4 \Sigma \bar{x}^3 n_i + \Sigma \bar{x}^4 n_i + \Sigma n_i. \quad (2.17)$$

Ця різниця повинна дорівнювати нулю.

Виконуючи перехід від змінних x_i до t_i одержуємо такі значення оцінок характеристик закону відмов МБЛЗ:

$$\bar{t}_0 = t_n - \bar{x}\Delta t = t_n + \frac{\sum x_i n_i}{\sum n_i} \Delta t = 50 + \frac{104}{63} \cdot 100 = 215,08;$$

$$\mu_2 = \overline{\sigma^2} = v_2 - v_1^2 = \left[\frac{326}{63} - \left(\frac{104}{63} \right)^2 \right] \cdot 100^2 = 24494,83;$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{24494,83} = 156,51.$$

Аналогічно визначаємо значення асиметрії, ексцесу та моди: для МБЛЗ $A = 0,9123$; $K = 0,26$; $t_M = 215,08$ діб.

Наявність асиметрії і ексцесу вказує на те, що експериментальний розподіл відрізняється від прийнятого теоретичного. Ця відмінність може бути випадковою, пов'язаною з обмеженою кількістю зареєстрованих відмов, або не випадковою, обумовленою неправильно обраною статистичною моделлю.

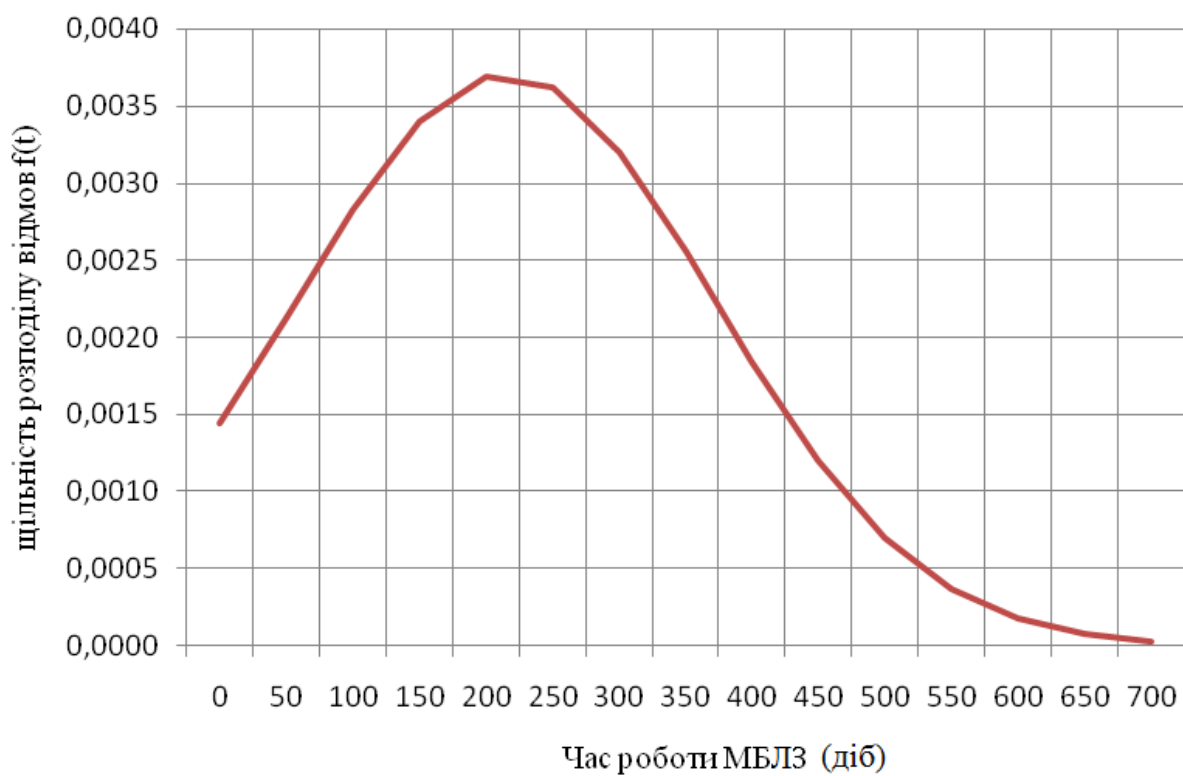
Імовірність безвідмовної роботи $p(t)$, щільність розподілу $f(t)$ і інтенсивність відмов $\lambda(t)$ при нормальному законі розподілу знаходимо за формулами:

$$p(t) = \frac{1 + \Phi\left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma}\right)}{1 + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)}; \quad (2.27)$$

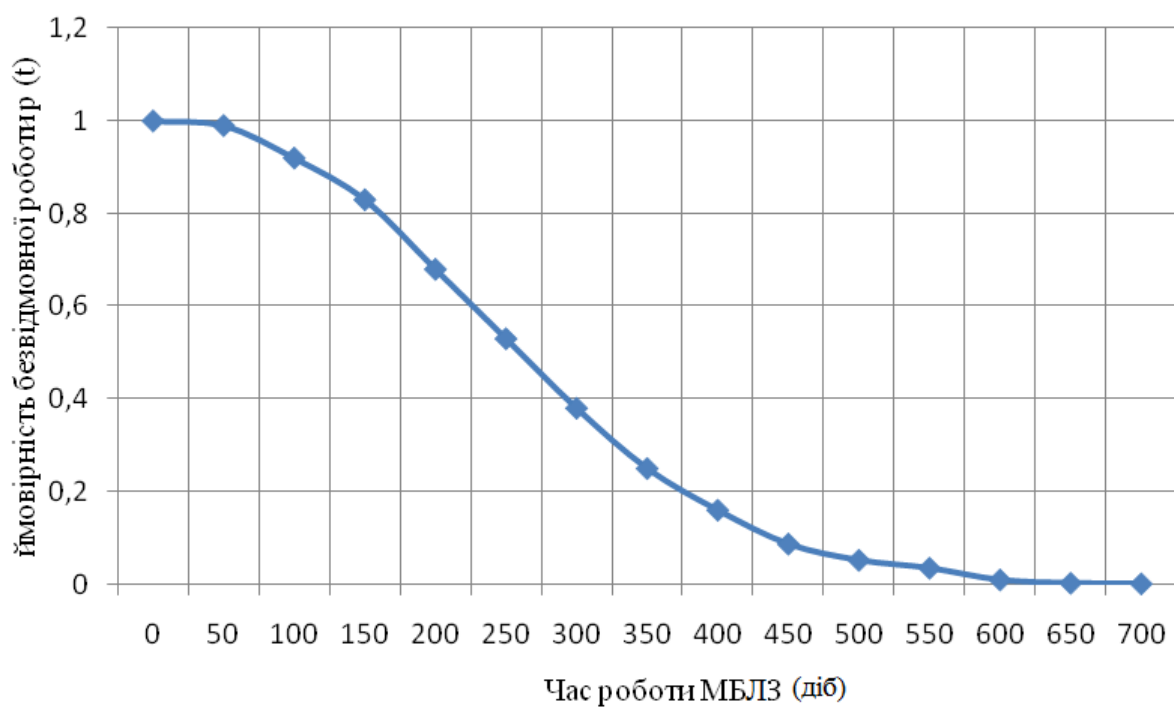
$$f(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)\right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]; \quad (2.28)$$

$$\lambda(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi\left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma}\right)\right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]. \quad (2.29)$$

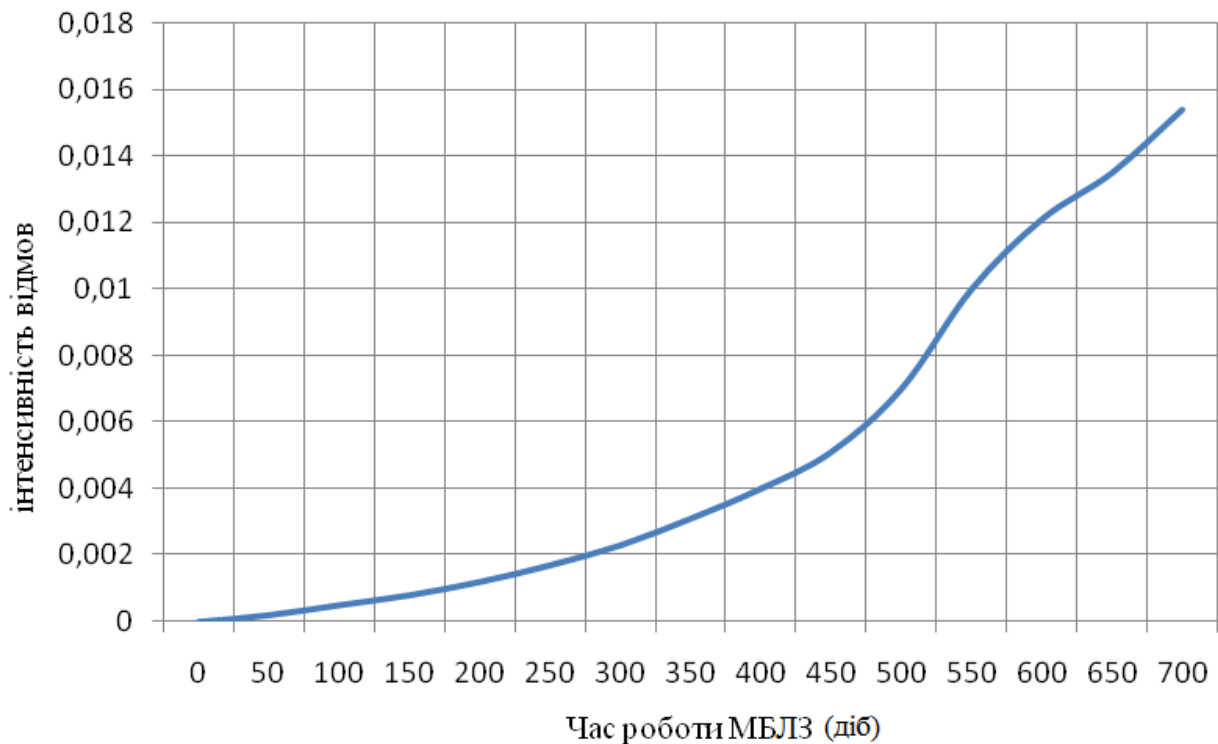
Результати розрахунків показників надійності МБЛЗ наведені на рис. 2.13.



а) щільність розподілу відмов $f(t)$ МБЛЗ



б) ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ МБЛЗ



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

Рисунок 2.13 – Показники надійності МБЛЗ.

Виконавши аналіз статистичних даних відмов МБЛЗ, встановлено, що всі показники надійності машин описуються нормальним законом розподілу.

Аналізуючи графіки рис. 2.13 маємо: щільність розподілення відмов $f(t)$ у МБЛЗ збільшується в проміжку відпрацьованого часу від 150 до 300 діб. Аналізуючи ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ видно, що вона прагне до нуля через 700 відпрацьованих діб. Відповідно інтенсивність відмов зростає до 700 годин роботи.

2.3 Висновки

Аналіз проведених досліджень надійності МБЛЗ показав, що протягом року кожна з експлуатованих машин виходять з ладу від 1 до 6 разів. При цьому ремонт, як правило, полягає в повній заміні вузла, який вийшов з ладу, і продиктований, насамперед, важкими умовами експлуатації (волога, підвищена

температура і значні навантаження) і активними корозійними процесами, що в кінцевому підсумку істотно знижує продуктивність ККЦ в цілому.

Результати досліджень дають підстави для висновків, щодо необхідності розробки вдосконалених способів відновлення машини безперервного лиття заготовок шляхом використання сучасних матеріалів, з метою скорочення терміну ремонту та підвищення ресурсу експлуатації даного обладнання. Зокрема виникає необхідність в підвищенні надійності наступних вузлів МБЛЗ за рахунок використання нових технологій відновлення:

- опорної поверхні вузлів підшипників роликів вторинного охолодження та роликів горизонтального відділення, механізму хитання кристалізатору;
- опорної поверхні під кристалізатором та герметизації водо постачальних каналів для охолодження.
- металевих конструкцій зони вторинного охолодження та колони поворотного сталеразливочного стенду.

Для рішення цього завдання використання необхідно провести дослідження по вивченню фізико-механічних властивостей матеріалів, що використовуються для відновлення робочих поверхонь машини безперервного лиття заготовок, а також розробити технології, які дозволять відновити обладнання протягом 48 годин.

Тому у подальшому реалізована така послідовність досліджень механічних характеристик композитних матеріалів, які можуть бути застосовані для відновлення вузлів машин безперервного лиття заготовок:

- дослідження можливості відновлення підшипникових вузлів композитними матеріалами в умовах дії ударних та вібраційних навантажень;
- дослідження можливості відновлення герметичності опорних плитовин механізму хитання кристалізатора;
- дослідження можливості захисту броні та металоконструкції зони вторинного охолодження МБЛЗ за допомогою композитного матеріалу;

- експериментальне визначення корозійної стійкості ремонтного матеріалу.

На підставі отриманих результатів досліджень, розробити технології відновлення вузлів машини безперервного лиття заготовок з використанням композитного матеріалу, котрі підвищать експлуатаційної надійність.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Алгоритм дисертаційної роботи

В подальшому реалізовано таку послідовність виконання дисертаційної роботи.

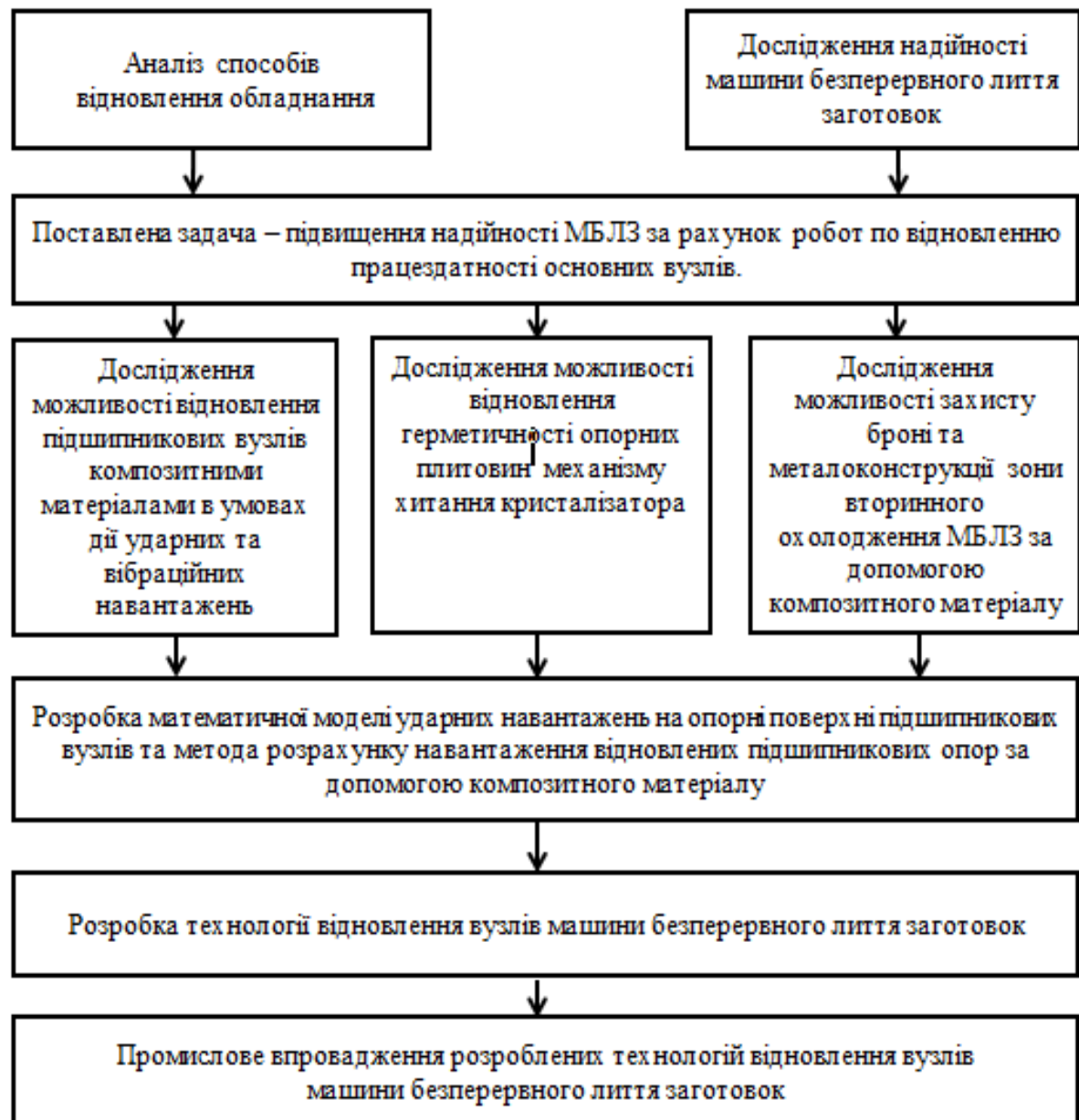


Рисунок 3.1 – Структурно–логістична схема роботи

3.2 Обладнання та методи дослідження механічних властивостей композитних матеріалів для відновлення деталей металургійного обладнання

Динамічні навантаження в приводах металургійних машин істотно впливають на їх надійність і довговічність. У деяких випадках значення динамічних навантажень в 5 - 8 разів перевищують статичні навантаження [68], необхідні для реалізації технологічної операції. У цих випадках, саме динамічні навантаження обмежують можливості інтенсифікації режимів роботи машин і їх надійність. Оцінку значень навантажень можна виконати шляхом проведення натурних експериментів на діючому обладнанні, однак найчастіше це збільшує трудомісткість досліджень і у більшості випадків є просто неможливим. У той же час, значна частина подібних досліджень може виконуватися аналітичним шляхом на базі розробки розрахункових схем, складання математичного опису електромеханічних систем приводів з нелінійними валопроводом, визначення вихідних параметрів системи (зовнішніх навантажень і характеру їх застосування), а також, визначення отриманих математичних моделей. Дослідження динаміки машин спираються на класичну теорію коливань, розвинену в працях О.М. Крилова і Н.Є. Жуковського [107]. Рішення складних нелінійних задач динаміки машин стало можливим завдяки застосуванню електронної обчислювальної техніки.

До динамічних навантажень відносяться, ті що змінюють свою величину, напрямок або місце навантаження на конструкцію [92]. У МБЛЗ є вузли, котрі виходять з ладу, внаслідок дій ударних навантажень, до них можливо віднести механізм хитання кристалізатору, та підшипникові опори сегментів роликів секцій зони вторинного охолодження. Для застосування композитного матеріалу в даних вузлах необхідно визначити, як саме поводить композитний матеріал при ударних або вібраційних навантаженнях, і тому вивченню

здатності композитного матеріалу витримувати подібні навантаження присвячено наступний розділ.

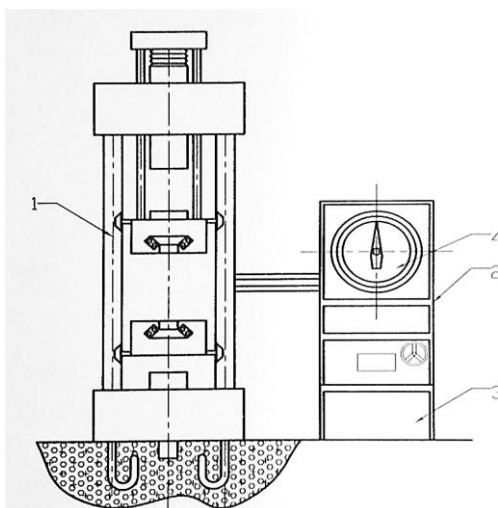
3.2.1 Обладнання та методика дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах статичного навантажень.

Для визначення несучої здатності композитного матеріалу при статичному навантаженні були використано наступне обладнання, гідравлічна розривна машина зображена на рис.3.2, коротка технічна характеристика наведена в таблиці 3.1. Зразки для дослідження несучої здатності зображенні на рис. 3.3 та 3.4. Виготовлення зразків проводилося таким чином:

Проводилася підготовка форм (рис. 3.3) для заповнення мультиметалом. Форми складаються з корпусів 1 (Сталь 45 ДСТУ 7806:2015), кришок 2 (Сталь 3 ГОСТ 380-2005) і пластмасових кілець 3, які служать для формоутворення бічних поверхонь металополімеру.

Всі деталі промиваються очищувачем (ацетоном), потім кришки покриваються шаром розділювача, який не дозволяє склеїтися кришці і корпусу, що полегшує їх розбирання після затвердіння матеріалу.

Підготовлені та оброблені форми заповнюються композитним матеріалом. Після застигання матеріалу, заповнені форми розбираються (кришка відділяється від корпусу). Корпуси з мультиметалом обробляються на токарному верстаті, за допомогою якого матеріал зрізається до потрібної висоти. Торцеві поверхні отриманого зразка (рис. 3.4) виводяться в одну площину наждачним папером.

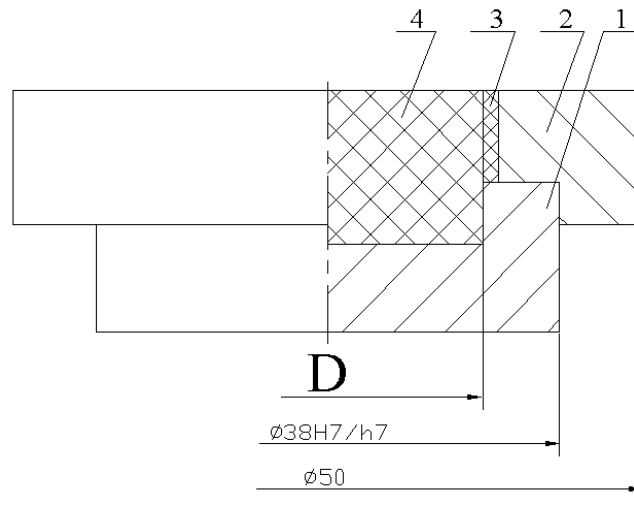


1- навантажувальний пристрій; 2 - пульт управління; 3 – насосна установка; 4 - записуючий пристрій

Рисунок 3.2 - Схема розривної машини Р-20

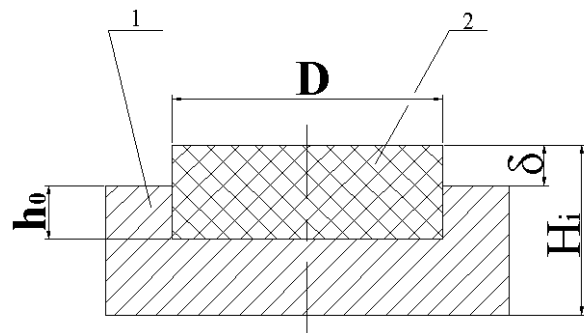
Таблиця 3.1 - Технічні характеристики розривної машини Р-20

Найменування	Одиниці виміру	Величина
1. Найбільше навантаження	Н	200000
2. Габарити машини, мм не більше Довжина Ширина Висота	мм	1553 912 2901
3. Маса машини, кг не більше	кг	1822
4. Робочий хід активного захвату (поршня), мм не менше	мм	30
5. Швидкість ходу захвату	мм/хв	300
6. Висота робочого простору при випробуванні на розтягування	мм	900
7. Найбільша відстань між опорними поверхнями при випробуванні на стиснення, в мм не менше	мм	210
8. Управління: централізоване кнопкою, рукояткою, маховиком і перемикачем	-	-



1 - корпус; 2 - кришка; 3 - пластмасове кільце; 4 - металополімер

Рисунок 3.3 - Форма для виготовлення зразків



1 - корпус; 2 - металополімер

Рисунок 3.4 - Схема випробувального зразка

Були виконані експериментальні дослідження композитного матеріалу при статичному навантаженні. Були виконанні дослідження навантаження зразків у вільному стані. Як критерій при оцінці міцності композитних матеріалів була вибрана величина конструкційної межі міцності матеріалу, а як критерій руйнування – момент появи тріщини на бічній поверхні зразків, як досягнення граничного полягання в локальному об'ємі.

Граничне напруження визначалася по формулі:

$$\sigma = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2}, \quad \text{МПа} \quad (3.1)$$

де: P – граничне навантаження, під дією якої зразок починає руйнуватися, Н;
 D – діаметр зразка на який діє навантаження, мм.

Також були виготовлені зразки у яких композитний матеріал було розміщено у замкнутому просторі металевого контейнера. Таким чином були створені, металокомпозитні зразки, які повинні мати покращені механічні характеристики. Отримані результати експериментів представлені в розділі 3.3.1

3.2.2 Обладнання та методика дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах вібраційних навантажень

Експерименти виконувалися на універсальній випробувальній машині типу ГРМ-1, схема якої показана на рисунку 3.5.

Машина являє собою установку, що складається з навантажувального пристрою 1 та пульта управління 3, які призначені для навантаження зразка і контролю за величинами навантажень та деформацій. Пульт управління включає насосну установку 5 з системою управління та шкалу навантаження 4. Для створення змінних динамічних односторонніх навантажень є пульсатор 2 - гідравлічний безклапанний одноплунжерний насос.

На рисунку 3.6 показаний фрагмент навантажувального пристрою, який складається з нижнього рухомого супорта 4 з встановленою платформою 3, яка переміщується в вертикальній площині за допомогою гвинтів. Для точної орієнтації супорта при його переміщенні використовуються гвинти 2. Навантаження здійснюється гідроциліндром 5. Попереднє піджаття зразку відбувається за допомогою гвинтового приводу нижнього рухомого супорта 4.

Навантаження месдози 1 проводилося між верхньою платформою 5 і нижньою платформою 3. Перед першим навантаженням, а також після кожного наступного, мікрометром МК 250 ГОСТ 6507-90 проводилися виміри висоти зразка. Зразки для досліджень вібраційного навантаження зображенні на рис. 3.3...3.4.

Коротка технічна характеристика універсальної випробувальної машини ГРМ-1 представлена в таблиці 3.2.

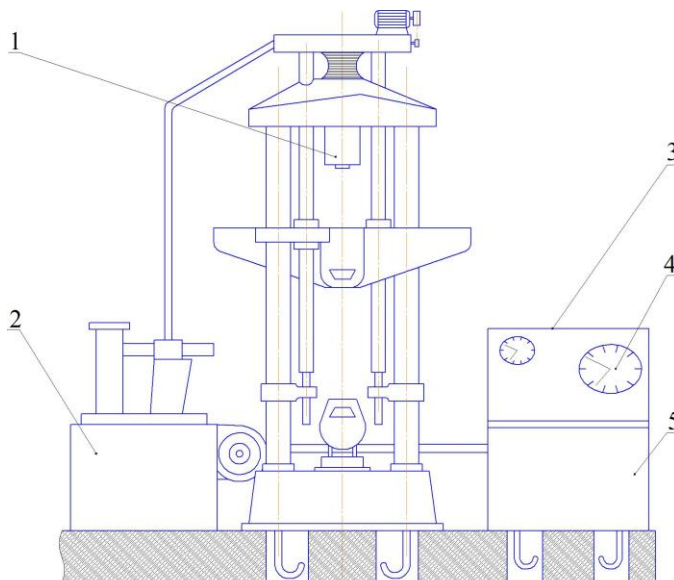


Рисунок 3.5 - Схема універсальної випробувальної машини ГРМ-1

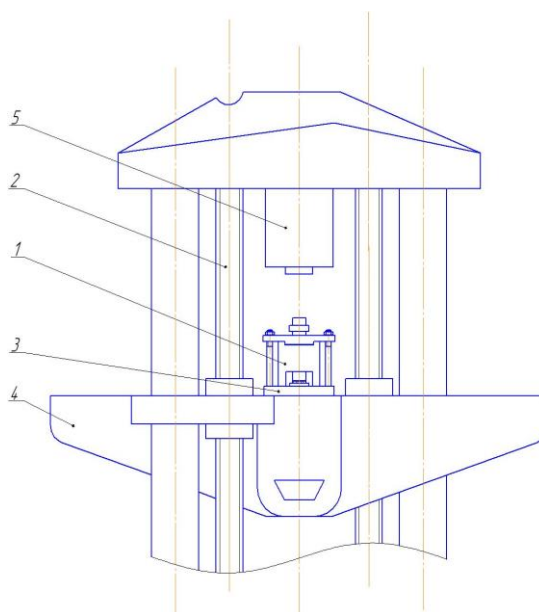


Рисунок 3.6 - Фрагмент навантажувального пристрою універсальної випробувальної машини ГРМ-1

Таблиця 3.2 - Технічна характеристика універсальної випробувальної машини ГРМ-1

Найменування	Одиниця виміру	Величина
Найбільший хід поршня	мм	265
Швидкість підйому робочого поршня	мм/с	от 0 до 100
Робочий діаметр циліндра	мм	160
Довжина	мм	2400
Ширина	мм	2000
Висота	мм	4185
Частота навантаження	циклів/хв	200-300-400-600
Вага установки	Н	53000
Потужність привода	кВт	10
Максимальна межа пульсації	кН	250
Мінімальна межа пульсації	кН	10
Максимальне зусилля при статичному навантаженні	кН	500

Для отримання енергосилових параметрів, що змінюються при проведенні досліджень на універсальній випробувальній машині ГРМ-1 використовуються тензометричні датчики типу 2ПКБ 10-200, з'єднані у мостову схему (рис.3.7). Датчики наклеєні на бойок і месдозу (рис. 3.8), подають сигнал на аналогово-цифровий перетворювач. За допомогою спеціально розроблених програм «Тензо» значення виводяться і обробляються на ЕОМ.

На рисунку 3.8 показані месдоза і бойок з наклеєними на них датчиками. На месдозу і бойок наклеювалися датчики типу 2ПКБ-10-200, у яких база 10 мм і опір 200 Ом. Кількість датчиків - 12, вони, з'єднані у мостову схему. Шість датчиків на бойку - робочі, на месдозі відповідно – компенсаційні [102].

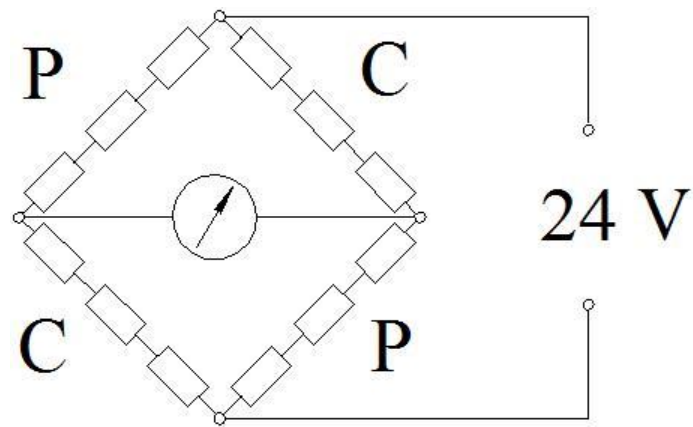
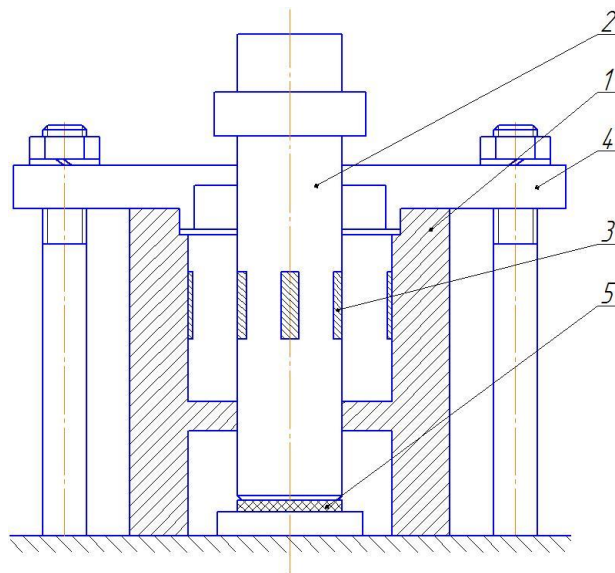


Рисунок 3.7 - Мостова схема з'єднання тензорезисторів



1 - месдоза; 2 - бойок; 3 - датчики тензометричні; 4 - планка установча;
5 - вивчаємий зразок.

Рисунок 3.8 - Месдоза з наклеєними тензометричними датчиками

Тарування месدوزи проводилось на розривній машині РМ-20. Месдоза піддавалася статичному навантаженню стискаючими зусиллями. Результати показань тензометричних датчиків наведені в таблиці 3.3.

Під час тарування, також, проводилася перевірка роботи даного вимірювального приладу.

Таблиця 3.3 - Результати тарування месдозы

Величина стискаючого зусилля, Н	Показання приладу, одиниць
0	429
8000	469
10000	481
12000	489
14000	501
16000	509
18000	517
20000	529
22000	541
24000	549
26000	561
28000	573
30000	581

На підставі отриманих даних значень розраховуємо тарувальний коефіцієнт:

$$K_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{U} \quad (3.2)$$

де, P_i - величина навантаження i -того навантаження, кгс.

U - показання приладу, од.

Тарувальний коефіцієнт для месдозы дорівнює:

$$K_M = 166.7 \text{ Н / од}$$

Експерименти проводилися в такій послідовності: зразки встановлювалися в месдозу під бойком, після чого месдоза підтискалася гідроциліндром за допомогою переміщення рухомого супорта, який переміщується за допомогою передачі гвинт-гайка. Щоб не допустити перетискання зразка, відбувалася перевірка зусилля притиснення зразка по

дисплею аналогового цифрового перетворювача «АЦП». Після цього включався привід гідроциліндра і виставлялося середнє навантаження. Потім включався пульсатор і починався відлік часу. Після 180 секунд вимикався пульсатор і гідроциліндр преса відводився в стартове положення.

Замір товщини зразків проводився в одній точці за допомогою мікрометра. Якщо висота зразка залишалася незмінною, то робився відповідний запис в журналі і зразок встановлювався назад під месдозу. Цикл повторювався на більшому значенні амплітуди. Якщо зразок деформувався, то, знову ж таки, робився запис в журналі і зразок повторно навантажувався на цій же амплітуді. Якщо результат повторювався - то досліди над цим зразком завершувалися.

Експерименти, що проводилися кафедрою МОЗЧМ, раніше показали, що металополімер в замкнутому стані здатний витримувати в два рази більші статичні навантаження ніж металополімер у вільному стані. Тому, необхідно оцінити міцність таких зразків при динамічному навантаженні.

Отримані результати експериментів представлені в розділі 3.3.2.

3.2.3 Обладнання і методика проведення експерименту з метою визначення сприйняття ударних навантажень композитним матеріалом

Експериментальне дослідження ударних навантажень було виконано на спеціальній установці розробленій на кафедрі механічного обладнання заводів чорної металургії (МОЗЧМ) ДВНЗ «Приазовського державного технічного університету», яка показана на рис. 3.9

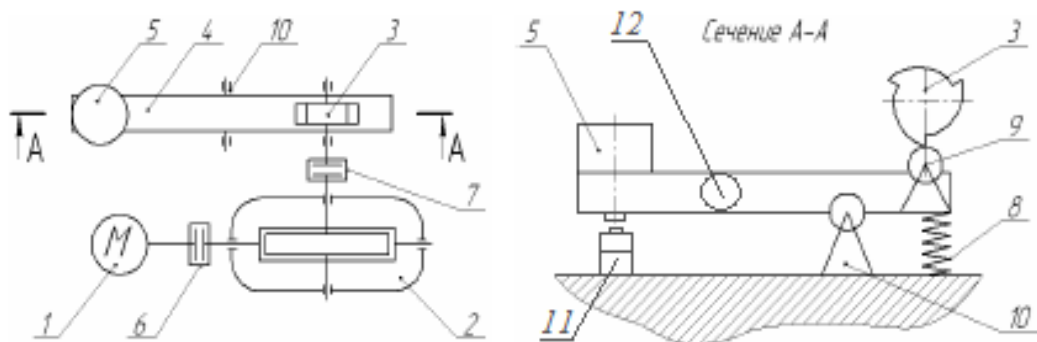


Рисунок 3.9- Кінематична схема ударної установки.

Ударна установка складається з консольної балки 4 (поперечний переріз швелер), що приводиться в коливальний рух за допомогою кулачка 3. Кулачок контактує із закріпленим на балці роликом 9. Балка гойдається на опорах 10. На одному плечі балки закріплений ролик 9, на другому – вантаж 5, кулачок приводиться в обертання за допомогою електродвигуна 1, через черв'ячний редуктор 2 і моторну муфту 6, і корінну муфту 7 типу МУВП. На кінці балки кріпиться вантаж 5. Крім того, в установці введено силове замикання кулачка у вигляді пружини 8. Під час роботи установки удар сприймає зразок 11, показаний на рис. 3.10, а величину прискорень фіксують за допомогою акселерометра 12, схема якого показана на рис.3.11. Сама ударна установка змонтована на станині, яка представляє собою сталевий сляб розмірами 1210x500x250 мм та вагою 1170 кг. Технічні характеристики установки представлені в табл. 3.4

Таблиця 3.4 - Технічна характеристика ударної установки

Найменування показника	Од. виміру	Величина
1. Частота коливань консольної балки	хв ⁻¹	114
2. Діапазон вантажів прикріплених до балки	кг	до 20
3. Тип електродвигуна		4А71В2
4. Номінальна частота обертання валу	хв ⁻¹	1500
5. Номінальна потужність	КВт	2
6. Тип редуктора		РЧУ-63
7. Передавальне число		40

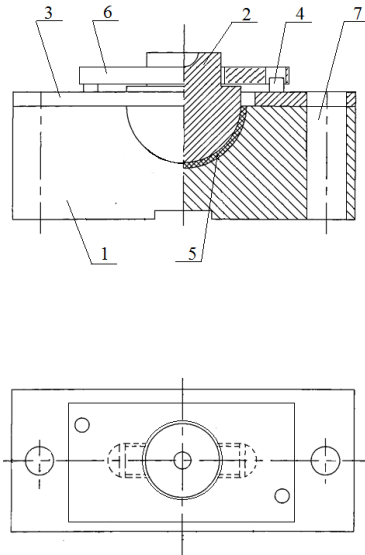


Рисунок 3.10 - Конструкція пристосування для виміру ударних навантажень в підшипниковому гнізді

Конструкція, яка навантажується складається з корпусу 1, бойка 2, що є моделлю зовнішнього кільця підшипника, який центрується в отворі, виконаному в притискній планці 3. Притискна планка 3 центрується штифтами 4, пластина 6 запобігає зміщенню бойка 2, установка кріпиться до основи через отвір 7. В корпусі 1, який є моделлю відновленої підшипникової опори, зроблений паз, і закладений полімерним ремонтним матеріалом 5 Multimetall Stahl 1018 фірми «Діамант» (Німеччина). Інший варіант виконання корпусу 1 полягає в відсутності шару полімеру і в цьому випадку удар буде сприйматися металевою поверхнею підстави.

Під час випробувань для визначення прискорення вантажу, під час удару використовувався інерційний датчик фірми Analog Device (США) типу AD XL 150AQC з наступною технічною характеристикою:

- межа вимірювання - ± 50 g;
- вихідний сигнал - напруга - U, в;
- чутливість - 38 мВ / g;
- живлення – 4...6 В, <2А;
- маса датчика - 12 г.

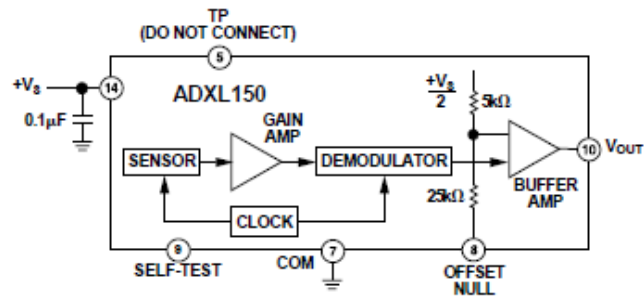
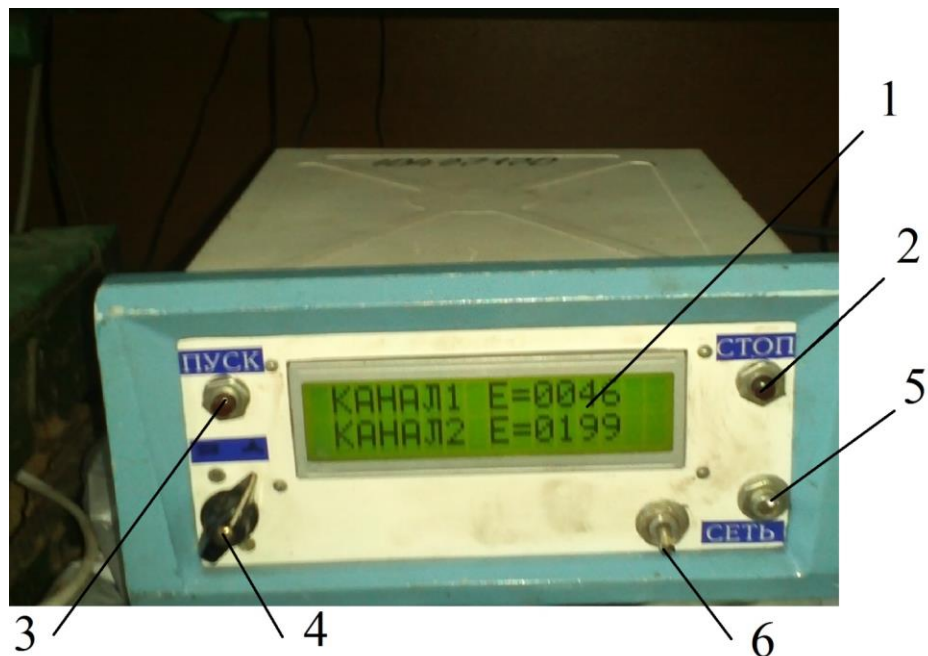


Рисунок 3.11 - Електрична схема акселерометру

Для запису свідчень з вимірювальної апаратури використовується аналоговий цифровий перетворювач показань на рис. 3.12. До нього, за допомогою комутаційного дроту, можливе підключення апаратури. Для проведення експерименту використовуємо п'єзоелектричний акселерометр і блок попереднього посилення показаний на рис. 3.13. До АЦП через порт RS-232 підключаємо кабель до ПК. Та запис свідчень отримуємо за допомогою програми TENZO.

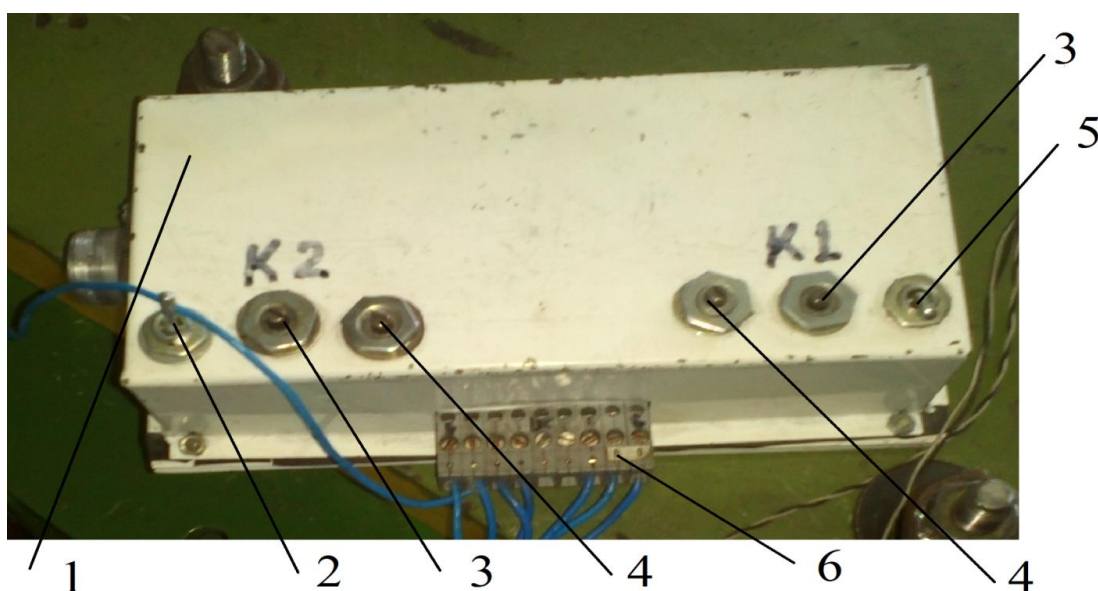


1 - дисплей АЦП; 2 - кнопка зупинки запису; 3 - кнопка початку запису; 4 - перемикач режимів роботи; 5 - вимикач приладу; 6 - регулятор чутливості.

Рисунок 3.12 - Аналоговий цифровий перетворювач

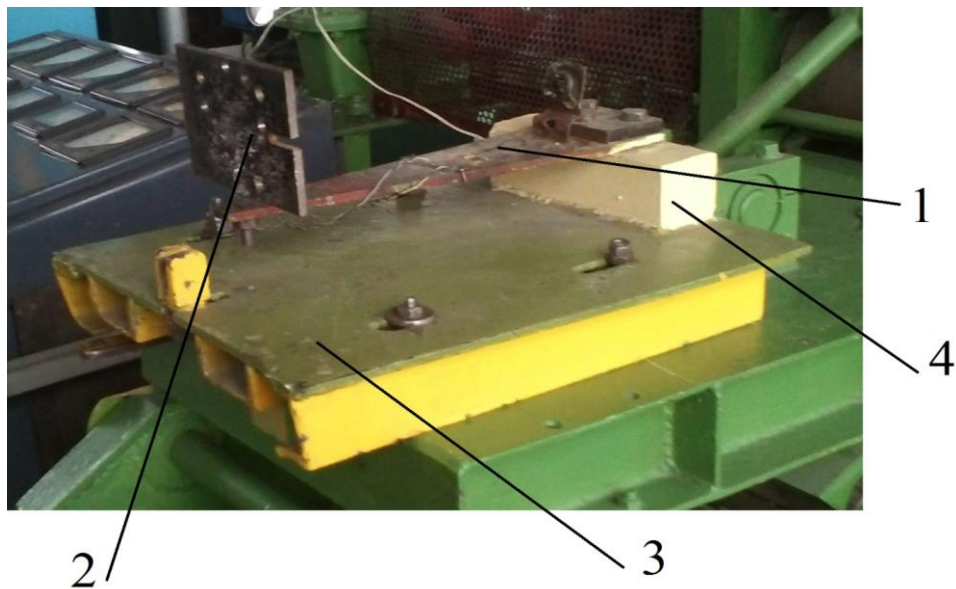
Таблиця 3.5 - Комутації дротів від АЦП

ШР-10	ШР-7	ШР-4	Позначення
1	4	4	1 канал
2	3	3	Загальний
3	7	-	
4	-	-	
5	5	-	
6	1	1	2 канал
7	-	-	+12V
8	2	2	
9	-	-	-12V
10	6	-	F



1 - корпус; 2 - перемикачі; 3 - зсув показань; 4 - регулятор нуля;
 5 - перемикач першого каналу; 6 - вхідний блок.

Рисунок 3.13- Блок попереднього посилення



1 - балочка рівного опору; 2 - місце закріплення акселерометра;
3 - плита; 4 - фундамент.

Рисунок 3.14- Вібростенд для тарування акселерометра

Для тарування акселерометра за допомогою балочки рівного супротиву проводиться підключення апаратури згідно з рисунку 3.15

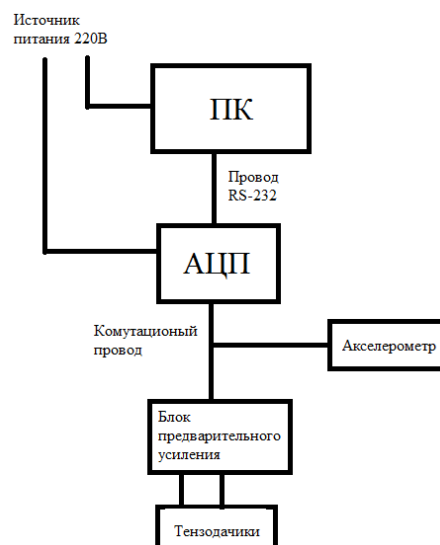


Рисунок 3.15 - Схема підключення вимірювальної апаратури.

Тарування акселерометру здійснюється шляхом деформації балочки за допомогою спеціального важеля на певну величину прогину, яка вимірюється індикатором годинного типу (ціна ділення 0,01 мм, відхилення балочки в точці установки акселерометра становить 4 мм). При цьому фіксуються показання приладу, який реєструє деформацію балочки за допомогою тензодатчиків, включених в схему посилення живлення моста 25 В.

Таблиця 3.6 - Результати вимірювань переміщень кінця балочки

Показання індикатору, мм	0	1	2	3	4
Показання прибору, діл.	50	47	44	41	38

Таким чином, 1 мм переміщення балочки дорівнює 3 контрольним позначкам приладу. Тарувальний коефіцієнт дорівнює:

$$K_h = 1 / 3 = 0.333 \text{ мм / дел.} \quad (3.3)$$

Тарування акселерометра за допомогою даного стенду проводиться в наступному порядку. Записуються переміщення при вільних коливаннях балочки за допомогою тензодатчиків, наклеєних на балочку. Записуються показання акселерометра. За допомогою тарувального коефіцієнта, розраховуються істинні переміщення балочки. За отриманими записами розраховується власна частота коливань балочки (для даної балочки). Розраховуються максимальні прискорення коливань балочки в крайніх точках за формулою:

$$A_{\max} = h \times \frac{2 \times \pi \times v^2}{1000} \quad (3.4)$$

де, h- величина відхилення балочки, мм.

За отриманими значеннями дійсних прискорень і показаннями акселерометра розраховується тарувальний коефіцієнт.

Таблиця 3.7- Тарування акселерометра

Відхилення балочки, діл	63	59	55	52
Відхилення балочки, мм	5	3,66	2,33	1,33
Показання акселерометра, діл	28	23	11	8
Прискорення, м/с ²	88,2	72,45	34,65	25,2
Тарувальний коефіцієнт, мм/с ² /діл	3,15	3.15	3.15	3.15

Середній тарувальний коефіцієнт акселерометра дорівнює

$$K_a = 3.15 \frac{\text{мм} / \text{с}^2}{\text{діл}}$$

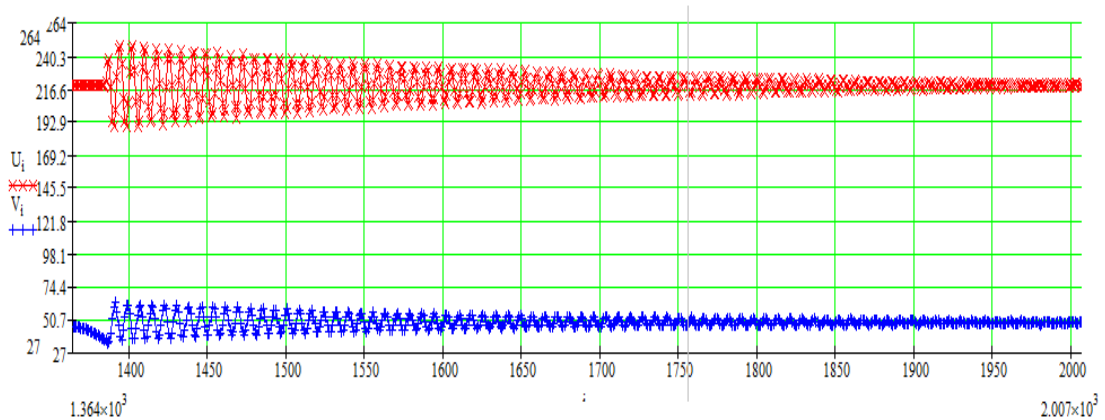


Рисунок 3.16-Тарировочна осцилограма акселерометра.

Отримані результати експериментів представлені в розділі 3.3.3

3.2.4 Устаткування та методика досліджень адгезійної міцності композитного матеріалу

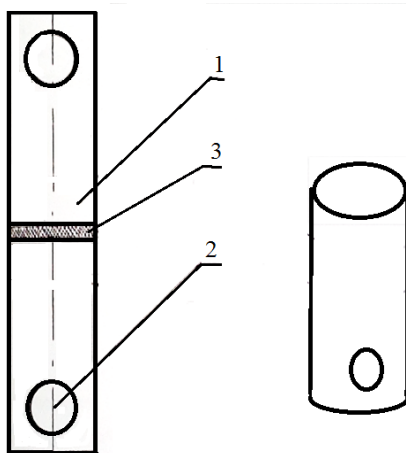
Визначити рівномірну адгезійну роботу між полімером і твердим тілом, в переважній більшості випадків, не представляється можливим, через дуже високу в'язкість полімерів. Тому стосовно до полімерів визначають не адгезію, а адгезійну міцність [72]. Вона вимірюється як питома робота або питома сила руйнування зв'язку між адгезивом і основою. З практичної точки зору при використанні полімерів в якості клеїв, важлива не робота адгезії, а механічна міцність зв'язку полімеру з іншою поверхнею.

Однак, при механічному руйнуванні адгезійного з'єднання, робота, що витрачається на відшаровування двох тіл, йде не тільки на подолання адгезії, а й на інші побічні процеси (деформація тіла, подолання сил механічних зачеплень, тощо). Тому не тільки величини, а й поняття адгезії і адгезійної міцності не тотожні, і їх потрібно чітко розмежовувати.

Дослідження адгезійних здібностей композитних матеріалів проводиться на розривній машині Р-20, яка показана на рисунку 3.2.

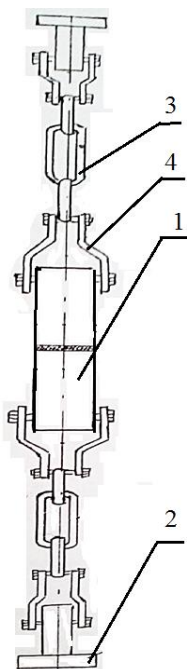
Дослідження адгезійної міцності металополімерних матеріалів виконувалося за допомогою спеціального зразка, зображеного на рисунку 3.17

Зразок надає собою металевий стрижень діаметром 20 мм, в місці нанесення металополімерного матеріалу діаметр 20 мм. Загальна висота зразка 45 мм, затиск зразка в розривній машині Р-20 здійснюється за допомогою спеціальних захватів. Конструкція цих спеціальних захватів запобігає вигину зразків при їх навантаженні, в результаті чого виходить чистий розрив зразків.



1 - зразок сталевий; 2 - отвір для захвату зразків; 3 - шар полімеру.

Рисунок 3.17 - Зразок для дослідження адгезійної міцності металополімерного матеріалу



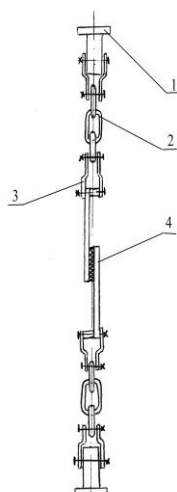
1 - зразок; 2 - пристосування для захвату притискними губами на пресі Р-20; 3 - ланцюг; 4 - планки кріпильні

Рисунок 3.18 – Захват для затиску зразка



1 - зразок сталевий; 2 - отвір для фіксації; 3- шар полімеру

Рисунок 3.19 - Зразки для дослідження адгезійної міцності



1 - захвати; 2 - ланцюг; 3 - планки кріпильні; 4- зразок

Рисунок 3.20- Схема закріплення зразків

Таблиця 3.8 - Технічна характеристика матеріалу ґрунт ННК-7053F

Щільність матеріалу	1,3-1,5 г/см ³
Міцність на стискання	80 МПа
Міцність на вигин	60 МПа
Температурна стійкість	від -20 до +120С
Час затвердіння	24 год.

Планування експерименту

В результаті даного експерименту визначаємо вплив знежирювачів на адгезійну міцність. Зразки для проведення експерименту показані на рисунку 3.17 діаметром 20 мм. В ході експерименту визначається відмінність між знежирюванням та способом підготовки поверхні, їх вплив на адгезійну міцність полімеру. В ході експерименту зразки навантажені до руйнування шару полімеру і зафіксоване значення межі руйнування шару полімеру. Розрахована адгезійна міцність за формулою 3.5

Адгезійна міцність полімеру:

$$\sigma = \frac{F \times g}{S}, \text{ МПа} \quad (3.5)$$

де, F- витримане навантаження, кгс;

g=9.80665- прискорення вільного падіння, м/с²;

S- площа поверхні, мм²;

Методика проведення експерименту

- Для проведення експерименту використані зразки котрі зображені на рисунку 3.17;

- поверхня зразків була оброблена на токарному та точильному верстаті;
- після обробки порошок була знежирена різними знежирювачами;
- попередньо надіта пластикова обичайка, яка дозволяє центрувати зразки;

- був підготовлений полімер Multimetall stahl 1018 характеристика полімеру; приведена в таблиці 1.1;
 - після був встановлен дріт товщиною 0,5 мм для дотримання однакового зазору між зразками;
 - потім був нанесений полімер, щоб вкрився дріт, потім встановлюється другий зразок і за допомогою пластикової обичайки виробляємо центрування зразків;
 - Зразки залишаються до повної полімеризації на 48 годин;
 - після видаляємо пластикову обичайку;
 - встановлюємо зразок на розривну машину Р-20 за допомогою спеціального пристосування зображеного на рисунку 3.18;
 - після розміщення виконуємо навантаження зразків до руйнування полімеру, отримані значення наведені в таблиці;
 - згідно отриманих даних виконується розрахунок адгезійної міцності по формулі 3.5;
 - розрахункові значення усереднюються і будуються діаграму;
 - завдяки діаграм можливо зробити висновки.
- Отримані результати експериментів представлені в розділі 3.3.4.

3.2.5 Устаткування та методика дослідження корозійної стійкості композитного матеріалу

Для визначення схильності до корозії різних несучих елементів металоконструкцій розробляються розрахункові схеми, вони характеризують пошкодження корозією на різних ділянках.

Початковий стан зразків характеризується наступними параметрами:

- необхідні параметри зразків при дослідженні корозії: довжина L , мм; ширина B , мм; маса до експерименту M_0 , г; маса після експерименту M_1 , г.
- фізичні параметри матеріалу: міцність, зварюваність, теплопровідність, чистота обробки поверхні, тріщиностійкість та інше.

- властивість робочого середовища: тиск P ; температура T ; корозійна активність та інше.

В результаті корозії утворюється шар прокородованого матеріалу відповідної товщиною S_1 (рис 3.21). Утворюється шар матеріалу з фізичними, механічними, тепловими властивостями матеріалу, що відрізняються від властивостей досліджуваного матеріалу. Корозія, яка протікає, може бути різного виду (від рівномірної хімічної до міжкристалічної і фреттинг-корозії). Найбільш схильне до корозії обладнання, котре працює в зоні вторинного охолодження (ЗВО) металу, та котре контактує з водою, до них відносяться металоконструкція ЗВО та опорні плитовини під кристалізатором.

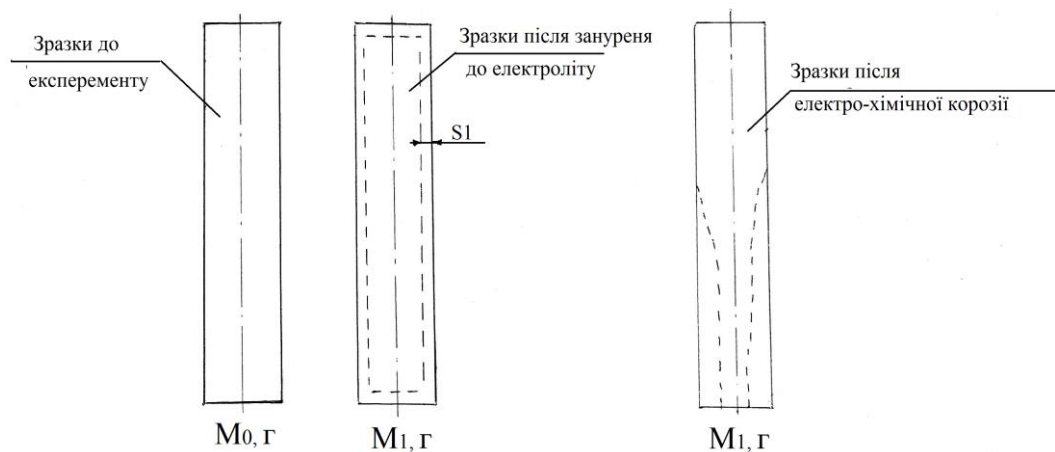


Рисунок 3.21 - Види зміни зразка при корозії.

Для оцінки корозійних руйнувань зразків використовується гравіметричний метод [48].

Глибина корозійних руйнувань зразків визначалася за формулою:

$$\delta_{ki} = \frac{M_0 - M_i}{S \times \rho} \times 10, \quad (3.6)$$

де δ_{ki} - глибина корозійного руйнування зразка в момент огляду, мм;

M_0 - початкова маса зразка, г;

M_1 - маса зразка в момент огляду, г;

S - поверхня зразка, що знаходиться в контакті з рідиною, см^2 ;

ρ - щільність матеріалу, $\text{г} / \text{см}^3$.

Середня швидкість проникнення корозії визначається за формулою:

$$v_{\text{л}} = \frac{\delta_i}{\tau_i} \times 8760, \quad (3.7)$$

де $V_{\text{л}}$ - середня швидкість проникнення корозії, мм/рік ;

δ_i - глибина корозійного руйнування зразка відповідно за час τ_i , мм ;

τ_i - час від початку випробувань до даного проміжного огляду, год. ;

8760 - тривалість одного року, год.

Апроксимація глибини корозійних руйнувань зразка дрібно-лінійною залежністю (3.7) виконується методом найменших квадратів.

Шляхом нескладних перетворень отримані наступні вирази:

$$\delta_{\text{к.у}} = \frac{n \sum_{i=1}^n \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i^2}{\delta_{ki}^*} - \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\delta_{ki}^*}}, \quad T = \frac{1}{n} \left(\delta_{\text{к.у}} \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\delta_{ki}^*} - \sum_{i=1}^n \tau_i \right) \quad (3.8)$$

де δ_{ki}^* - середні експериментальні значення глибин корозійних руйнувань.

Динаміка розвитку корозійного процесу для конкретного агресивного середовища з достатньою для інженерної практики точністю описується дрібно-лінійною функцією, запропонованою Л.Я. Цікерманом [48], що має вигляд:

$$\delta_{\text{к}} = \delta_{\text{к.у}} \frac{\tau}{\tau + T} \quad (3.9)$$

де $\delta_{\text{к}}$ - глибина корозійних руйнувань;

$\delta_{к.у}$ - що встановилася глибина корозійних руйнувань при нескінченно тривалому часу корозії металу;

τ - поточний час;

T - постійна часу перехідного процесу.

Таким чином схема залежності корозійного руйнування (інтегрального показника) у від часу зображення на рис 3.22 згідно ГОСТ 9.908-85.

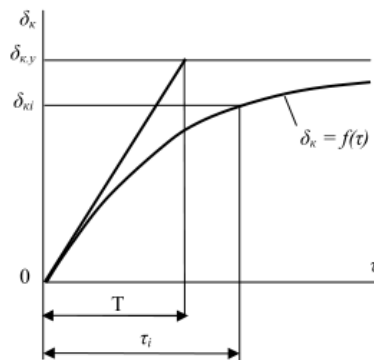
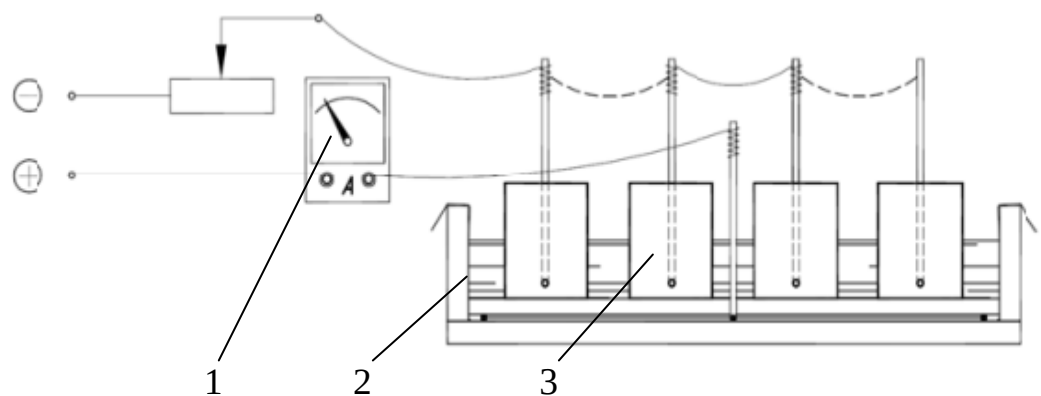


Рисунок 3.22 - Наближений характер кінетичної кривої корозія – час.

Найбільша відносна похибка розрахунку не повинна перевищувати 15%, причому, така похибка повинна спостерігатися в початковий момент випробувань, тобто в період несталого процесу корозії.

Для дослідження захисту від корозії і інтенсивності корозії металу, була створена лабораторна установка для електро-хімічної корозії, дана корозія є найбільш інтенсивною порівняно з іншими видами корозії.



1- джерело постійного струму; 2- хімічностійка ємність; 3- зразки.

Рисунок 3.23 - Схема установки для випробування на корозійний знос

Для дослідження корозії використовувалися сталеві зразки квадрату ГОСТ 2591-2006 зі Ст3-кп ГОСТ 535-2005 довжиною 100мм зображені на рис. 3.24. Зразки перед дослідженням попередньо зважувалися та вимірювалися, отримані дані заносилися у таблицю. Зразки захищалися різними матеріалами, такими як полімерне покриття, нітроемаль, і без покриття.



Рисунок 3.24 – Зразки для проведення експерименту корозійного зносу

Лабораторна установка дозволяє визначити ефективність захисного покриття матеріалу ДК-2 вітчизняного виробництва, технічні характеристики якого приведені у таблиці 3.9, під впливом агресивного середовища, такого як електроліт та інші. Також, для визначення ефективності захисного покриття, експеримент проводять разом з незахищеним зразком. Зразки піддаються трьом видам корозії: електрохімічній корозії, хімічній корозії, і корозії на відкритому повітрі.

Таблиця 3.9 – Технічні характеристики захисного покриття ДК-2

Час використання композиції (при $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) хв		40
Щільність суміші, г/см ³	рідкий	1,3- 1,55
	пастоподібний	1,8 – 2,0
Час затвердіння при температурі 20°C		24 години
Термостійкість покриття, $^{\circ}\text{C}$		от – 20 до + 90

Методика проведення експерименту електрохімічної корозії.

Для проведення експерименту електрохімічної корозії необхідне джерело постійного струму з регулюванням сили струму, джерело повинно бути заземлено для забезпечення безпеки. Установка показана на рисунку 3.25.



1- джерело постійного струму; 2- хімічностійка ємність

Рисунок 3.25 - Лабораторна установка для визначення електрохімічної корозії.

Перед експериментом зразки були підготовлені, механічно оброблені, знежирені та захищені за допомогою композитного матеріалу, та були підключені до живлення («мінус» до захищених зразків та «плюс» до електроду).

У хімічностійку ємність наливаємо електроліт та за допомогою ареометра визначаємо щільність електроліту, яка характеризує агресивність середовища. Після нанесення захисного матеріалу, проводимо до експерименту замір маси на вагах, котрі показанні на рисунку 3.26 з технічною характеристикою наведеною в таблиці 3.10. На клему (+) приєднуємо випробовуваний зразок, на

клему (-) електрод, занурюємо зразок в ємність з електролітом і подаємо напругу. Зразки залишаємо на 24 години, після відключаємо напругу, дістаємо зразки з електроліту, протираємо до сухого стану та виконуємо повторні заміри маси. Отримані значення заносимо в таблицю, експеримент повторюємо з трьома зразками на підставі середнього значення складаємо графік зміни втрати маси зразка за годину. По закінченню експерименту робимо висновки, щодо ефективності захисту різних покриттів.



1 - ваги; 2 - тарілка; 3 - індикатор положення

Рисунок 3.26 – Прецизійні лабораторні ваги TBE-50MX-0.2

Таблиця 3.10- Технічна характеристика ваг TBE-50MX-0.2

Найменування	Од. виміру	Величина
Габаритні розміри ваг	мм	410x580
Робочий діапазон температур	$^{\circ}\text{C}$	15-25
Межі зважування	г	от 0.02 до 500
Дискретність	г	0.02
Клас точності ДСТУ		1
Межі допустимої похибки	г	$\pm 0,5 - \pm 1$

Для визначення ефективності захисту зразка при хімічній корозії, зразки, механічно обробляються, обезжирюються, і на їх поверхню наноситься захисне покриття. Після застигання покриття, зразки зважуються на вагах і занурюються в електроліт. Перед зануренням

щільність електроліту вимірюється за допомогою ареометра. Зразки занурюємо в на 24 години. Після цього зразки протираються насухо і проводиться вимір маси, результати заносяться в таблицю 3.21. Експеримент проводимо мінімум три рази для отримання середнього результату, на підставі отриманих значень будуюмо графіки. Метою експерименту є визначення впливу композитного матеріалу на корозійну стійкість сталевих зразків.

Отримані результати експериментів представлені в розділі 3.3.5.

3.3 Результати досліджень механічних властивостей композитних матеріалів

3.3.1 Результати дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах статичних навантажень

Результати експериментів з визначення статичної міцності, виконувались на установці зображеній на рис 3.2, занесені в таблиці 3.11 в якій, також, вказані: гранична напруга; висота та фактичний діаметр.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що зменшення висоти зразка істотно підвищує межу граничного напруження, при якому відбувається руйнування композитного матеріалу. Слід зазначити, що зниження напруги в композитному матеріалі відбувається нелінійно при збільшенні його висоти, наприклад, при збільшенні висоти з 2,7 до 4,5 мм напруга знижується приблизно на 10%, а при збільшенні висоти зразка в 3,8 разу здатність композитного матеріалу, що несе, знижується приблизно в 2,6 разу. Це, по-перше, свідчить про доцільність вживання при відновленні деталей композитного матеріалу з мінімально можливою його висотою, що дозволяє значно понизити його витрату досягши максимальних показників по міцності.

Таблиця 3.11 – Результати вантажень зразків діаметром 12,40 мм у вільному стані.

Висота зразка		Фактичний діаметр		Граничне навантаження		Гранична напруга	
h, мм	Δh , мм	D, мм	ΔD , мм	P, кН	ΔP , кН	σ , МПа	$\Delta \sigma$, МПа
2,70	0,05	12,50	0,05	21,98	0,04	179,2	1,5
2,80		12,45		22,25		182,9	
2,80		12,45		21,90		180,0	
3,50		12,50		20,29		165,4	1,4
3,60		12,50		20,20		164,7	
3,60		12,50		20,50		167,1	
4,40		12,55		20,06		162,2	1,3
4,40		12,55		20,10		162,6	
4,50		12,55		20,00		161,8	
6,00		12,55		16,95		137,1	1,1
6,00		12,55		16,85		136,3	
6,10		12,55		16,80		135,9	
7,20		12,60		15,38		123,4	1,0
7,20		12,60		15,45		124,0	
7,30		12,60		15,30		122,8	
8,80		12,65		12,20		97,1	0,8
8,80		12,65		12,00		95,5	
8,90		12,60		12,10		97,1	
9,50		12,65		9,90		78,8	0,7
9,50		12,65		9,81		78,1	
9,60		12,60		10,05		80,6	
10,30		12,70		8,89		70,2	0,6
10,30		12,65		8,75		69,2	
10,40		12,70		8,70		68,7	

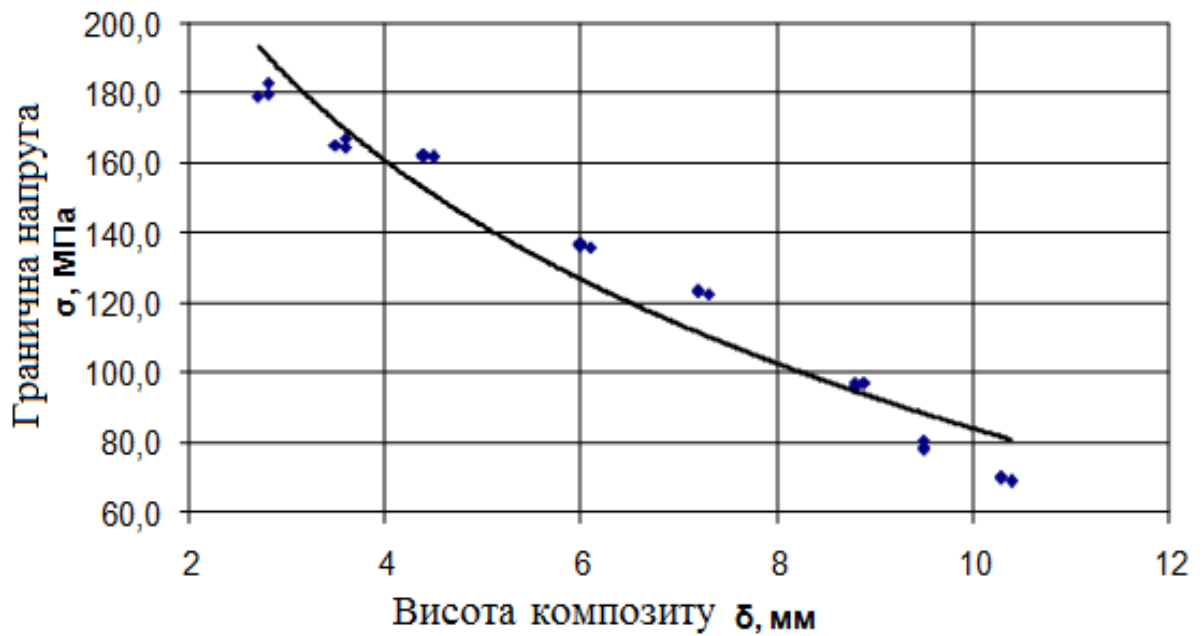


Рисунок 3.27 - Графік залежності граничного напруження σ від висоти зразків δ для композитного матеріалу у вільному стані

Таблиця 3.12 – Результати навантажень зразків металокомпозитної конструкції діаметром 12,40 мм в замкнутому стані

Висота зразка		Фактичний діаметр		Граничне навантаження		Гранична напруга	
h, мм	Δh , мм	D, мм	ΔD , мм	P, кН	ΔP , кН	σ , МПа	$\Delta \sigma$, МПа
2,5	0,05	12,55	0,05	75,6	0,1	610,5	4,8
2,6		12,55		74,3		600,9	
2,6		12,55		75,2		608,2	
3,0		12,60		66,5		533,2	4,2
3,0		12,60		66,0		529,6	
3,1		12,60		65,8		528,0	
4,0		12,65		53,9		432,4	3,4
4,1		12,60		53,2		426,9	
4,1		12,65		53,0		421,9	
4,6		12,65		45,6		362,9	2,9
4,7		12,60		45,2		362,7	
4,7		12,65		45,0		358,2	
5,0		12,65		29,92	0,04	238,2	1,9
5,0		12,65		28,00		222,9	
5,1		12,60		29,50		236,7	

Продовження таблиці 3.12

7,0		12,70		12,17		96,1	0,8
7,0		12,70		12,00		94,8	
7,1		12,60		12,20		97,9	
9,0		12,70		11,89		93,9	0,7
9,1		12,70		11,80		93,2	
9,1		12,60		11,95		95,9	

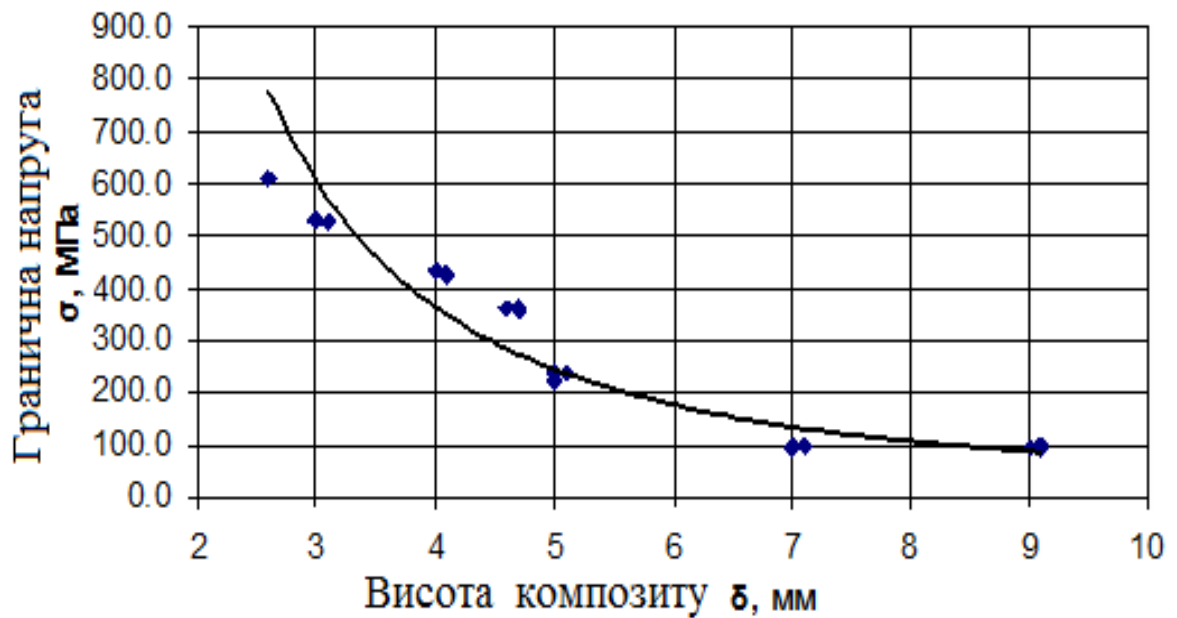


Рисунок 3.28 – Графік залежності граничного напруження σ від висоти зразків δ для композитного матеріалу в замкненому стані.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що заключення зразка в металевому контейнері, створення металокомпозитної конструкції у поєднанні із зменшенням висоти зразка, значно підвищує граничні навантаження, що витримуються такою конструкцією. Так, наприклад, при збільшенні товщини зразка до 4 мм напруги зменшуються на 30%, а при зменшенні висоти зразка з 2,5 мм до 9,1 мм здатність композитного матеріалу, що несе, знижується в 6,4 разу. При висоті зразка понад 4-5 мм несуча здатність значно зменшується.

3.3.2 Результати дослідження несучої здатності композитних матеріалів в умовах вібраційних навантажень

Результати другої серії експериментів, виконані на установці, яка зображена рис 3.15 та занесені в таблицю 3.13 в якій, також, вказані: відповідні коефіцієнти асиметрії циклу; середні напруження циклу; висота і деформація зразка; а також, амплітуди навантаження.

Таблиця 3.13 - Результати динамічного випробування зразка у вільному стані

№	Амплітуда навантаження, кН	Висота зразка, мм	Деформація, мм	Середнє напруження циклу, МПа	Коефіцієнт асиметрії циклу
Зразки висотою h = 1,98 мм при середньому навантаженні циклу 19 кН					
1	0,4	1,98	0	60,51	0,96
2	0,8	1,98	0		0,92
3	1,2	1,98	0		0,88
4	1,6	1,98	0		0,84
5	2,4	1,98	0		0,78
6	3,2	1,98	0		0,71
7	4	1,98	0		0,65
8	6	1,98	0		0,52
9	8	1,975	0,005		0,41
10	8	1,965	0,01		0,41
Зразки висотою h = 2,00 мм при середньому навантаженні циклу 15 кН					
1	0,4	2,00	0	47,77	0,95
2	0,8	2,00	0		0,90
3	1,2	2,00	0		0,85
4	1,6	2,00	0		0,81
5	2,4	2,00	0		0,72
6	3,2	2,00	0		0,65
7	4	2,00	0		0,58
8	6	2,00	0		0,43
9	8	1,99	0,005		0,3
10	8	1,98	0,01		0,3

Продовження таблиці 3.13

№	Амплітуда навантаження, кН	Висота зразка, мм	Деформація, мм	Середнє напруження циклу, МПа	Коефіцієнт асиметрії циклу
Зразки висотою h = 2,03 мм при середньому навантаженні циклу 24 кН					
1	0,4	2,03	0	76,43	0,97
2	0,8	2,03	0		0,93
3	1,2	2,03	0		0,90
4	1,6	2,03	0		0,87
5	2,4	2,03	0		0,82
6	3,2	2,03	0		0,76
7	4	2,03	0		0,71
8	6	2,03	0		0,6
9	8	2,02	0,01		0,5
10	8	2,01	0,01		0,5
Зразки висотою h = 1,96 мм при середньому навантаженні циклу 21 кН					
1	0,4	1,96	0	66,88	0,96
2	0,8	1,96	0		0,93
3	1,2	1,96	0		0,89
4	1,6	1,96	0		0,86
5	2,4	1,96	0		0,79
6	3,2	1,96	0		0,73
7	4	1,96	0		0,68
8	6	1,96	0		0,55
9	8	1,955	0,005		0,45
10	8	1,94	0,015		0,45
Зразки висотою h = 2,01 мм при середньому навантаженні циклу 17 кН					
1	0,4	2,01	0	54,14	0,95
2	0,8	2,01	0		0,91
3	1,2	2,01	0		0,87
4	1,6	2,01	0		0,83
5	2,4	2,01	0		0,75
6	3,2	2,01	0		0,68
7	4	2,01	0		0,62
8	6	2,01	0		0,48
9	8	2,00	0,01		0,36
10	8	1,99	0,01		0,36

Продовження таблиці 3.13

№	Амплітуда навантаження, кН	Висота зразка, мм	Деформація, мм	Середнє напруження циклу, МПа	Коефіцієнт асиметрії циклу
Зразки висотою $h = 2,08$ мм при середньому навантаженні циклу 26 кН					
1	0,4	2,07	0,01	82,8	0,97
2	0,8	2,065	0,005		0,94
3	1,2	2,05	0,015		0,91
4	1,6	2,04	0,01		0,88
5	2,4	2,04	0		0,83
6	3,2	2,04	0		0,78
7	4	2,03	0,01		0,73
8	4	2,02	0,01		0,73

На рис. 3.33 - 3.36 приведені типові осцилограми запису навантаження зразків, які знаходились у вільному стані при різних амплітудах з частотою 5 Гц.

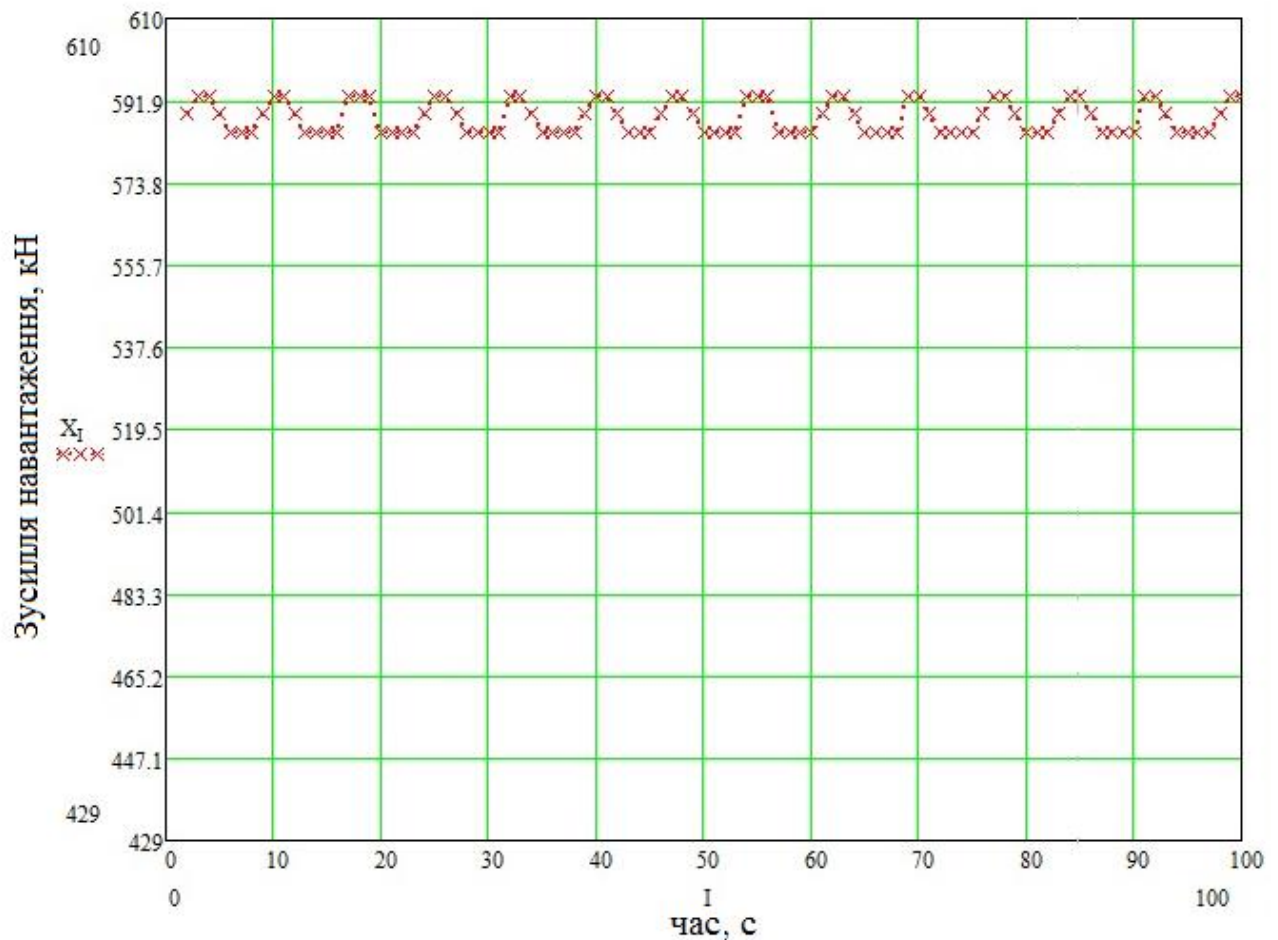


Рисунок 3.33 - Запис динамічного навантаження з амплітудою 0,8 кН

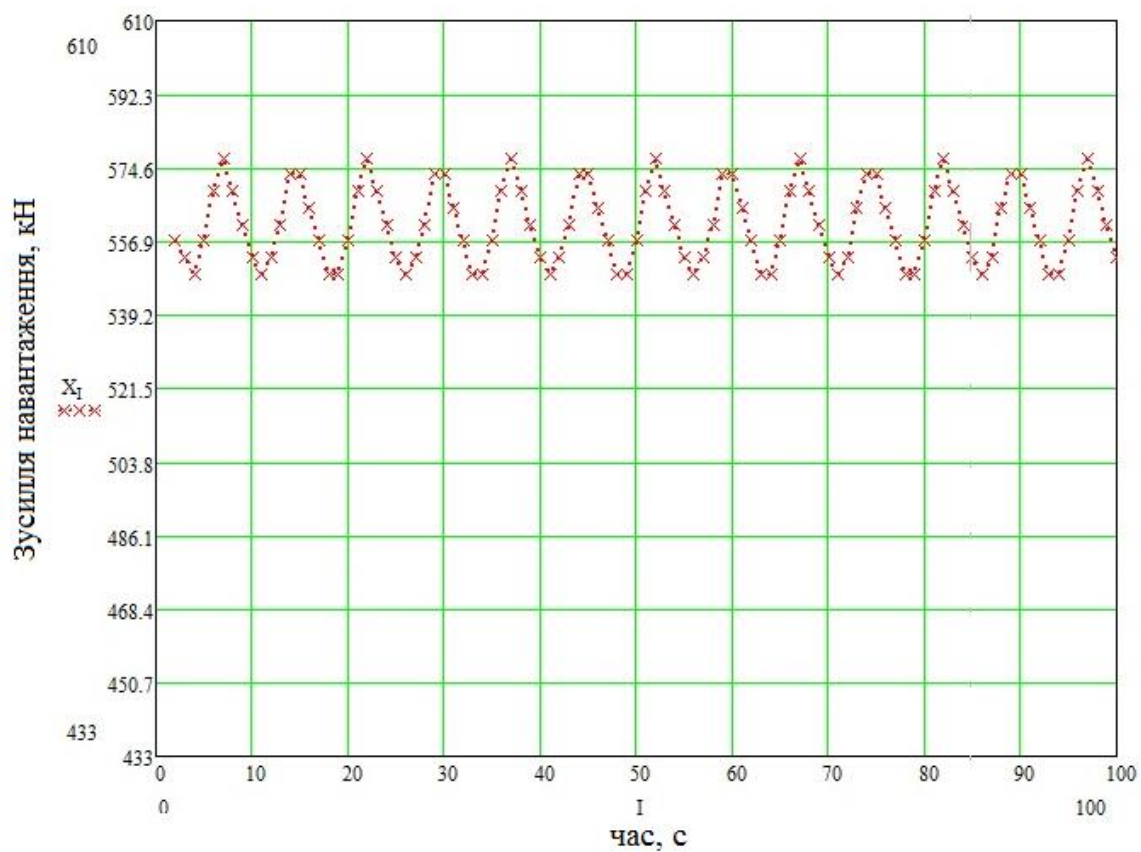


Рисунок 3.34 - Запис динамічного навантаження з амплітудою 3,2 кН

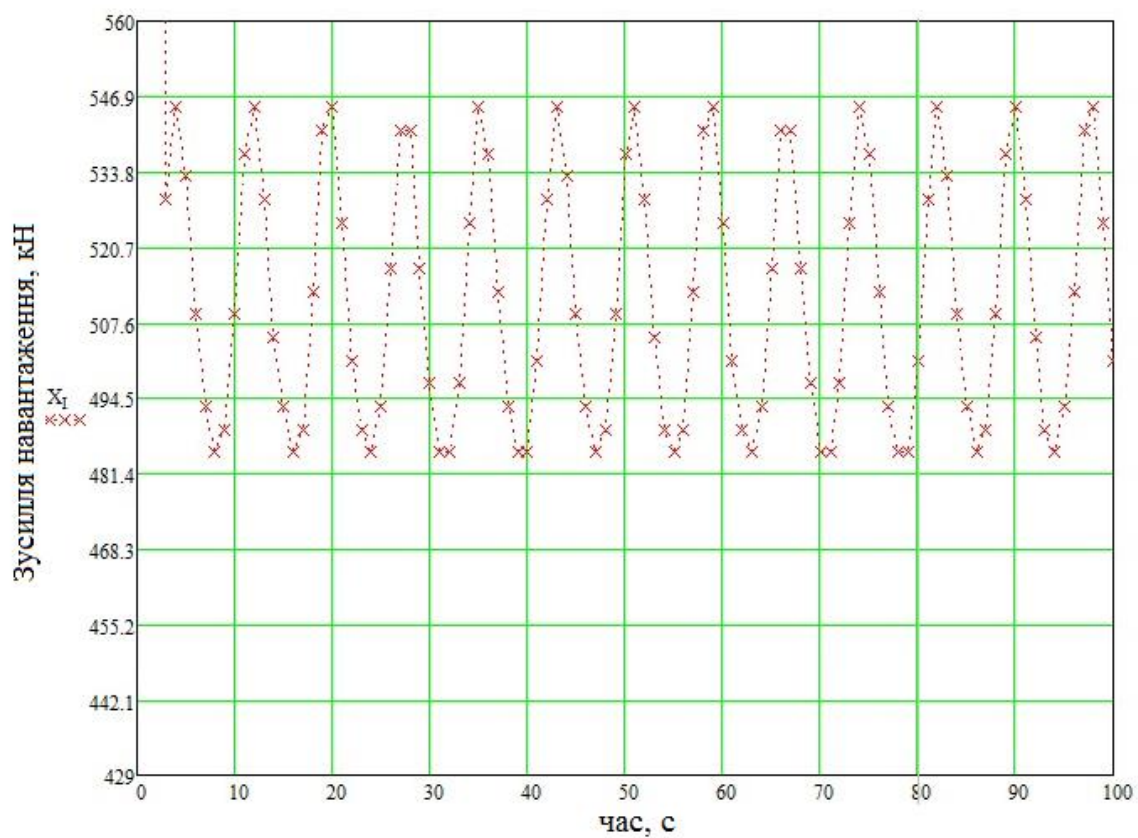


Рисунок 3.35 - Запис динамічного навантаження з амплітудою 6 кН

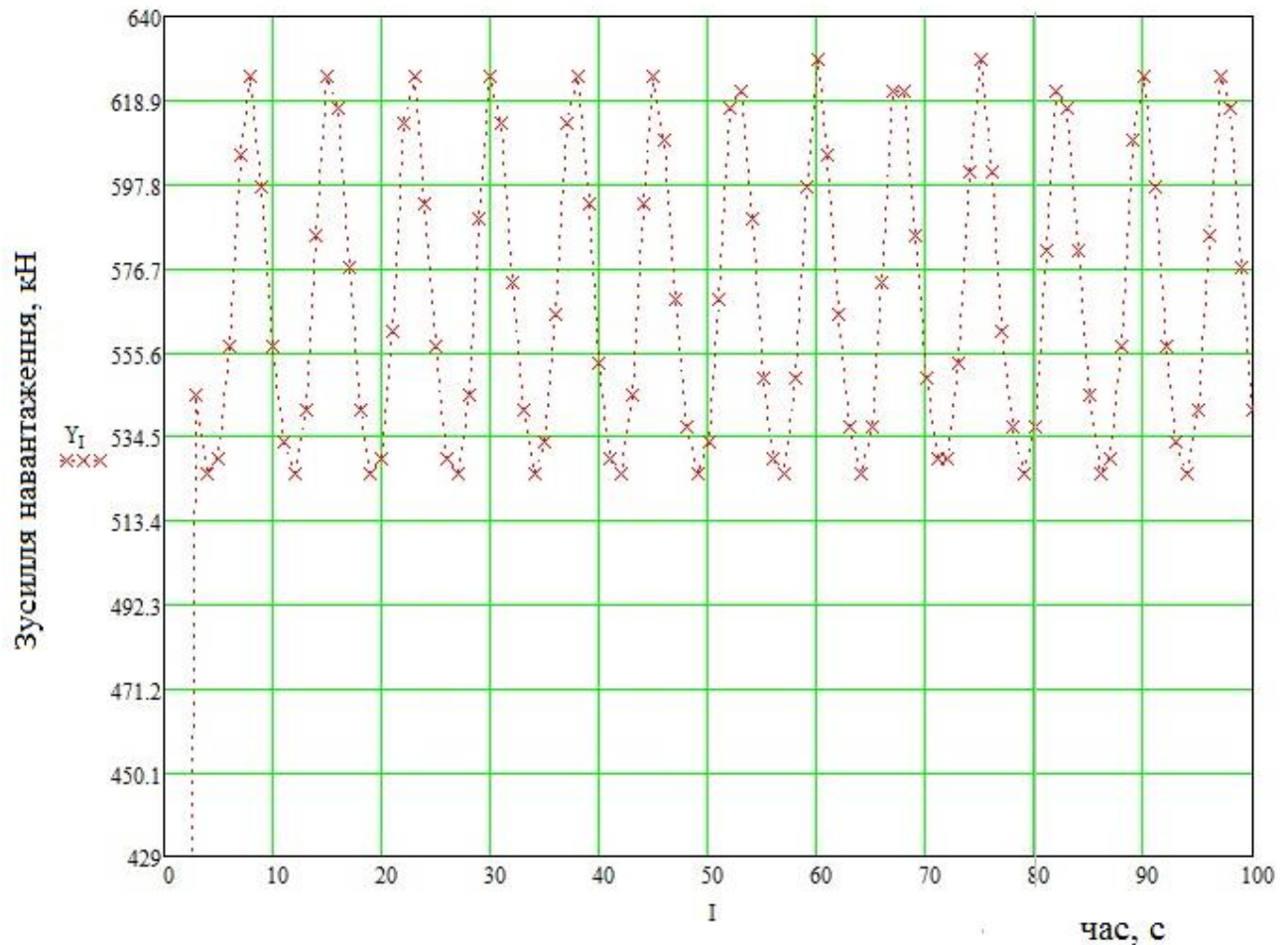


Рисунок 3.36 - Запис динамічного навантаження з амплітудою 12 кН

Підсумовуючи проведені експерименти, слід зробити висновок, що зразки композиту, перебуваючи у вільному стані, витримують тривалі циклічні навантаження без будь-яких значних слідів деформації при середньому напруженні від 47 МПа до 76 МПа. Подальше підвищення середнього напруження до 82 МПа призводить до незначної деформації зразків в межах 0,5% від початкової товщини. В той же час, становить інтерес визначення можливості підвищення несучої здатності при укладанні композиту в замкнутий об'єм.

Для експерименту бралися зразки діаметром $D = 20$ мм з перевищенням $\delta = 1$ мм і з поглибленням $h = 1$ мм, бо зразки з такими конструктивними розмірами показали найбільшу стійкість при статичних навантаженнях. Результати експериментів занесені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 - Результати динамічного випробування зразка в замкнутому стані.

№	Амплітуда навантаження, кН	Висота зразка, мм	Деформація, мм	Середнє напруження циклу, МПа	Коефіцієнт асиметрії циклу
Зразок висотою h = 12,095 мм при середньому навантаженні циклу 21 кН					
1	2,4	12,095	0	66,8	0,79
2	4	12,095	0		0,68
3	6	12,095	0		0,55
4	8	12,095	0		0,45
5	10	12,085	0,01		0,35
6	11	12,075	0,01		0,31
7	12	12,065	0,01		0,27
Зразок висотою h = 12,04 мм при середньому навантаженні циклу 26 кН					
1	2,4	12,04	0	82,8	0,83
2	4	12,04	0		0,73
3	6	12,04	0		0,62
4	8	12,04	0		0,53
5	10	12,03	0,01		0,44
6	11	12,02	0,01		0,4
7	12	12,01	0,01		0,37
Зразок висотою h = 12,03 мм при середньому навантаженні циклу 31 кН					
1	2,4	12,03	0	98,73	0,86
2	4	12,03	0		0,77
3	6	12,03	0		0,68
4	8	12,02	0,01		0,59
5	10	12,01	0,01		0,51
6	11	12,00	0,01		0,48
7	12	11,99	0,01		0,44

Виходячи з результатів динамічних випробувань металополімерного матеріалу в замкнутому стані, можна зробити наступні висновки:

- деформація зразків відбувається при амплітуді навантаження в 10 кН, при середньому навантаженні $P \leq 26$ кН.
- максимальне динамічне напруження може перевищувати на 50% максимальне напруження при статичному навантаженні та деформації металополімеру.

- зразки з «Мультиметалу» не деформуються, якщо середнє навантаження $P=31$ кН, якщо амплітуда навантаження не перевищує 6 кН.

- розміщення металополімеру в замкнутий об'єм може служити конструктивним рішенням для підвищення його несучої здатності в умовах асиметричного циклу навантаження.

Як видно з результатів експериментів, закладення композиту в замкнутий об'єм дозволяє підвищити його несучу здатність, оскільки матеріал без деформації витримує більші навантаження, ніж зразки у вільному стані. Отже, при розробці відповідних технологій застосування композитних матеріалів при відновленні опорних поверхонь з розміщенням його у локальному заглибленні, оскільки при цьому матеріал буде здатний сприймати підвищені навантаження.

В цілому підводячи підсумок проведеним експериментам, можна зробити висновок про те, що несуча здатність композитного матеріалу значно перевищує ті можливі вібраційного і теплового навантаження, які можуть мати місце при експлуатації механізму хитання кристалізатора.

3.3.3 Результати дослідження несучої здатності композитного матеріалу в умовах дії ударних навантажень

З використанням обладнання і методик, які були викладені в розділі 3.2, були проведені дослідження міцності різних композитних матеріалів при дії ударних навантажень в різних варіантах їх застосування, зокрема, були випробування матеріалів Мультиметал і Y-клей при відновленні зношеної поверхні Мультиметалом при centruванні підшипника на двох металевих маяках, а застосування Y-клею дозволило виконати оцінку використання цього матеріалу при відновленні опорних поверхонь при різних технологіях ремонту. Під час експерименту визначались величини прискорень бойка ударної установки та тривалість загасань ударних коливань у системі викликаних

ударом. Результати експерименту занесені в табл. 3.15-3.16, а на рис. 3.37-3.40 приведені типові осцилограми, записи прискорення бойка ударної установки при його зіткненні з моделлю відновленої опорної поверхні підшипникового вузла.

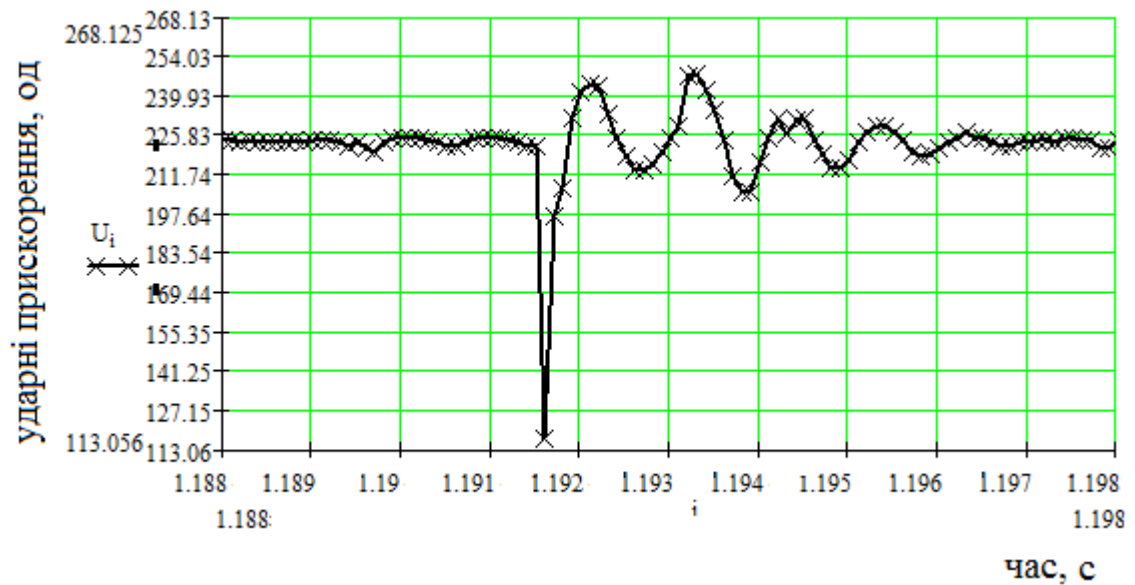


Рисунок 3.37- Типова осцилограма процесу удару об сталеву поверхню гнізда підшипника.

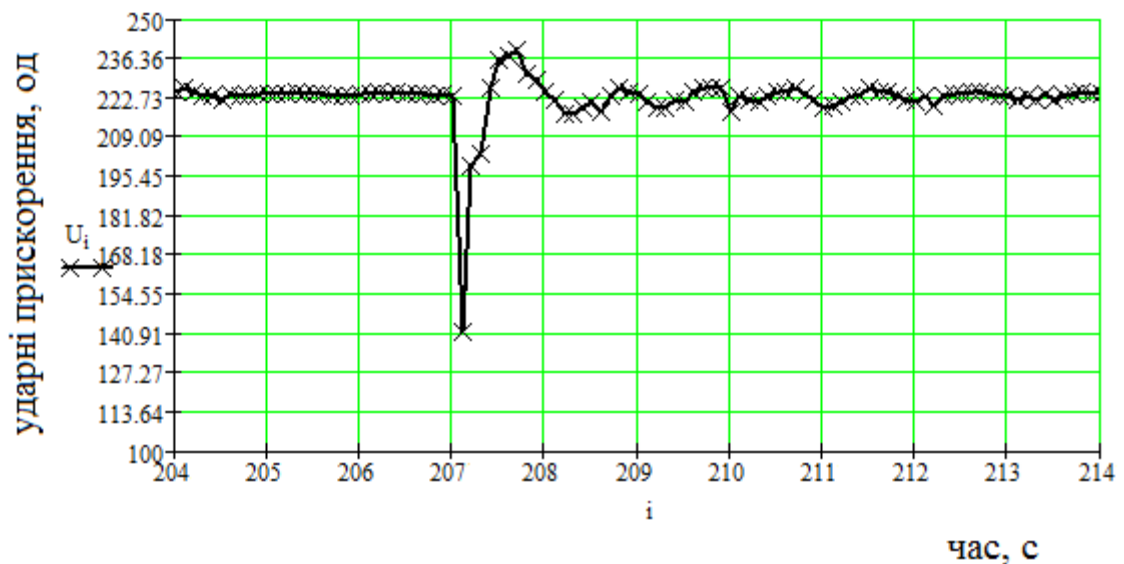


Рисунок 3.38 – Типова осцилограма процесу удару об відновлену поверхню гнізда підшипника за допомогою полімерного матеріалу.

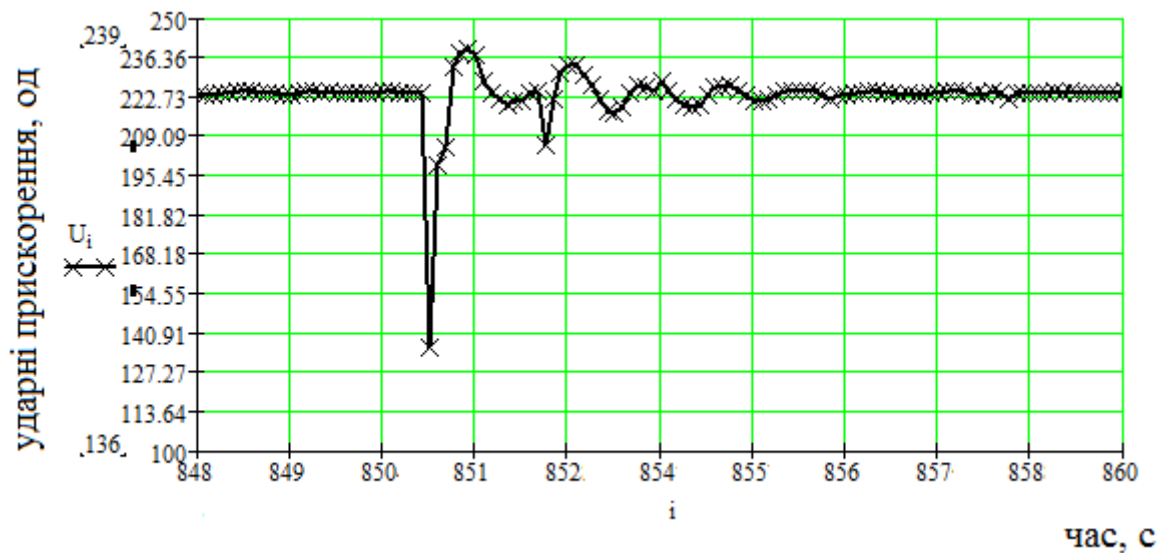


Рисунок 3.39 – Типова осцилограма процесу удару об ідновлену поверхню гнізда підшипника за допомогою полімерного матеріалу з використанням маяків .

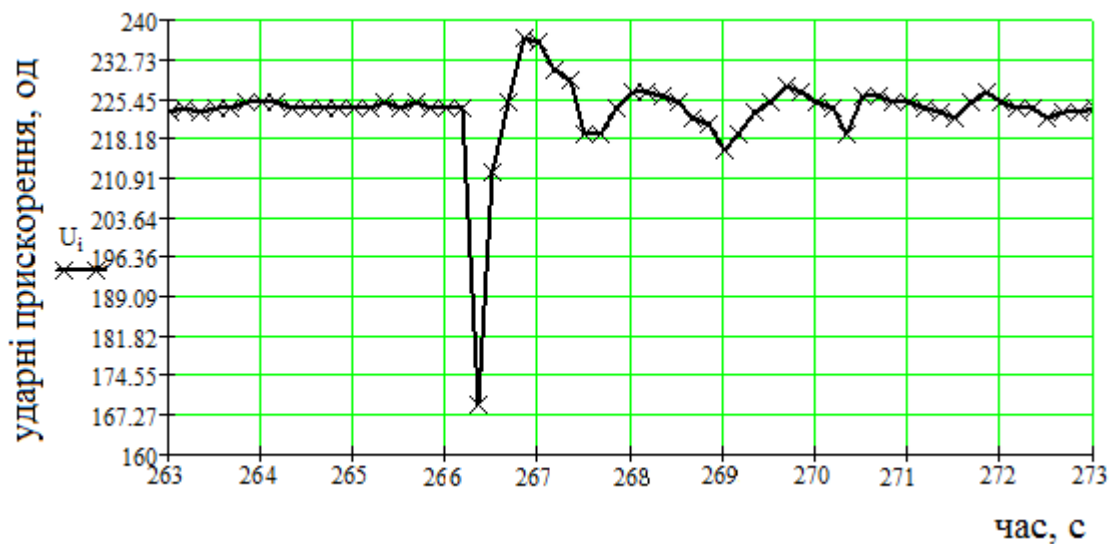


Рисунок 3.40- Типова осцилограма процесу удару об поверхню гнізда підшипника з використанням У-клею.

Дослідження ударних навантажень об поверхню гнізда підшипника відновленого за допомогою У-клею, показав що, ударне прискорення об поверхню У-клею склало 55 одиниць, що дорівнює $173,25 \text{ м/с}^2$. Час затухання ударних прискорень дорівнює 3 сек.

Таблиця 3.15 - Результати експериментів за визначенням величини прискорення для різноманітних матеріалів

№ п\п	Multimetal		Multimetal з маяками		Метал	
	Показання прибору. од	Ударні прискоренн я. м/с ²	Показання прибору. од	Ударні прискоренн я. м/с ²	Показання прибору. од	Ударні прискоренн я. м/с ²
1	84	264,6	89	280,35	107	337,05
2	84	264,6	89	280,35	105	330,75
3	85	267,75	88	277,2	106	333,9
4	85	267,75	88	277,2	107	337,05
5	85	267,75	88	277,2	106	333,9
6	85	267,75	87	274,05	106	333,9
7	85	267,75	86	261,45	105	330,75
8	84	264,6	89	280,35	105	330,75
9	84	264,6	88	277,2	106	333,9
10	84	264,6	87	274,05	106	333,9
11	85	267,75	88	277,2	104	274,05
12	85	267,75	88	277,2	105	330,75
13	84	264,6	87	274,05	106	333,9
14	85	267,75	87	274,05	104	274,05
15	83	261,45	88	277,2	105	330,75

Таблиця 3.16 - Результати експериментів за визначенням величини прискорення для різноманітних технологій застосування матеріалу Y-клей

№ п\п	Y-Клей зразок вклеєн		Y-Клей з затисненим зразком	
	Показання прибору. од	Ударні прискорення. м/с ²	Показання прибору. од	Ударні прискорення. м/с ²
1	44	138,6	86	270,9
2	48	151,2	87	274,05
3	50	157,5	87	274,05
4	52	163,8	85	267,75
5	53	166,95	86	270,9
6	53	166,95	87	274,05
7	53	166,95	86	270,9
8	53	166,95	87	274,05
9	54	170,1	88	277,2
10	55	173,25	87	274,05

Продовження таблиці 3.16

№ п/п	У-Клей зразок вклеєн		У-Клей з затисненим зразком	
	Показання прибору. од	Ударні прискорення. м/с ²	Показання прибору. од	Ударні прискорення. м/с ²
11	53	166,95	88	277,2
12	53	166,95	86	270,9
13	52	163,8	88	277,2
14	54	170,1	86	270,9
15	54	170,1	88	277,2

Аналіз цих осцилограм дозволив, насамперед, відзначити, що спостерігається очікуване демпфірування сили удару в випадку застосування композитного матеріалу. Це демпфування дозволяє зменшити ударні у середньому на 20%, а тривалість затухання коливань скоротити з 5 с до 2,64 с, тобто практично в 2 рази.

При цьому є один момент, який треба відзначити, це незначне збільшення прискорень з 82 м/с² до 92 м/с², тобто на 10%, в разі використання в якості центруючого підшипник елементу сталеві маяки, на які бойок спільно з полімерним матеріалом спирається. Це збільшення свідчить про те, що навіть незначний по площі контакт з металом підвищує жорсткість всієї конструкції.

На рис. 3.41 знайшло графічне відображення кількісних результатів з яких видно, що протягом усього циклу експериментів величина прискорення практично залишалася незмінної для кожного з розглянутих варіантів, що свідчить не тільки про стабільність виконуваних результатів вимірів, але і про здатність полімерного матеріалу істотно демпфірувати ударні навантаження, що може позначатися вирішальним фактором при досягненні критичних значень навантаженням для підшипника, при яких може відбутися руйнування зовнішнього кільця.

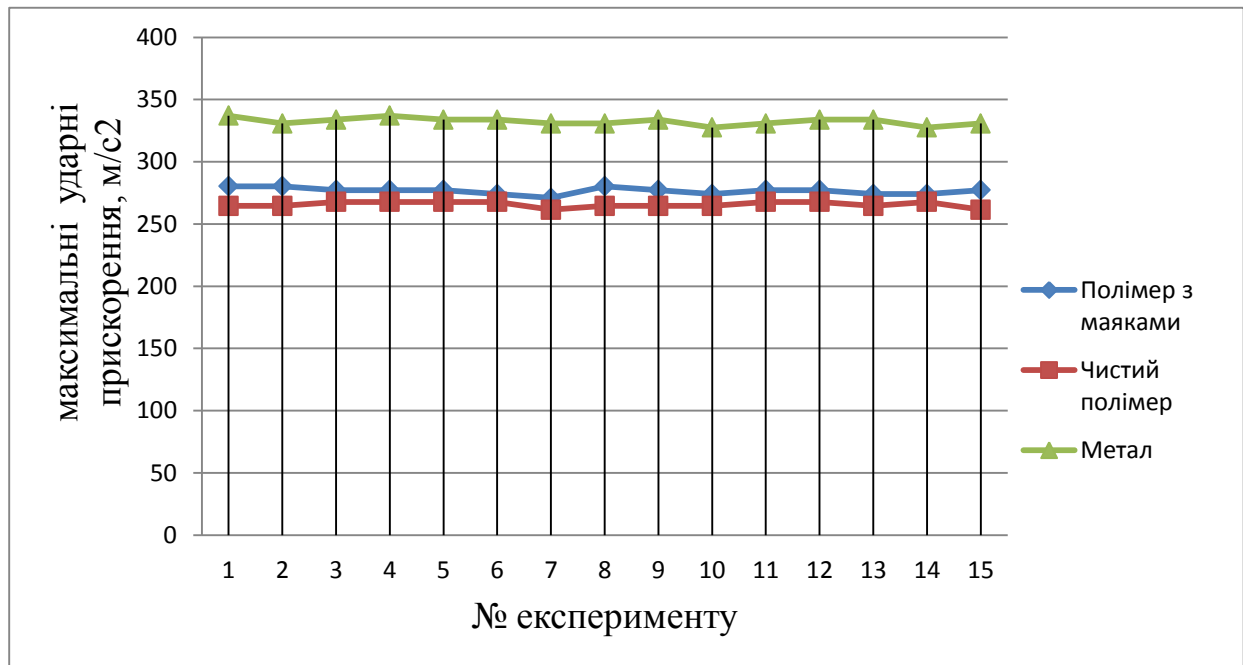


Рисунок 3.41- Графік максимальних ударних прискорень.

Представляє особливий інтерес випробування відновленої поверхні за допомогою У-клею, оскільки він дозволяє надійно з'єднувати металеві поверхні. При використанні його було реалізовано два варіанти застосування цього матеріалу. Перший спосіб - це шар У-клею товщиною 0,5 мм нанесено на опорну поверхню і затиснений до неї під час удару, і другий варіант - бойок приклеєний до опорної поверхні, за допомогою У-клею. Результати такого порівняльного випробування приведені в табл. 3.16, і на рис. 3.42 представлена залежність прискорення від кількості виконаних експериментів.

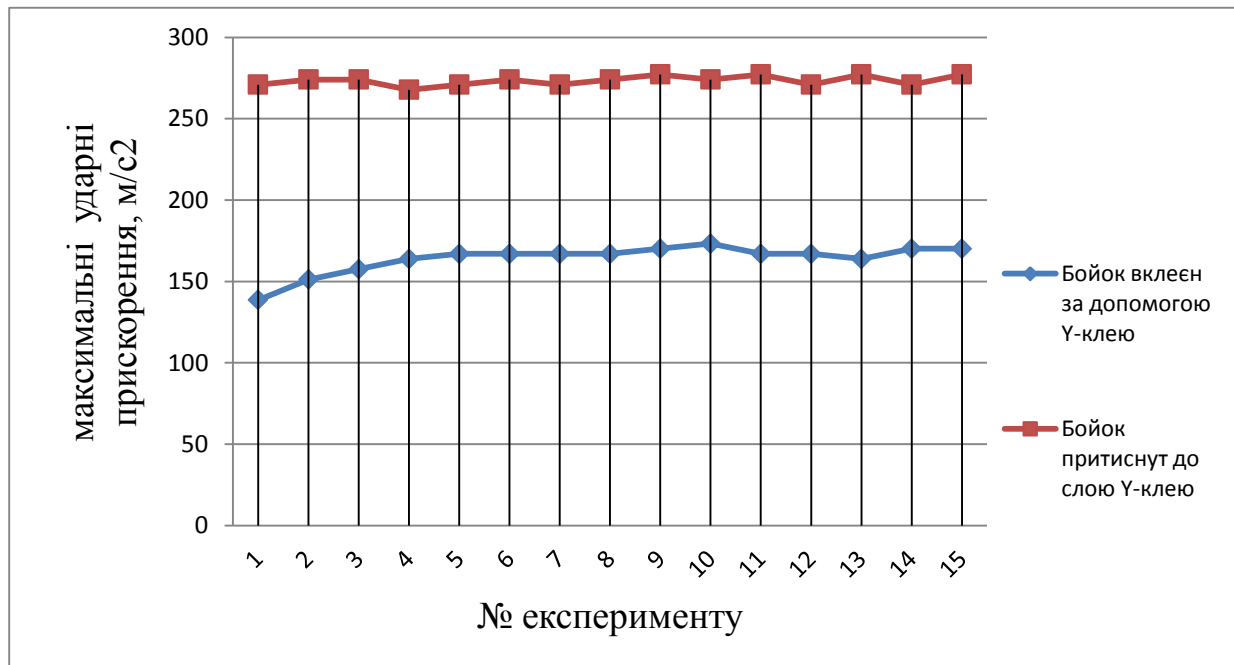


Рисунок 3.42 - Графік максимальних ударних прискорень по шару Y-клею.

Як і в попередньому випадку на рис. 3.32 слід зазначити стабільність отриманих результатів, але звертає на себе увагу той фактор, що вклеювання бойка, імітуючого зовнішнє кільце підшипника кочення ($\varnothing 30$ мм), майже в 1,6-1,7 рази знижує величину прискорення, а отже, і силу удару. У той же час, не дивлячись на попереднє притиснення бойка до шару Y-клею, прискорення можна порівняти з випадком відновлення опорної поверхні полімерним матеріалом з маяками. Тобто, при розкритті зазору під час удару між зовнішнім кільцем підшипника і опорною поверхнею, підвищує ймовірність руйнування підшипника. У той же час, цей експеримент доводить, що в разі фіксації зовнішнього кільця підшипника за допомогою Y-клею ймовірність його виходу з ладу може бути знижена майже в 2 рази.

Таким чином, розроблена методика дослідження ударних навантажень, дозволила визначити закономірності ударних навантажень при дії на опорну поверхню підшипника. Згідно отриманих результатів можна зробити висновок, що полімерний матеріал поглинає динамічне навантаження на 26% більше в порівнянні з не відновленою поверхнею та скорочує час затухання ударних

коливань на 48% , що означає, що демпфіруючі здатності матеріалу дозволяють поглинати енергію удару, отже, його можна використовувати в ремонтах вузлів, котрі працюють при динамічному навантаженні.

Разом з тим, можливе подальше зниження ударних навантажень за рахунок фактичного вклеювання зовнішнього кільця підшипника до опорної поверхні за рахунок використання У- клею.

3.3.4 Результати дослідження адгезійної міцності композитного матеріалу

Результати експериментів з визначення адгезійної міцності, виконувались на установці зображеній на рис 3.2, занесені в таблиці 3.17 в якій, вказані: результати досліджень по впливу на адгезійну міцність, методу підготовки поверхні та підготовки самого композиту до застосування.

Таблиця 3.17 - Характеристика адгезійної міцності металополімерного матеріалу Multimetal stahl 1018 фірми Diamant

Механічна обробка	Товщина метало - полімерного матеріалу, мм	Зусилля на розрив, Н		Напруження на розрив, МПа	
		Reineger (фірмовий знежирювач «Diamant»)	Ацетон	Reineger (фірмовий знежирювач «Diamant»)	Ацетон
Голкова фреза	0,7...0,9	11760	10800	24	22
		15760	14000	32	28
		12000	10000	24,5	20
		Сер. 13170	Сер. 11600	Сер.26,8	Сер. 23,6
Наждачне коло	0,7...1,1	14440	11800	29,4	23,6
		14640	12800	29,8	26,1
		13200	12000	26,9	24,5
		Сер. 14090	Сер. 12130	Сер. 28,7	Сер. 24,7
Торцева фреза	0,5...1,1	11000	10000	22,4	22
		11360	12240	23,2	25
		9200	13600	18,8	27,8
		Сер. 10520	Сер.12210	Сер. 21,5	Сер. 25

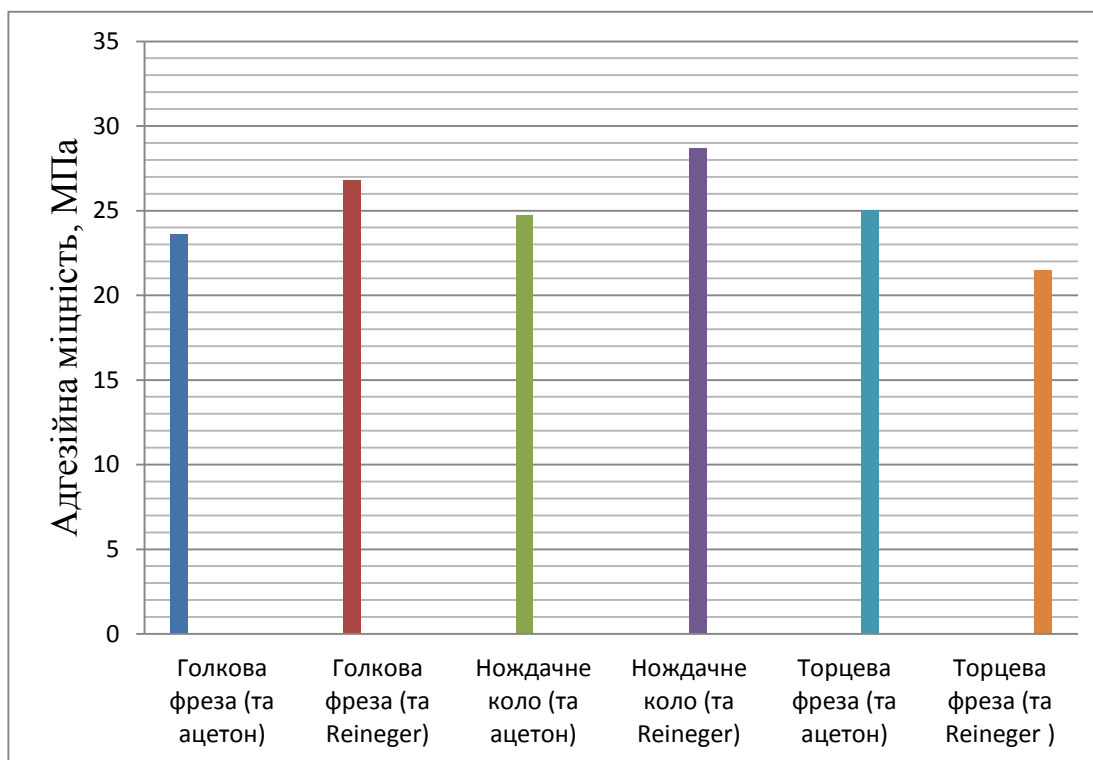


Рисунок 3.43 - Діаграма впливу обробки на адгезійну міцність.

З діаграми рис. 3.43 видно, що найкращій показник адгезійної міцності має місце при обробці за допомогою наждачного кола та знежирювача Reineger, (28,7 МПа).

Таблиця 3.18 – Порівняння впливу на адгезійну міцність застосованих знежирювачів з підігрівом зразків перед нанесенням.

Види знежирювачів	Товщина металополімерного матеріалу, мм	Зусилля на розрив, Н	Середнє зусилля, Н	Напруження на розрив, МПа	Середні напруження, МПа
Ацетон	0,5...0,8	12400	12530	25,3	25,5
		12000		24,5	
		13200		26,9	
Reineger	0,3...0,4	15000	15430	30,6	31,4
		17000		34,6	
		14300		29,1	
Ацетон та нагрів до 55 ⁰ С	0,3...1,0	13000	14000	26,5	28,5
		13700		27,9	
		14300		29,1	

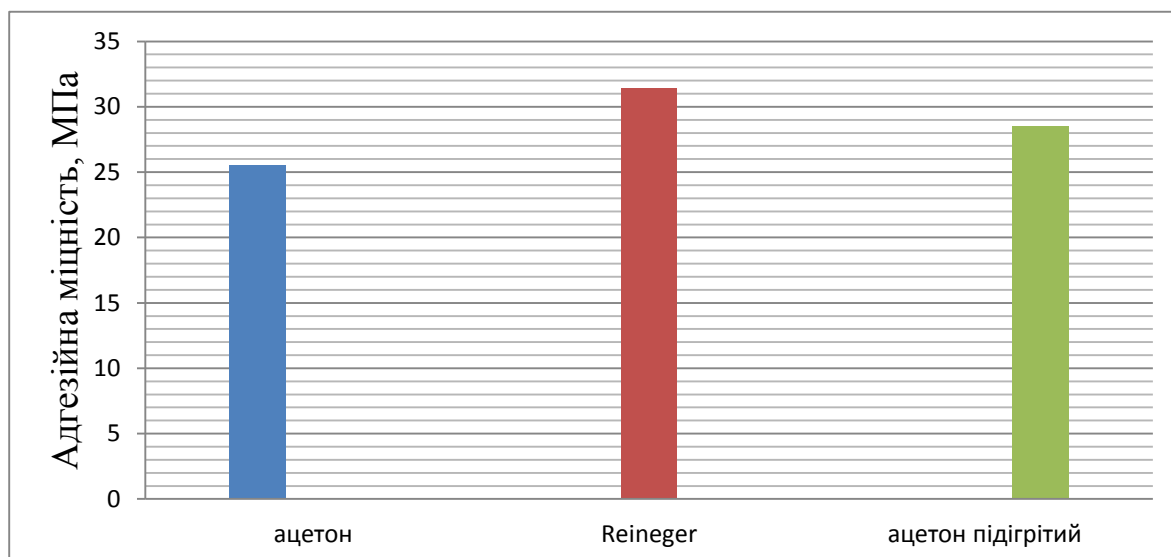


Рисунок 3.44 - Діаграма впливу обезжирювача на адгезійну міцність.

Згідно діаграми зображених на рис. 3.44 видно, що найкращий показник адгезійної міцності - це знежирювач Reineger, підігрів ацетону підвищує адгезійну міцність.

Таблиця 3.19 - Вплив масла та води на адгезійну міцність матеріалу Multimetall stahl 1018 фірми Diamant

Види знежирювачів	Товщина металополімерного матеріалу, мм	Зусилля на розрив, Н	Середнє зусилля, Н	Напруження на розрив, МПа	Середнє напруження, МПа
Масило	0,4...0,8	13700	11730	27,9	23,9
		10000		20,38	
		11000		22,4	
Вода	0,9...1,0	10000	9600	20,38	19,6
		8800		17,9	
		8000		16,3	
Ацетон	0,8...1,1	10000	12130	20,4	24,7
		9200		19,4	
		11700		35	

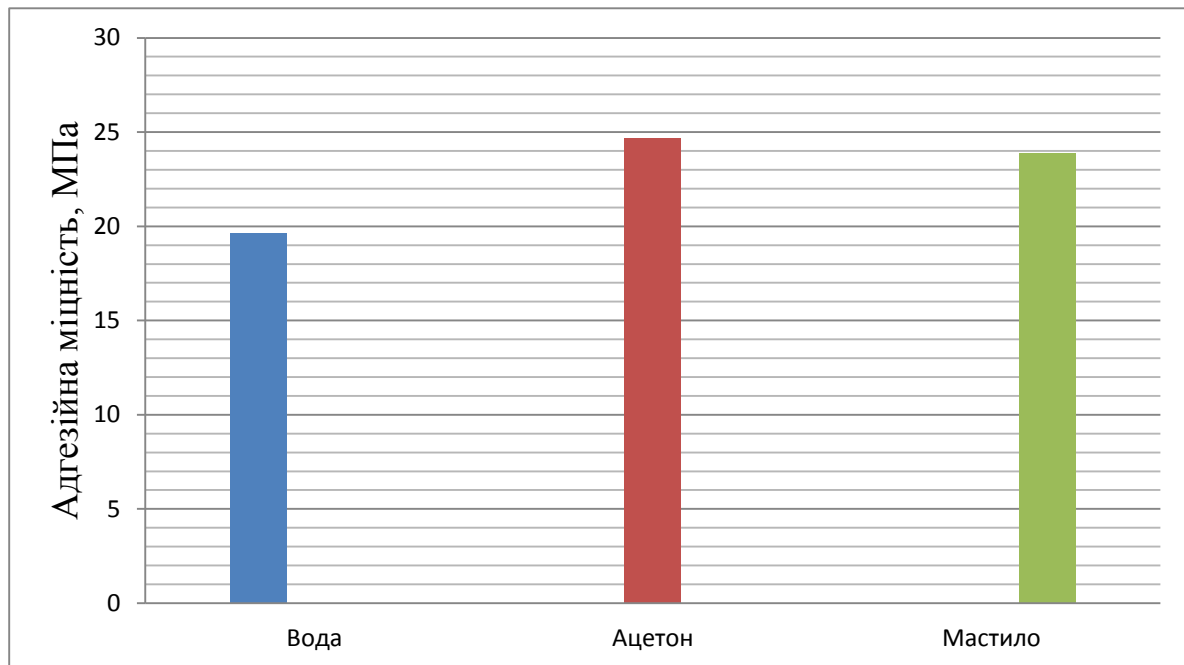


Рисунок 3.45 - Діаграма впливу води та мастила на адгезійну міцність.

Згідно діаграми зображених на рис.3.45 видно, що на адгезійну міцність впливає знежирювач, ацетон показав стабільні результати, однак, вода та мастило знижує адгезійну міцність.

Таблиця 3.20 – Використання рідкотекучого Multimetal stahl FL в поєднанні з stahl 1018 при різноманітних знежирювачах.

Види знежирювачів	Товщина металополімерного матеріалу, мм	Зусилля на розрив, Н	Середнє зусилля, Н	Напруження на розрив, МПа	Середнє напруження, МПа
Stahl 1018 та Stahl FL зі застосуванням ацетону	0,4...0,8	12000	12200	27,9	24.9
		11600		20,38	
		13000		22,4	
Stahl FL зі застосуванням Reineger	0,4...0,6	10000	10630	20,4	21.73
		12400		25.4	
		9500		19.4	
Stahl FL зі застосуванням ацетону	0,5...0,6	8000	9433	20,4	19.2
		9000		13,4	
		11300		35	

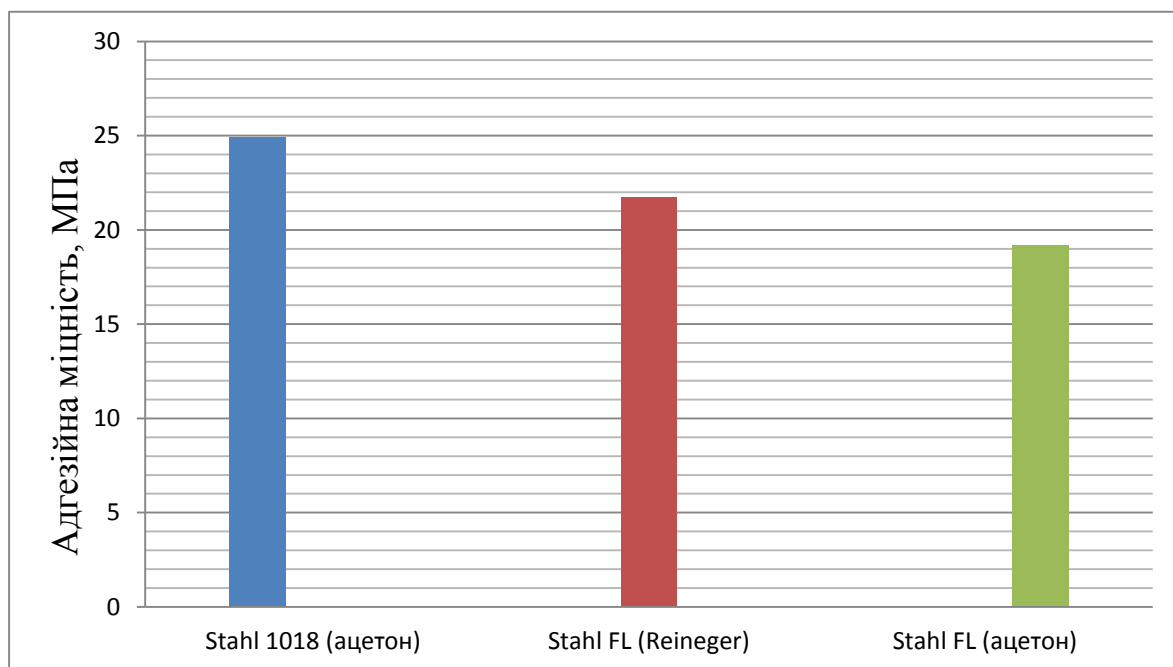


Рисунок 3.46 - Діаграма впливу на адгезійну міцність Stahl FL.

З діаграми, зображеної на рис. 3.46, видно, що адгезійна міцність матеріалу Stahl FL складає 21,73 МПа, що на 12,7 % нижче в порівнянні з матеріалом Stahl 1018.

В ході експерименту було визначено, що на адгезійну міцність впливає багато факторів: вид механічної обробки, вид обезжирювачів та різноманітні затверджувачі. В ході експериментів були визначенні, що найвища адгезійна міцність у матеріала Stahl 1018. З результатів видно, що внесення до складу полімеру впливає на адгезійну міцність. Але, якщо необхідно змінити або відкоригувати властивості матеріалу, то це можна зробити за допомогою різних добавок.

3.3.5 Результати експериментальних досліджень корозійної стійкості композитного матеріалу

Результати виконаних експериментів занесені в табл. 3.21.

Таблиця 3.21 - Зміна маси зразків під дією середовища

№ п/п	Найменування виду корозії		1 день	2 день	3 день	4 день	5 день	6 день
зразки не захищені								
1	Зразок занурений в електроліт	Вага, г.	303	296	293	286	283	266
2	Зразок після електролізу	Вага, г.	307	258	202	146	121	117
3	На відкритому повітрі	Вага, г.	305	304	304	304	304	304
зразки повністю захищені								
1	Зразок занурений в електроліт	Вага, г.	311	311	311	311	311	311
2	Зразок після електролізу	Вага, г.	321	321	321	321	321	321
3	На відкритому повітрі	Вага, г.	322	322	322	322	322	322
зразки частково захищені								
1	Зразок занурений в електроліт	Вага, г.	316	311	309	304	301	298
2	Зразок після електролізу	Вага, г.	325	315	306	295	286	285
3	На відкритому повітрі	Вага, г.	322	322	322	322	322	322

Обладнання МБЛЗ схильне до корозійного руйнування. При цьому єдиний на теперішній час ефективний та економічно доцільний захист – це захист за допомогою лакофарбових покриттів. В наслідок аналізу стану металоконструкцій МБЛЗ в розділі було визначено, що фарби, котрі використовуються для захисту МБЛЗ, є дуже нестійкими до агресивного середовища.

Оскільки корозійні руйнування проходять у великому проміжку часу, то під час лабораторних досліджень способів захисту елементів металургійного обладнання від впливу корозії була спроба прискорити корозійні руйнування за рахунок використання більш агресивного середовища. Для дослідження корозійної стійкості захисного покриття, зразки були зануренні до агресивного середовища (електроліту). В наслідок виконаного експерименту було з'ясовано, що лакофарбові покриття, котрі застосовуються для захисту сталевих конструкцій швидко руйнуються внаслідок дій електроліту. А в умовах експлуатації МБЛЗ вони дуже швидко руйнуються за рахунок дій високих температур та випромінювання та високої вологості повітря. Після руйнування захисного покриття сталевих конструкцій починається руйнування основного металу, що впливає на строк служби конструкцій в цілому. Інтенсивність такого роду руйнування після проведення іспитів зразків в електроліті можна оцінити за методикою, котра приведена у розділі 3.2.5. Таки оцінки виконаємо з урахуванням наступних показників зразків:

- маса зразків до експерименту $M_0=100\text{г}$;
- площа контактуючої поверхні $S=14\text{ см}^2$;
- щільність основного матеріалу $\rho=7.8\text{ г/см}^3$;
- кількість даних отриманих експериментальним шляхом $N=10$.

Результати розрахунків наведені в табл. 3.22

Таблиця 3.22 – Результати теоретичного розрахунку

Кількість експериментів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глибина корозійних руйнувань, мм	0,804	0,982	0,446	0,356	0,625	0,714	0,357	0,089	0,179	1,161
Середня швидкість проникання корозії, мм/рік	0,703	0,877	0,465	0,419	0,651	0,632	0,372	0,081	0,153	0,924

Результати розрахунку за формулою (3.7) визначають швидкість протікання корозії для зразків масою 100г зі сталі Ст3-кп. Вони показали, що за 1 рік відбувається втрата в середньому 0,589 мм товщини зразка. Екстраполюючи ці результати на роботу металоконструкцій МБЛЗ, можна спрогнозувати, що в конструкції товщиною в 10мм будуть зношені за 15-20 років. Саме такі явища, та такої інтенсивності були зафіксовані під час досліджень стану металоконструкції МБЛЗ №6: колон поворотного стенда, броні струмків МБЛЗ, перекриттів верхніх криволінійного ділянки МБЛЗ, та наведені на рис 2.1-2.3. Ці конструкції відпрацювали з 2005 року 14 років. З огляду на те, що частку цього терміну лакофарбове покриття захищало метал, а решту терміну корозія руйнувала вже чистий метал, то металеві конструкції, товщина котрих менша ніж 10мм, працюють при граничних умовах. Той факт, що у порівнянні з незахищеними зразками, зразки вкриті композитним матеріалом ДК-2 не втрачають свою вагу (табл. 3.21) на протязі експерименту дає надію відносно ефективності застосування композитного матеріалу для захисту металоконструкцій від корозії. Його використання дозволяє повністю захистити металоконструкцію і зберегти поверхню всіх елементів МБЛЗ. Такі результати експерименту та розрахунки глибини корозійних руйнувань дають можливість вираховувати термін експлуатації металоконструкцій МБЛЗ.

З огляду на те, що в процесі експлуатації металоконструкції, піддаються комплексному впливу теплових випромінювань, парів при охолодженні метала за допомогою морської води, в якій міститься велика кількість солей, а також наявність блукаючих струмів в металоконструкції, проведено серію експериментів на корозійну стійкість чистого металу і захищеного за допомогою композитного матеріалу в умовах дії електрохімічної корозії. Такий експеримент з прискорення корозійних процесів дозволить в лабораторних умовах виконати оцінки можливості композитного матеріали протистояти дії електрохімічної корозії, яка в заводських умовах діє дуже повільно та відбувається протягом років.

В ході експерименту були отримані данні, котрі занесені в таблицю 3.21, а за результатами було побудовано графік абсолютної втрати маси зразків, зображений на рис. 3.47-3.48. Проаналізувавши отримані результати були зроблені висновки, що найбільш інтенсивний вид корозійного зносу є електрохімічна корозія, за 6 діб зразок втратив 190 г, що дорівнює 61.8%, зразка, на котрі був вплив хімічної корозії, втратили 37 г, що дорівнює 12.2%. Найбільш довгий вид корозії – є корозія на відкритому повітрі, це доводиться тим, що зміна маси зразків не була зафіксована, однак, були зафіксовані зовнішні зміни зразків показані на рисунку 3.49, з них видно, що зразки на відкритому повітрі були окисленні, створився оксид заліза. Зразки, котрі підтвердженні корозійному зносі представленні на рисунку 3.49

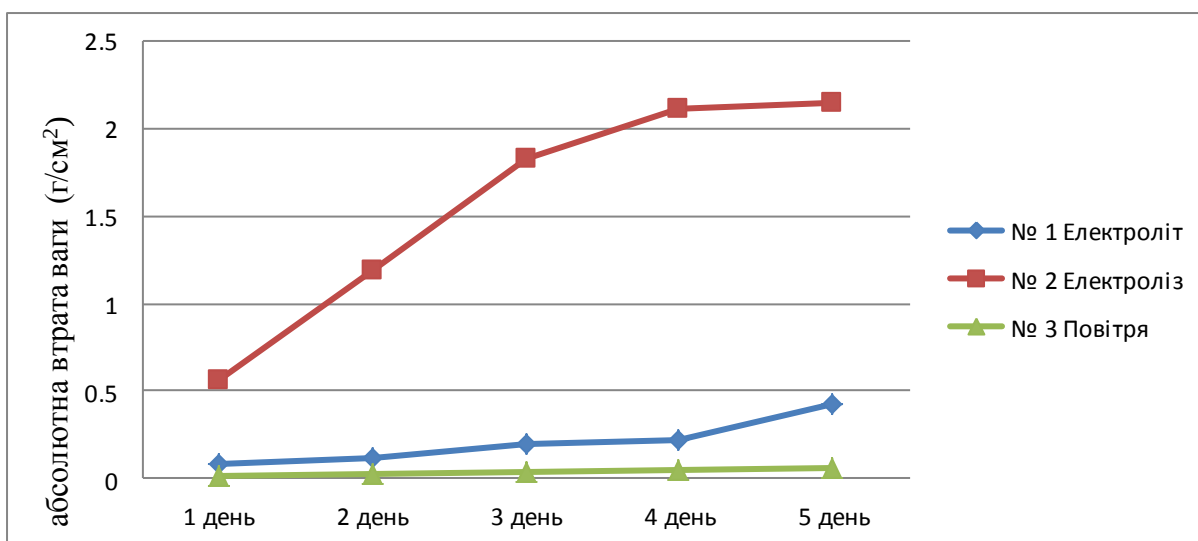


Рисунок 3.47 - Зміна абсолютної маси зразків під дією середовища (зразки не захищені).

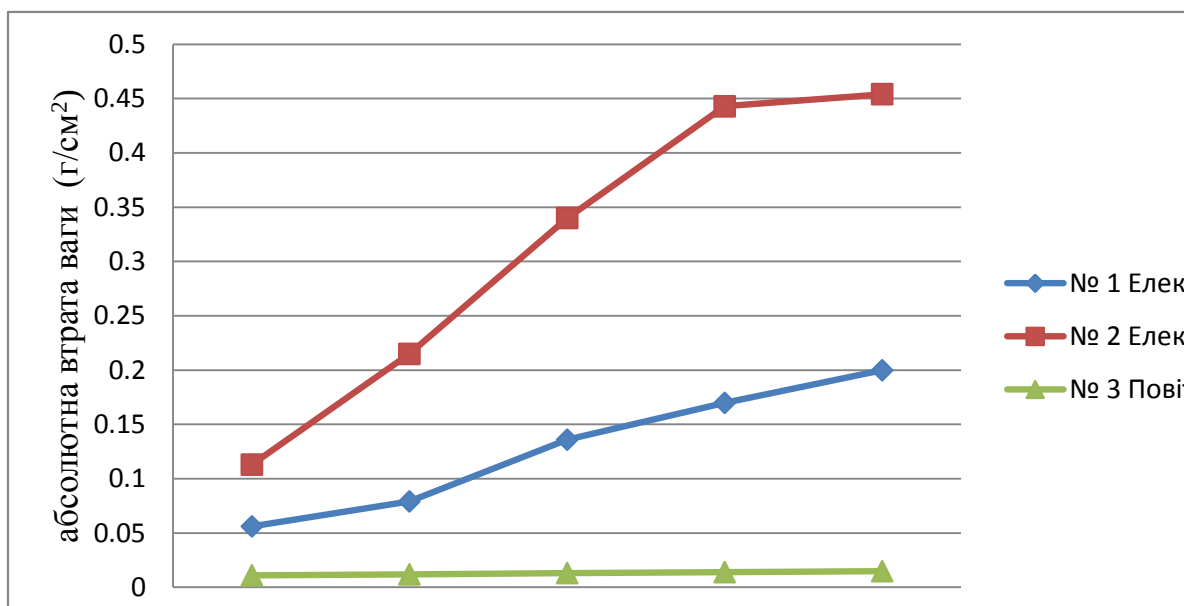


Рисунок 3.48 – Графік втрати абсолютної маси під дією середовища (з частковим покриттям композитним матеріалом)



а – електрохімічна корозія; б – хімічна корозія; в – корозія на відкритому повітрі.

Рисунок 3.49 – Незахищені зразки після експерименту

Для побудування графіків були визначені, втрати абсолютної ваги за формулою згідно ГОСТ 9.908-85:

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_1}{S}, \text{ г/см}^2, \quad (3.10)$$

де M_0 - первина вага зразків, г
 M_1 - вага зразків після випробувань, г
 S - загальна площа поверхні зразка, см^2 .

Враховуючи отримані дані, при частковому захисті сталевих зразків видно, що: зразки, котрі підверглись електрохімічній корозії втратили 40г маси, що дорівнює 12%; зразки, котрі підверглись хімічній корозії втратили 15г, що дорівнює 4.6%; зразки, котрі були на відкритому повітрі в масі не змінилися а втрата абсолютної ваги склала 0,45 г/см^2 .

У той же час, зразки покриті композитними матеріалами залишаються цільними. Безумовно, електрохімічний процес впливає на захисне покриття, однак, з огляду на їх невелику вагу в межах обмеженого часу експерименту, вплив цих процесів відзначено не було. Отримані результати дозволяють прогнозувати поведінку композиту в умовах, що діють на вузли МБЛЗ.

Підводячи і тог проведеним експериментам та розрахунком інтенсивності корозійного руйнування можливо констатувати, що на відмінність від лакофарбових покриттів, котрі використовуються для захисту металоконструкцій МБЛЗ, використання композитних матеріалів в якості захисного покриття може суттєво підвищити довговічність металоконструкцій які працюють в умовах дії агресивних середовищ.

3.4 Висновки

Розроблено оригінальні пристрої, методи і методики проведення експериментів по визначенню механічних властивостей композитного матеріалу.

Встановлено, що композитний матеріал, за допомогою якого відновлена опорна поверхня моделі підшипника кочення, знижує негативний вплив ударних навантажень за рахунок поглинання енергії удару. Це підвищує термін

служби підшипника, а також, дозволяє виконувати ремонти підшипникових опор в короткі строки.

Встановлено, що композитний матеріал ефективно захищає металеві конструкції від корозії, що в подальшому дозволило виконати роботи по відновленню герметичності охолоджуючих каналів кристалізатора МБЛЗ, за рахунок необхідної адгезійної міцності композитного матеріалу та використання розробленої нової технології їх відновлення.

Аналіз результатів цих експериментів дозволив зробити висновки, що за допомогою композитного матеріалу Мультиметалл-сталь фірми «Diamant», можливе відновлення вузлів машин безпосередньо на місці експлуатації, що дозволяє суттєво скоротити строки ремонтів, а також, скоротити витрати на ремонт та обслуговування, також можливе використання вітчизняного захисного покриття матеріалу ДК-2 для захисту іншого металургійного обладнання від корозійних руйнувань від корозійних руйнувань.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РЕМОНТІ ВУЗЛІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1 Теоретичний аналіз навантаження опорних поверхонь підшипникових вузлів металургійного обладнання

Експериментальні результати, отримані в попередньому розділі дозволили визначити несучу здатність композитного матеріалу в умовах ударного та вібраційного навантажень підшипникового вузла. Однак, ці результати носять точковий характер та не дозволяють визначити розподілення виникаючих навантажень в шарі композиту під час роботи і крім того не дозволяють виконувати теоретичні розрахунки міцності несучого шару під час планування ремонтних робіт та розробки технологій відновлення працездатності підшипникового вузла кочення. Тому є доцільним виконання моделювання процесу навантаження композитного шару опорної поверхні підшипника кочення та отримання інформації, яка необхідна для підвищення ефективності планування ремонтів та подальшої експлуатації металургійного обладнання МБЛЗ.

Для визначення максимального тиску в підшипниковій опорі, вирішується завдання контактування підшипника з поверхнею підшипникового вузла. Завдання про внутрішнє контактування під навантаженням двох кругових циліндрів з малою різницею їх радіусів кривизни було вирішено І.Я. Штаерманом [106], допустимий контакт круга з круговим вирізом в нескінченній пружній площині. Це рішення ґрунтується на залежності радіальних пружних переміщень від зосередженої сили для кола і для нескінченно пружного тіла з круговим циліндричним вирізом, розглянутого в роботі С.І. Тимошенко [108].

У даній роботі ця задача вирішується для схеми навантаження при якій зовнішня сила q прикладена в центрі поперечного перерізу циліндра. Дана схема ближча до реальної схеми в підшипниковому вузлі. Крім того, тут при виведенні рівняння враховуються дотичні напруження, котрі виникають в контакті. В роботі [107] контактну задачу для матеріалу кінцевої товщини вирішують формулами для переміщень $i\alpha$ та $i\phi$. Підставляючи їх в рівняння рівноваги і граничні умови, отримаємо невизначені параметри в формулі для переміщень. В даній роботі, на основі роботи [107], розглядається інженерний метод розрахунку розподілу напружень в підшипникової опори, відновленої металополімерних матеріалом.

Метою даної роботи є аналіз навантаження опір підшипникових вузлів відновлених за допомогою композитних матеріалів, розробка інженерної методики оцінки напруженого стану шару металополімерних матеріалу, котрий використовувався при відновленні підшипникових опор, на прикладі полімерного матеріалу Multimetal сталь 1018 з наступними технічними характеристиками, представленими в табл.1.1, а також експериментальне визначення демпфуючої здатності полімерних матеріалів шляхом застосування ударних навантажень.

На рис. 4.1 зображена розрахункова схема переміщення підшипника кочення на податливому полімерному матеріалі.

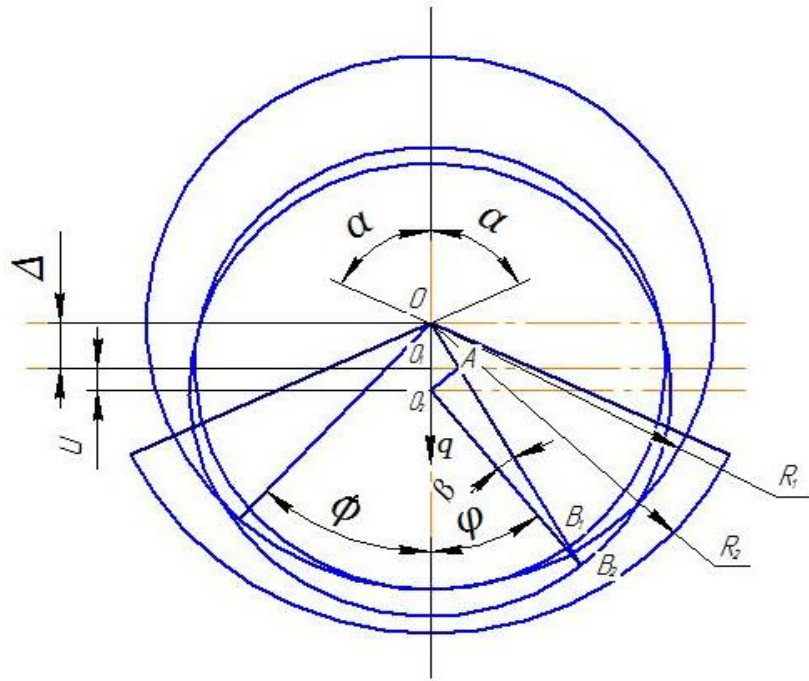


Рисунок.4.1 - Розрахункова схема переміщення підшипника на податливому металополімерному матеріалі.

При цьому прийняті наступні позначення:

$d = 2r$ - зовнішній діаметр підшипника;

R_1 та R_2 - відповідно внутрішній і зовнішній радіуси полімеризованого матеріалу;

$\Delta = R_1 - r$ - установочний радіальний зазор;

$u = u(\rho, \varphi)$ радіальна деформація полімерного матеріалу в довільній точці (ρ - радіус-вектор точки; φ - полярний кут точки). Завдання вирішується в полярних координатах;

$$u_0 = u(R_1, 0)$$

2φ - кут контакту навантаженого підшипника з матеріалом;

2α - кут матеріалу між фіксують стопорними планками (якщо відновлення відбувалося без маячків, то

O - центр циліндричного отвору підшипника;

O_1 - центр окружності зовнішнього кільця не навантаженого підшипника;

O_2 - центр окружності зовнішнього кільця підшипника, після прикладення навантаження.

Розглянемо трикутник $O O_2 A$, котрий зображений на рис. 4.1.

$$OA = OO_2 \times \cos(\varphi - \beta)$$

В силу малості кута

$$\cos(\varphi - \beta) \approx \cos \varphi$$

Розглядаючи завдання в полярних координатах з центром в точці O , будемо мати наступну залежність:

$$R_1 + u(R_1, \varphi) - r = (\Delta + u_0) \times \cos \varphi \quad (4.1)$$

Звідки при:

$$\begin{aligned} -\Phi &\leq \varphi \leq \Phi; \\ u(R_1, \varphi) &= u_0 \times \cos \varphi + \Delta \times \cos \varphi - (R_1 - r) \\ u(R_1, \varphi) &= u_0 \times \cos \varphi - \Delta \times (1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Кут Φ можна визначити з співвідношення (4.2), підставляючи замість змінної φ значення Φ і знаючи умови:

$$\begin{aligned} u(R_1, \Phi) &= 0; \\ u_0 \times \cos \Phi - \Delta \times (1 - \cos \Phi) &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\Phi = \arccos \frac{\Delta}{u_0 + \Delta}$$

Розглянемо тепер плоску задачу в теорії пружності в полярних координатах.

Спрощення полягає в тому, що в цій задачі одну з координатних осей, наприклад, O_z можна відкинути, і все явище розглядати, як таке, яке відбувається в одній площині O_{xy} . Розв'язання загальної математичної задачі за формою рішення.

Запишемо наступні граничні умови, які стосуються переміщень:

$$\begin{aligned} u(R_2, \varphi) &= 0; \\ u(\rho, \alpha) &= 0; \\ \sigma_\rho(R_1, \varphi)_{\Phi \leq |\varphi| \leq \alpha} &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Якщо підібрати безперервну функцію і так, щоб вона задовольняла всім умовам системи, то отримаємо точне рішення задачі. В роботі [107] наведено наближене рішення, основане на одному з варіаційних методів. Автори задаються функцією переміщень, що служить рішенням плоскої задачі теорії пружності і задовольняє граничним умовам у вигляді:

$$u(\rho, \varphi) = [u_0 \times \cos \varphi - \Delta \times (1 - \cos \varphi)] \times \frac{\rho \times (R_2 - \rho)}{R_1 \times (R_2 - R_1)} \quad (4.5)$$

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho(\rho, \varphi) &= \frac{d}{d\rho} \times u(\rho, \varphi); \\ \varepsilon_\varphi(\rho, \varphi) &= \frac{u(\rho, \varphi)}{\rho}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Згідно із законом Гука для плоско-напруженого стану:

$$\begin{aligned} \sigma_\rho(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \times [\varepsilon_\rho(\rho, \varphi) + \nu \times \varepsilon_\varphi(\rho, \varphi)], \\ \sigma_\varphi(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \times [\varepsilon_\varphi(\rho, \varphi) + \nu \times \varepsilon_\rho(\rho, \varphi)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

де E - модуль пружності металополімерного матеріалу;
 ν - коефіцієнт Пуассона або коефіцієнт поперечної деформації [107].

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

$$q = -2 \times \int_0^{\phi} \sigma_{\rho}(R_1, \varphi) \times \cos \varphi \times R_1 d\varphi. \quad (4.8)$$

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

Виконаємо розрахунок за цим методом на конкретному прикладі, вихідні дані для якого взяті такими чином щоб повторити характеристики експериментальної установки.

Вихідні дані:

$$r = 15 \text{ мм}; R_1 = 15 \text{ мм}; R_2 = 17 \text{ мм}; \Delta = R_1 - r; u_0 = 0,036 \text{ мм}; E = 13200 \text{ МПа}; \nu = 0.376; \alpha = \frac{\pi}{2};$$

При цьому кут контакту підшипника з металополімерним матеріалом визначається за формулою (4.2). На підставі результатів розрахунків за допомогою математичної програми MathCad побудуємо графік розподілу тиску $\sigma_{\rho}(R_1, \varphi)$ та $\sigma_{\varphi}(R_1, \varphi)$ від Φ - кута контакту, представлений на рис. 4.2.

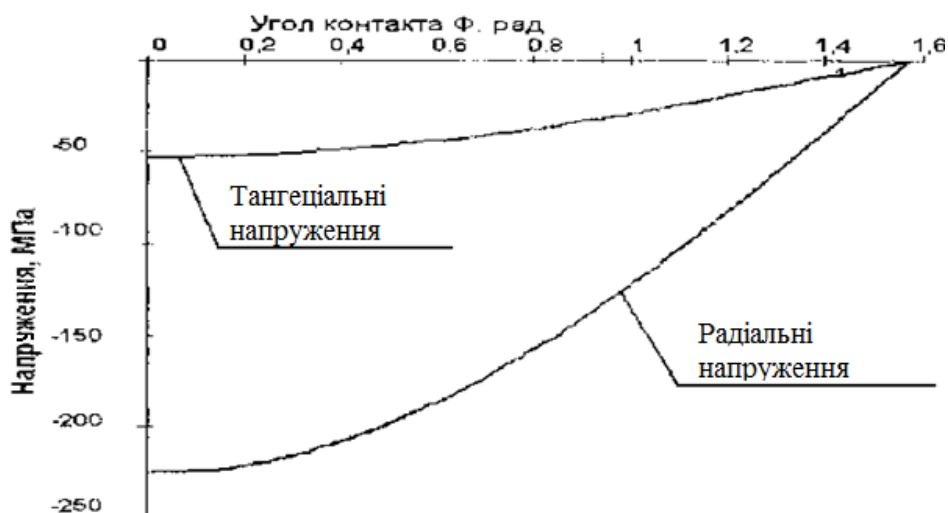
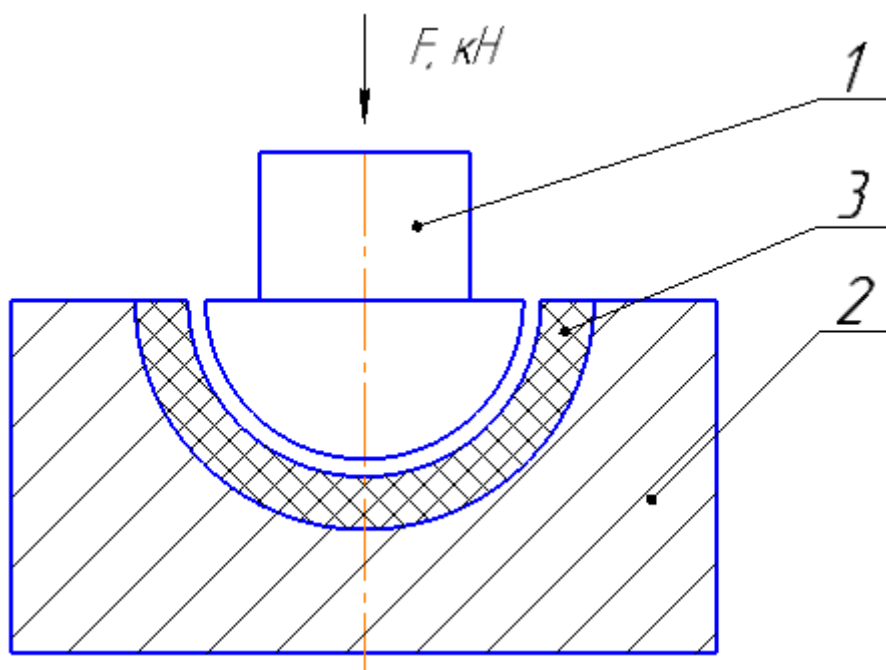


Рисунок 4.2 - Розподіл напружень в металополімерному матеріалі, за допомогою якого була відновлена опора під підшипником



1 – бойок (імітатор зовнішнього кільця підшипника кочення); 2 – опора;
3 – композитний матеріал.

Рисунок 4.3 - Варіант розглянутої задачі з затисненням полімерним матеріалом

Таким чином, напруження, що виникло в полімерному матеріалі при навантаженні, складають 230 МПа, що в 1,4 вище ніж допустимі напруження стиснення для полімерного матеріалу (див. табл. 1.1). І для підвищення його несучої здатності, було запропоновано укласти відновлюваний шар полімеру в виробленій канавці, що обмежує бокове переміщення матеріалу (як показано на рис. 4.3) і тим самим, як було встановлено в [108], підвищує несучу здатність полімеру в 1,5-1,7 рази.

4.2 Моделювання ударних навантажень на опорні поверхні вузлів.

Моделювання ударних навантажень, що утворюються в деталях при експлуатації виконувалося в розрахунковій програмі ANSYS-ED. Програма ANSYS-ED дозволяє виконувати статичний і динамічний аналіз міцності.

У програмі ANSYS-ED для вирішення завдань використовуються чисельні методи [105]. Вирішальне рівняння статичного аналізу записується у вигляді

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (4.9)$$

де $[K]$ – матриця жорсткостей;
 $\{F\}$ – вектор сил;
 $\{u\}$ – вектор переміщень.

Компоненти вектора сил $\{F\}$ можуть являти собою зосереджені сили, теплові навантаження, тиску та сили інерції.

Програма ANSYS-ED відтворює в своєму середовищі такі типи навантажень:

- циклічні навантаження;
- раптово прикладаються навантаження;
- випадкові навантаження;
- змінні навантаження.

У програмі ANSYS всі види динамічного аналізу ґрунтуються на наступних загальних рівнянні руху в кінцево-елементної формі:

$$[M] \{u''\} + [C] \{u'\} + [K] \{u\} = \{F(t)\}, \quad (4.10)$$

де $[M]$ – матриця мас;
 $[C]$ – матриця опорів;
 $[K]$ – матриця жорсткостей;
 $\{u''\}$ – вектор вузлових прискорень;
 $\{u'\}$ – вектор вузлових швидкостей;
 $\{u\}$ – вектор вузлових переміщень;
 $\{F\}$ – вектор навантажень;
 (t) – час.

За допомогою цього рівняння визначаються значення невідомих $\{u\}$, які в будь-який момент часу задовольняють умовам рівноваги системи при наявності сил інерції і розсіювання енергії (рисунок 4.4).

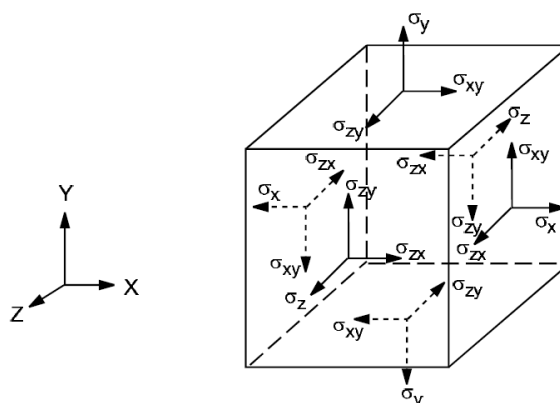


Рисунок 4.4 - Вектори напруг

Алгоритм проведення розрахунків в середовищі програм кінцево-елементного аналізу наступний:

- побудова 3-D аналога досліджуваної деталі (рисунок 4.5-4.6);
- введення, відповідно до робочого креслення, визначених фізико-механічних властивості матеріалу;
- вказівка ступенів свободи і розташування деталі в просторі;
- генерування кінцево-елементного аналога деталі (рисунок 4.7);

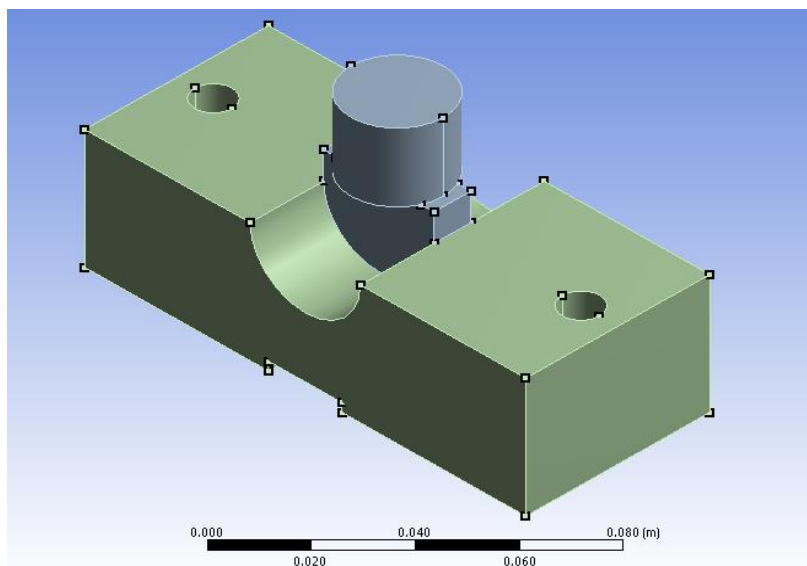


Рисунок 4.5 - 3-D аналог опорної поверхні

- зазначення навантажень, що діють на деталь під час проведення операції (експлуатації), і час їх дії і т.д.
- розрахунок результуючих величин (температури, деформації, напруження і т.д.), з подальшим виведенням отриманих даних у вигляді графіків, таблиць, полів і т.д.

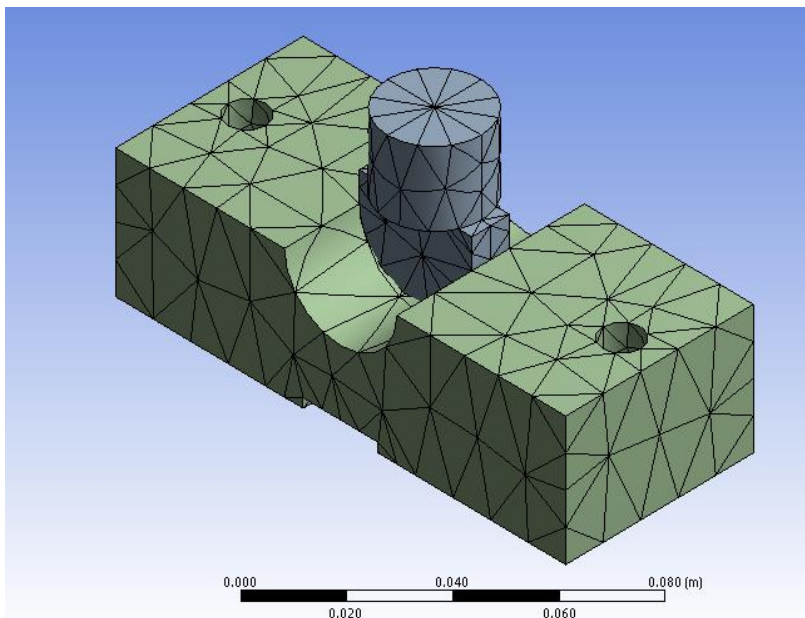


Рисунок 4.6 - Кінцево-елементний аналог опорної поверхні

Створена модель записується в пам'яті комп'ютера у вигляді файлу. На обсяг створених файлів, а, отже, і на час проведення розрахунків, впливає кількість кінцевих елементів на які розбивається 3-D аналог деталі. Більш докладна розбивка деталі, тобто більша кількість скінчених елементів, підвищує точність розрахунків, проте, значно збільшує час їх проведення і обсяг файлів. Так при кількості кінцевих елементів в деталі в кілька сотень тисяч (200000 - 300000), обсяг файлу створеної моделі може досягати 10-20 Гбайт, а час на його розрахунок досягає декількох годин.

Розглянемо більш докладно моделювання такої операції експлуатаційного процесу, як навантаження радіальної навантаженням підшипникової опори. Для спрощення процесу моделювання, з метою визначення навантажувального сприйняття, отже, підвищують точність розрахунків.

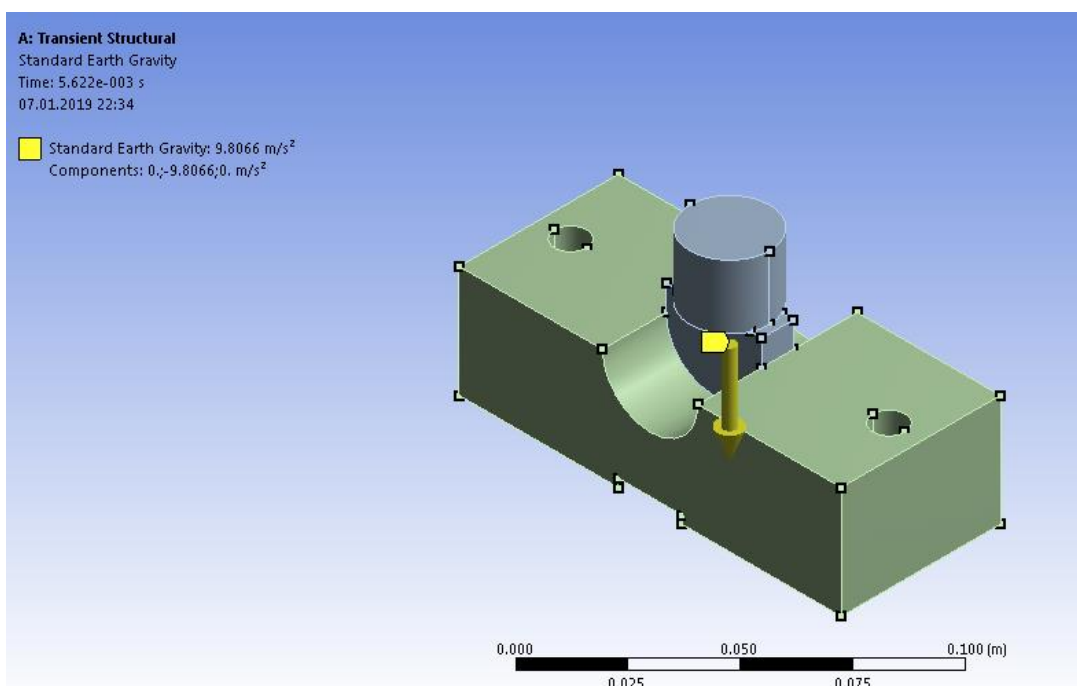


Рисунок 4.7 – Прикладання ударних навантажень до бойку.

Першим етапом є створення 3-D твердотільної моделі деталі (рисунок 4.5). Для її побудови можна використовувати як модуль самих програм кінцево-елементного аналізу, так і імпортувати попередньо створену модель з переважної більшості CAD-систем, зокрема КОМПАС-3D або SolidWorks. Так, як модель має циліндричну симетрію, доцільно в розрахунку використовувати половину (1/2 частина) деталі зі збереженням контакту. Це дозволить поряд зі зниженням часу розрахунку підвищити його точність при розрахунку навантаженого деформованого стану. Модель доопрацьовується на предмет введення радіусів, заокруглень в місцях імовірно високих напруг (рисунок 4.7). Це необхідно робити, тому передбачається використовувати для розрахунку об'ємні кінцеві елементи (solid). На даному етапі, також, вводяться властивості матеріалу деталі (щільність, і т.д.), або обирається матеріал з бази даних програми із заздалегідь визначеними властивостями. Визначаються його основні характеристики (ізотропність і т.д.).

Матеріал опори - сталь 35Л, нанесено шар композитного матеріалу Multimetal сталь 1018, механічні характеристики якого найкращі для цього випадку.

Після створення твердотільної моделі генерується її кінцево-елементний аналог (рисунок 4.6) з сіткою вузлів і елементів. З метою підвищення точності розрахунків доцільно більш детальна розбивка на елементи тієї області деталі, яка безпосередньо межує з областю прикладення навантаження. Більш точна інтерполяція результатів розрахунку (напруги, деформації і т.д.) в вузлах звичайно-елементної моделі (СЕМ) виходить при кінцево-елементній сітці, побудованої пошарово від поверхні і складається з кінцевих елементів типу гексаедр.

Такий підхід побудови можна реалізувати за допомогою спеціального будівника - ANSYSICEM CFD (або ICEM). Більш того, блоковий метод побудови, закладений в ньому, дозволяє реалізувати типологічно подібні сітки, як різної щільності, для проведення аналізу на відповідність рішення, так і для проведення порівняльного аналізу між декількома подібними моделями досліджуваного об'єкта. Тобто, це дає можливість виключити вплив на розрахунок різної структури сітки.

На рисунку 4.6 приведена блокова структура моделі. Отримана СЕМ, (рисунок 4.6) перевіряється на якість кінцевих елементів за допомогою програми. Отримані значення елементів мають якість від 0,75 до 0,88, що відповідає високій якості розбиття.

Наступним кроком є вибір виду аналізу. У разі моделювання режиму експлуатації доцільно провести аналіз деформацій і напружень, що виникають внаслідок ударної дії. У програмах кінцево-елементного аналізу моделювання зазначених процесів виконується шляхом застосування модуля Transient Structural (рисунок 4.8).

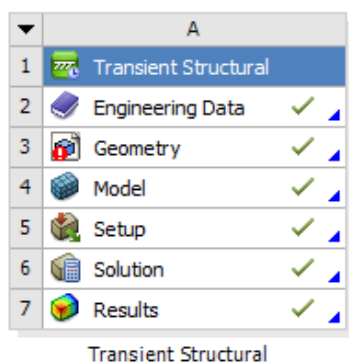


Рисунок 4.8 - Використовувані розрахункові модулі

В системі Transient Structural проводиться аналіз динамічних процесів напружено-деформованого стану деталі. Як навантаження, розглядаємо радіальні сили, котрі діють на опору. Процес не стаціонарності імітується наступним чином. Розбивається розрахунковий процес на кроки. Завантаження побудованої моделі, на значення закріплень, прикладання зусилля, та на значення параметрів котрі необхідно дослідити.

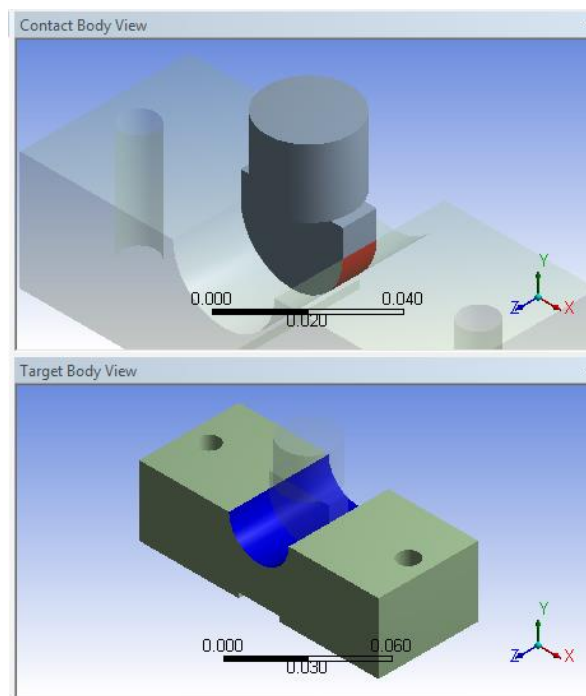


Рисунок 4.9 – Закріплення бойка

Ці масиви даних є основою для розрахунку деформацій і напружень в матеріалі деталі. Тобто, вводяться в систему Transient Structural у вигляді

навантаження (рисунок 4.7). Навантаженням в системі Transient Structural додатково задається маса вантажу, швидкість переміщення.

Крім того, вводяться обмеження переміщень по осі Y і обмеження обертання (кутова ступінь свободи) в площинах опор. На кордонах симетрії CAE (Computer-aided engineering), (комп'ютерна автоматика) задаються рівняння зв'язку. Також, був проведений аналіз на відповідність результатів розрахунку в залежності від кількості вузлів в CAE. Кількість вузлів змінювалося, однак при цьому було отримано один і той же рівень максимальних еквівалентних напружень (84,2 - 85,7МПа). Це говорить про те, що розрахункова сітка достатньої якості.

В результаті розрахунку від заданих навантажень з механічними характеристиками матеріалу, виявлено, що максимальні деформації виникають в місці передбачуваного виникнення дефекту. Максимальні значення деформації для сталевий основи складає 0,003 мм (рисунок 4.10). Також, були отримані результати деформації для поверхні з полімерного слою, що дорівнює 0,005 мм, а для полімерної поверхні з маячками деформація складає 0,0037 мм. Таким чином, можна констатувати, що застосування опорних маяків, дозволяє знизити деформацій на 26% в порівнянні з шаром полімеру, тим самим підвищити несучу здатність відновленої поверхні.

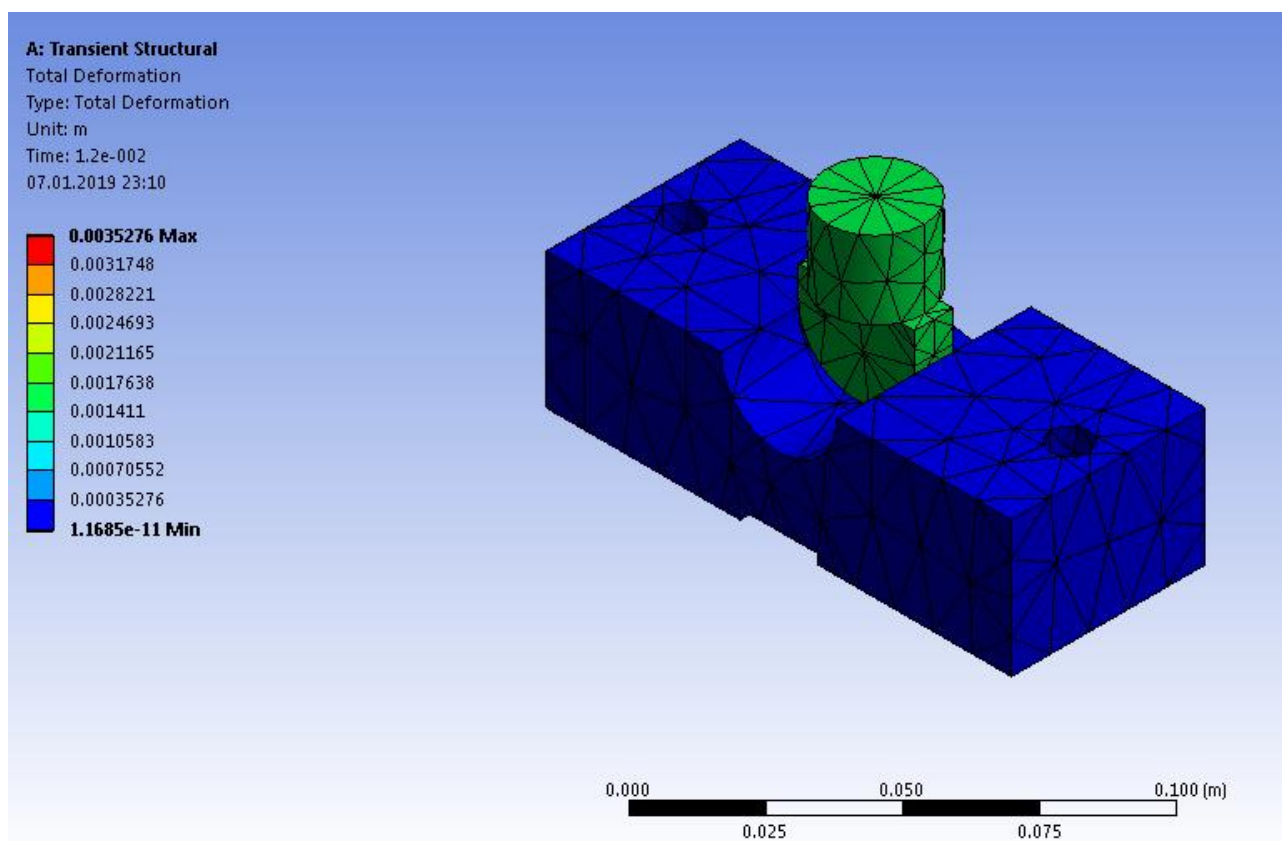


Рисунок 4.10 - Деформація підшипникової опори зі сталі

Були виконані експерименти з порівнянням розподілу напружень при ударних навантаженнях по поверхні підшипникової опори. На рисунках 4.11а...4.11в, зображено розподіл напружень по поверхні підшипникової опори.

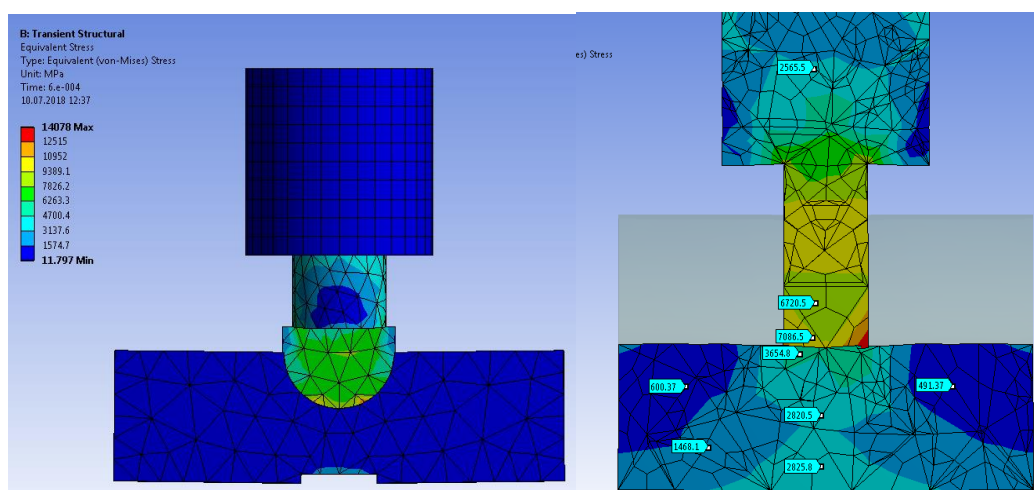


Рисунок 4.11а - Розподіл напружень при ударі о сталеву поверхню.

При ударному навантаженні об сталеву поверхню найбільш напруженим є бойок, котрий імітує підшипник, для нього напруження дорівнює в середньому 62 МПа, та напруження розподіляються більш ніж на 70% всій поверхні основи.

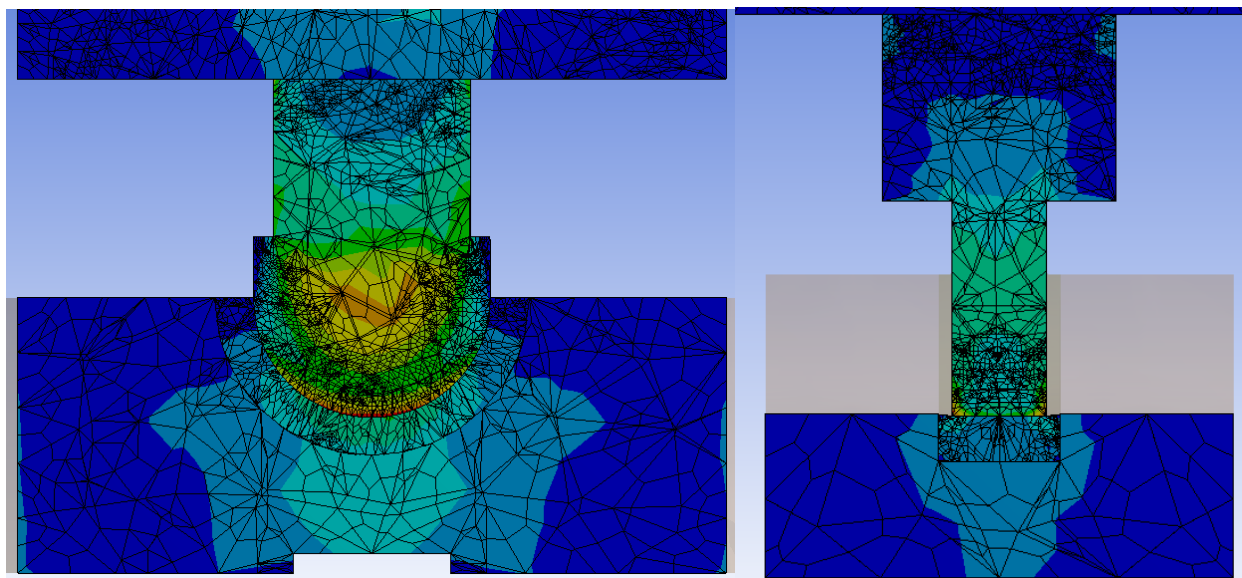


Рисунок 4.11 б – Розподіл напружень при ударі о полімерний шар.

При ударному навантаженні об полімерну поверхню найбільш напруженим є бойок, котрий імітує підшипник, для нього напруження дорівнює в середньому 32 МПа, та напруження розподіляються більш ніж на 40% всій поверхні основи.

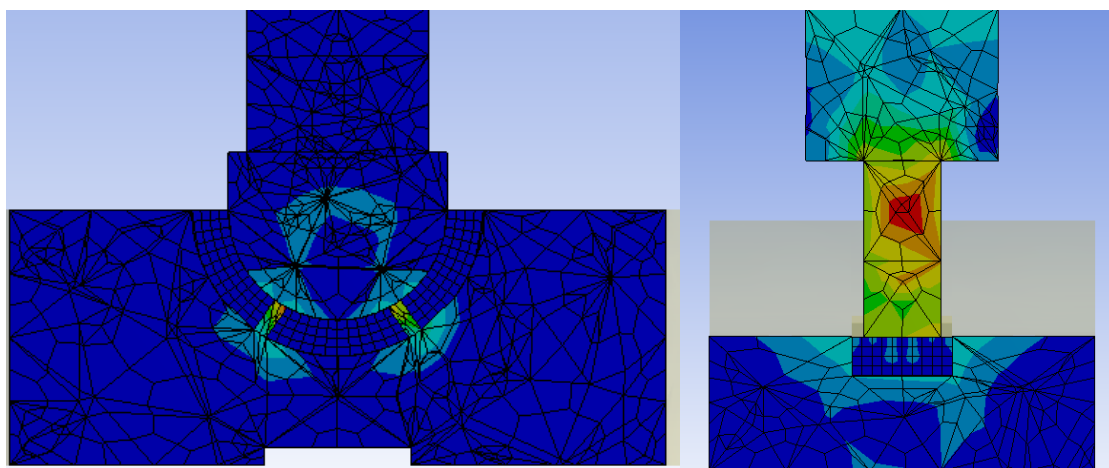


Рисунок 4.11 в - Розподіл напружень при ударі о полімерний шар з маячками

При ударному навантаженні о полімерну поверхню та маячки найбільш напруженим є бойок, котрий імітує підшипник, для нього напруження дорівнює в середньому 65 МПа, та напруження розподіляються на 19% всій поверхні основи.

На рис.4.12 а-в представлено згасання ударних навантажень при різному вигляді відновлення підшипникової опори.

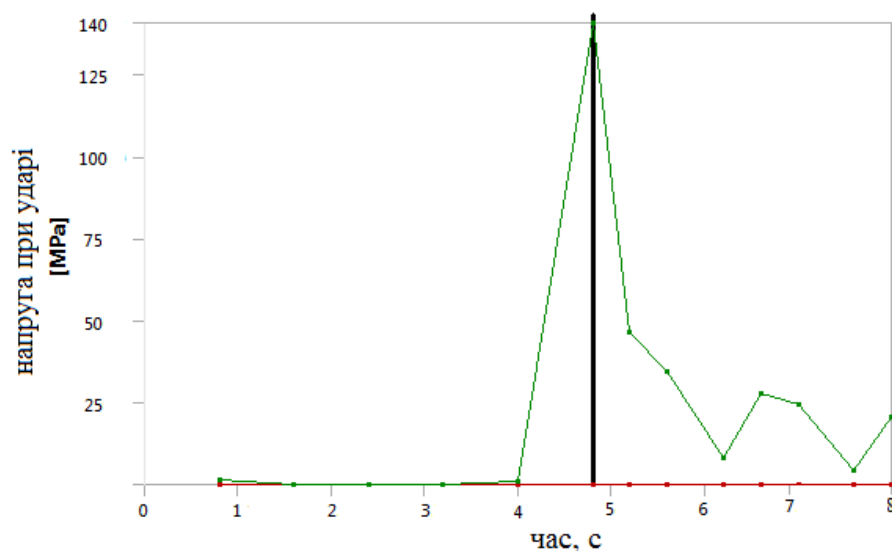


Рис.4.12а – Осцилограма запису напружень при ударі по металу

Аналіз осцилограми зображеної на рисунку 4.12 а свідчать, що напружена при ударі об сталеві поверхню дорівнює 140 МПа та час затухання дорівнює 5 сек.

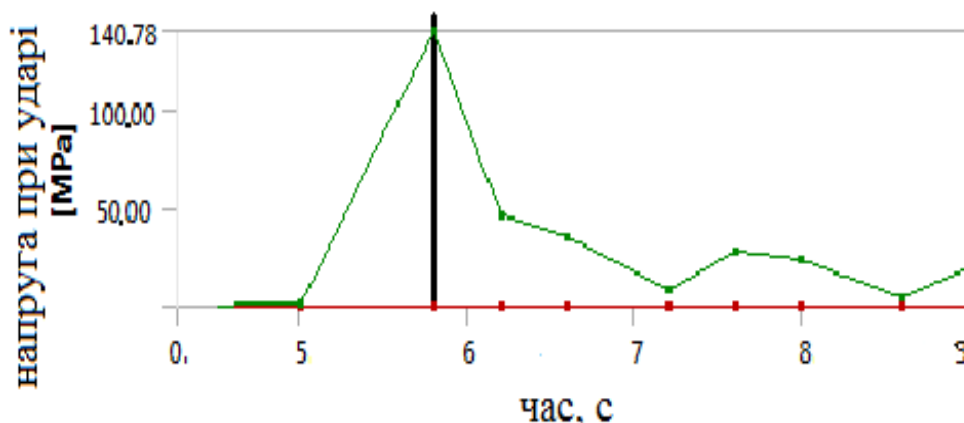


Рис.4.12б - Осцилограма запису напружень при ударі по шару полімеру з маячками

При ударі о полімерну поверхню з маячками напруження дорівнює 140 МПа, та час затухання дорівнює 5сек.

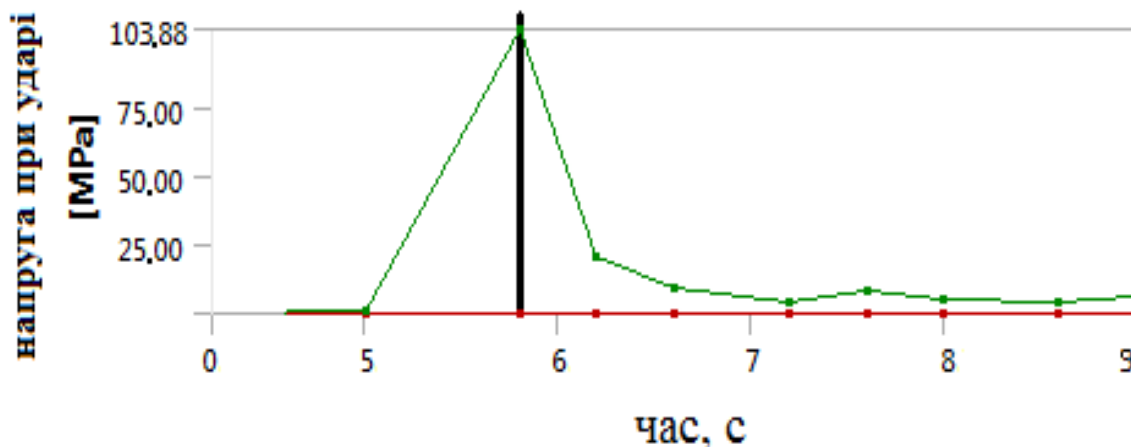


Рис.4.12в - Осцилограма запису напружень при ударі по шару полімеру.

При ударі о поверхню з полімерного матеріалу напруження дорівнює 103 МПа та час затухання дорівнює 2 сек.

Для підтвердження результатів комп'ютерного моделювання динамічного навантаження необхідно виконати порівняння експериментальних та теоретичних досліджень.

4.3 Порівняння експериментальних та теоретичних результатів визначення напружень у полімерному матеріалі застосованих у деталях металургійного обладнання

Для визначення достовірності та якості виконаних досліджень, котрі направлені на визначення напружень у полімерному матеріалі, були проаналізовані результати котрі приведені у розділі 3.2.1 та 4.2. Дані для порівняння приведені в таблиці 4.1. Для визначення напруження при експериментальному дослідженні був виконаний, розрахунок котрий дозволяє виконати конвертацію ударних прискорень в напруження, на поверхні полімерного матеріалу. Конвертація була виконана за допомогою формули:

$$\sigma = \frac{m \times A}{(\pi \times d \times h)/2}, \quad (4.11)$$

де m - маса ударяємого вантажу;
 A - максимальні ударні прискорення;
 d - діаметр зовнішнього кільця;
 h - ширина зовнішнього кільця.

Отриманні результати приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння результатів досліджень.

Найменування	Теоретичні данні, МПа	Експериментальні данні, МПа
Напруження при ударі о сталеву поверхню	140	171,65
Напруження при ударі о поверхню з маяками	140	144,9
Напруження при ударі о полімерну поверхню	103	129,15

Згідно отриманих результатів при дослідженні динамічного навантаження, підшипникової опори за допомогою експериментальних та теоретичних досліджень, були оброблені результати та проаналізовані. При дослідженні експериментальним та теоретичним шляхом дані різняться приблизно на 18,43% при дослідженні удару об сталеву поверхню. Для удару о поверхню зі сталевими маяками данні різняться на 3,38%. При дослідженні удару о полімерну поверхню, данні різняться на 20,24%. В результаті отриманих даних було побудовано графік, котрий зображено на рисунку 4.13.

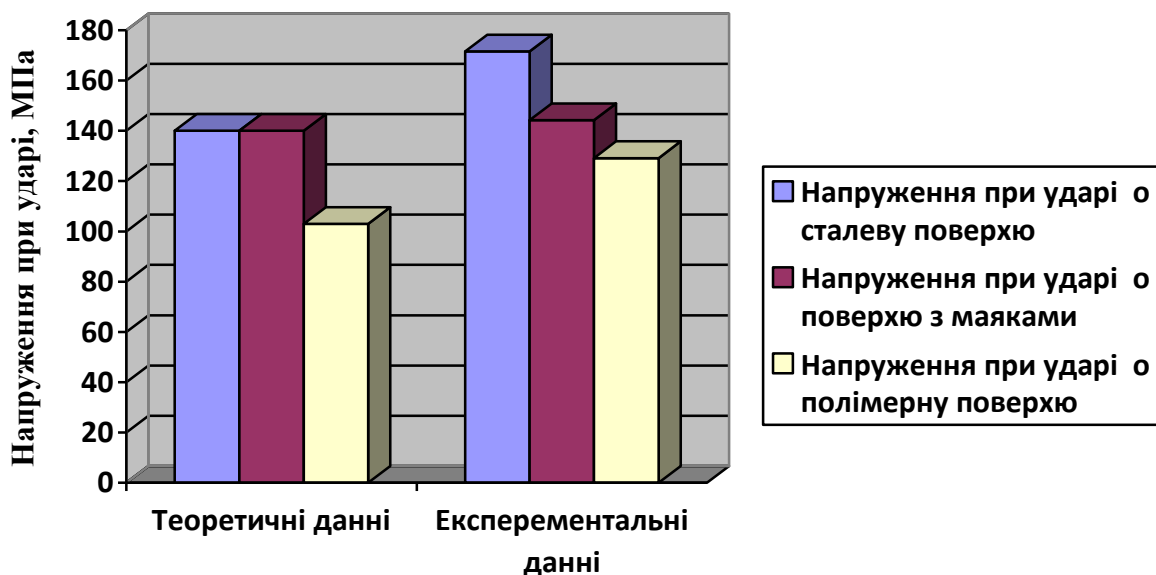


Рисунок 4.13 – Порівняння теоретичних та експериментальних досліджень.

Таким чином, можна зробити висновки, що ударні напруження більш всього різняться при отриманих результатах при контактуванні по всій поверхні, це можливо пояснити тим що при дослідженні експериментальним шляхом дуже важко отримати 100% контактування бойка з підшипниковою опорою, тим самим змінюється площа контакту та вноситься похибка в отриманні дані.

Збіжність результатів теоретичного аналізу динамічного навантаження відновленої підшипникової опори, та порівняння з результатами виконаних експериментальних досліджень, дозволяє утверджувати, що запропонована методика визначення величини напружень що виникають в шару полімером при прикладені ударного навантаження, може бути використано в практичних розрахунках.

4.4 Порівняльний аналіз питомої енергоємності та коефіцієнт дисипації зразків зі сталі та композиту

Міцність підшипникового вузла, що зазнає ударне навантаження, буде забезпечено в тому випадку, якщо потенційна енергія його пружної деформації буде неменша ніж енергія удару. Тому однією з основних характеристик композиту або сталі як амортизатора, є його енергоємність.

Порівняємо енергоємність експериментальної установки з металевою опорною поверхнею і з поверхнею покритою композитним матеріалом "MultiMetall stall1018".

Якщо прийняти припущення про те, що для динамічних деформацій має місце закон Гука [109] в разі стиснення зразка, площа поперечного перерізу якого - S , висота - h , модуль пружності - E , маємо потенційну енергію деформації.

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot S \cdot h$$

Питома енергоємність зразка на одиницю об'єму визначається за формулою:

$$W_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E}. \quad (4.13)$$

Гранична питома енергоємність має місце при напруженні дорівнює граничному значення напруження для даного матеріалу σ^* :

$$W_{v_{\text{пред}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^{*2}}{E} \quad (4.14)$$

Для того щоб врахувати матеріал і конструктивні особливості об'єкту та вид його напруженого стану вводиться коефіцієнт α [110]. Формула граничної енергоємності на одиницю об'єму тоді має вигляд:

$$\Pi_{V_{zp}} = \alpha \cdot \frac{\sigma^*{}^2}{E}. \quad (4.15)$$

Для питомої енергоємності на одиницю ваги об'єкту з питомою вагою γ отримаємо аналогічний вираз:

$$\Pi_{P_{zp}} = \alpha \cdot \frac{\sigma^*{}^2}{E \cdot \gamma}. \quad (4.16)$$

Питома енергоємність матеріалу на одиницю об'єму дорівнює:

$$\Pi_{V_{матер}} = \frac{\sigma^*{}^2}{E}, \quad (4.17)$$

Коефіцієнт якості напруженого стану α залежить при деформації стиску має найбільше значення при рівномірному стисканні двома паралельними площинами, він дорівнює $\alpha = 0,5$.

У випадку, якщо композитний матеріал покриває тільки нижню половину гнізда підшипника, приймають [3], наближене значення коефіцієнту α :

$$\alpha = \frac{0,5}{\frac{\pi}{2}} \approx 0,318.$$

Результати обчислення питомої енергоємності композитного матеріалу в підшипниковому вузлі, виготовленому зі сталі, чавуну, та покритому композитним матеріалом "Мультиметал сталь 1018" занесені в таблицю 1.

Таблиця 4.2 - Енергоємність пружних елементів

Матеріал	Модуль пружності Е, МПа	максимальне напруження σ, МПа	Питома енергоємність матеріалу	Питома енергоємність елемента
			Π _{вмат} , МПа	Π _в , МПа
Сталь	2,15·10 ⁵	470	1,02	0,32
Композит Мультиметал	1,4·10 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. Щоб підтвердити гіпотезу про поліпшення роботи підшипникового вузла в разі відновлення зношеної поверхні шару за допомогою композитного матеріалу нижче здійснена спроба порівняти можливу величину коефіцієнта розсіювання енергії в випадку контакту зовнішнього кільця підшипника зі сталлю і з композитним матеріалом "Мультиметал сталь 1018"

Результати дослідження коливань підшипникового вузла після ударів по опорній поверхні, виконаної з металу і по поверхні, яка покрита композитним матеріалом, представлені на рис. 3.37 і 3.38, відповідно. Для оцінки згасання коливань вводиться поняття логарифмічного декременту η , який дорівнює відношенню двох послідовних амплітуд a_i і a_{i+1} :

$$\eta = \ln \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad (4.18)$$

Досліджуючи вільні коливання в опорному середовищі, Поновко Я.Г. [112], скориставшись наближеним способом енергетичного

балансу, показав, яка енергія, що втрачається системою, дорівнює роботі сили непружного опору за один цикл коливань. При цьому обидві ці величини мають приблизні значення, тому що для точного їх визначення необхідно було б знати закон руху. Отриманий висновок – логарифмічний декремент є відношення енергії, яка розсіяна за один цикл до подвоєної максимальної потенційної енергії циклу. Тому коефіцієнт розсіювання енергії за один цикл, ψ , дорівнює подвоєному логарифмічному декременту:

$$\psi \approx 2 \cdot \eta. \quad (4.19)$$

Оскільки нас цікавить значення коефіцієнта ψ безпосередньо після удару, використовуємо значення перших двох амплітуд, тобто a_1 і a_2 :

$$\psi = 2 \cdot \ln \frac{a_1}{a_2}, \quad (4.20)$$

Підставивши значення амплітуд a_1 і a_2 з графіків, зображених на рис. 3.37 та 3.38, маємо:

- для сталевій опорній поверхні

$$\psi_{\text{ст}} = 2 \cdot \ln \frac{40}{5} = 4.14.$$

- для поверхні, покритої композитом "Мультиметал сталь 1018"

$$\psi_{\text{К}} = 2 \cdot \ln \frac{30}{2} = 5.4.$$

Коефіцієнт розсіювання енергії композиту $\psi_{\text{к}}$ більший ніж сталі $\psi_{\text{ст}}$ 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.

4.5 Висновки

Розроблені математичні моделі динамічних напружень в опорах підшипників кочення вузла хитання кристалізатора та роликів секцій МБЛЗ, що дозволило дати оцінку можливості застосування композитного матеріалу при відновленні гнізд підшипників, працюючих в умовах ударного або вібраційного навантаження.

Встановлено, що ударні навантаження викликають у шару композиту напруження близькі до граничних значень міцності цього показника композитного матеріалу, і тому, необхідно підвищувати його несучу здатність за рахунок затиску композитного матеріалу в замкнутому об'ємі.

Виконаний теоретичний аналіз питомої енергоємності та коефіцієнту дисипації навантажених зразків з сталі та композиту дозволяє констатувати, що використання композиту значно поліпшує умови експлуатації підшипників вузлів, оскільки питома енергоємність гнізда відновленого за допомогою композитного матеріалу в 1,8 рази вище ніж сталюого гнізда, а коефіцієнт дисипації відновленого вище у 1,3 рази.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

5.1 Відновлення вузлів роликів провідок

В процесі розливання сталі на МБЛЗ відбувається знос роликів секцій. Зношені секції представлені на рис 5.1, в роликів секціях, передусім, зношуються ролики, їх поверхня контактує безпосередньо з гарячим металом. У процесі тривалої роботи на поверхні роликів з'являються тріщини, відколи й інші дефекти. Зношений роликів представлений на рис 2.9



Рисунок 5.1 – Блок секцій МБЛЗ

Оскільки ролики від перегріву втрачають свої міцнісні характеристики на підставі появи тріщин на поверхні, то їх відновлення можливо лише наплавкою поверхні з подальшою механічною обробкою. Відновлення самих роликів за допомогою композитних матеріалів не можливо. Однак, виходять з ладу не лише ролики, а й також підшипникові опори, таким чином є можливість скоротити затрати на ремонт застосувавши технологію відновлення підшипникових опор з використанням композитного матеріалу (економічний розрахунок представлений в додатку В).

Відновлення опорних вузлів металургійного обладнання, що знаходиться в важких умовах, є актуальним завданням, рішення якої в більшості випадків визначає довговічність всієї машини в цілому. Однак, способи вирішення цього завдання не завжди відповідає сучасним вимогам, і мають такі недоліки як: невисока ефективність і тривалий термін ремонту, що не завжди сумісний з вимогами безперервних процесів металургійного виробництва. Тому відновлення опорних поверхонь є важливим завданням для ремонтників металургійного устаткування, зношені підшипникові опори представлені на рис 5.2



Рисунок 5.2 - Знос опорних поверхонь під підшипником

Знос підшипникових опор призводить до перекосу осей, що негативно відображається на роботі обладнання в цілому: виникає вібрація, з'являються удари, можливі заклинювання і т.д. Існуючий метод відновлювання такого дефекту, який полягав в наплавленні зношених поверхонь і подальшої механічної обробки, є ресурсозатратним та довготривалим.

Тому, запропоновано відновлення опорних поверхонь підшипників виконувати за допомогою композитного матеріалу. Технологія вона включає в себе підготовку поверхні і знежирення, нанесення композиту та формування його за допомогою шаблону або самого підшипника, обробленого

розділювачем. Відновлена за цією технологією опорна поверхня за допомогою композитного матеріалу показана на рис 5.3



Рисунок 5.3 - Підшипникова опора, котра відновлена за допомогою композитного матеріалу

Даний спосіб відновлення опорної поверхні дозволив скоротити час ремонту, зменшити витрати на матеріал, виключив демонтаж, що дозволило виконати ремонт обладнання в короткий термін. За результатами дослідження, дана технологія відновлення дозволить зменшити ударні навантаження в процесі роботи обладнання.

5.2 Відновлення герметичності вузлів хитання кристалізатору

У процесі тривалої експлуатації МБЛЗ, з'являється проблема підвищеної витрати води і прискореного виходу з ладу електричного і автоматизованого обладнання через заливання, і підвищену запарованість.

На підставі отриманих експериментальних результатів з визначення корозійної стійкості та адгезійної міцності композитного матеріалу, була розроблена технологія відновлення герметичності водопостачальних каналів,

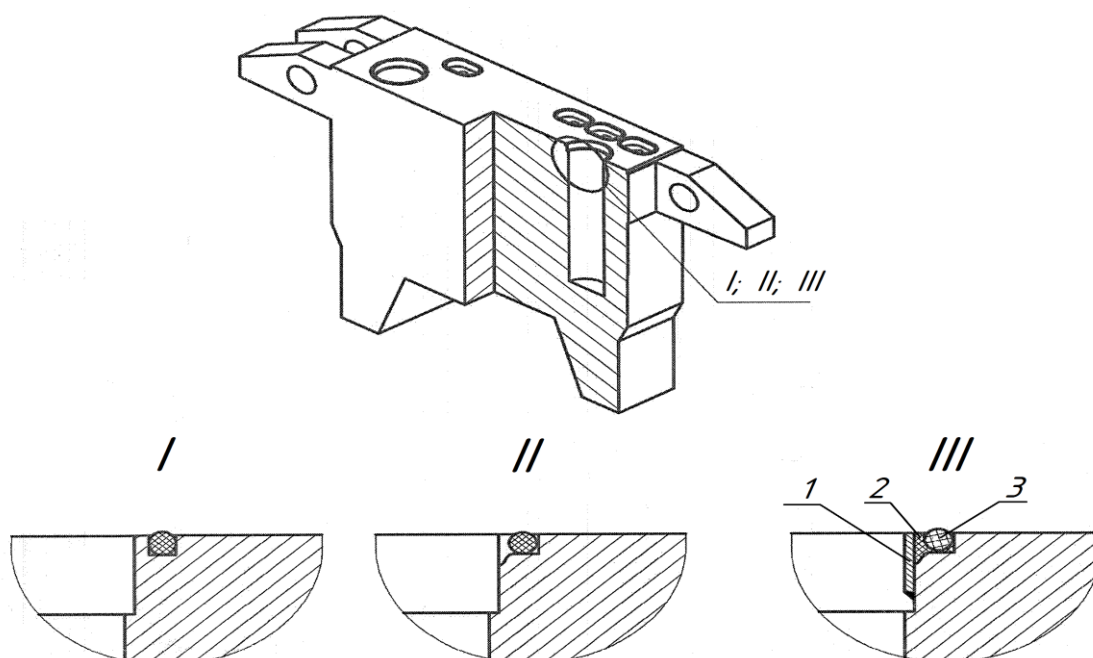
по котрим постачається вода для охолодження кристалізатора МБЛЗ з використанням композитного матеріалу. За результатами огляду обладнання були виявлені дефекти, котрі зображені на рисунку 2.5.

Для ремонту канавок в опорній плиті кристалізатора раніше проводився демонтаж і наплавка канавок з розточкою на фрезерному верстаті, а для цього необхідно демонтувати опорну плиту під кристалізатором, що значно збільшує вартість і час ремонту зображений на рисунку 5.4.

Тому, було розроблено та впроваджено новий метод ремонту, котрий дозволяє значно скоротити час простою обладнання і підвищити надійність МБЛЗ, оскільки композитний матеріал не схильний до корозії, що значно підвищує ресурс обладнання.

Метод ремонту полягає у відновленні зношеної канавки. Поверхню канавки обробляють за допомогою кутової шліфмашинки, видаляють сліди корозії і прибирають гострі кромки. Канавку обробляють знежирюючим розчином, штатні гумові ущільнення обробляють відділювачем. Для ремонту використовували композитний матеріал фірми Діамант. Виконано розрахунок обсягу необхідної маси композитного матеріалу, виходячи зі ступеня зносу канавки і величини виступання гумового кільця. Бічну поверхню канавки відновлено за допомогою сталевий пластини, яку встановлюють всередину канавки і виставляють по рівню за допомогою монтажної лінійки та фіксують за допомогою електродугового зварювання.

Підготувавши для нанесення композитний матеріал заповнюємо канавку. Всередину канавки встановлено гумове кільце оброблене відділювачем. За допомогою мірних пластин необхідної товщини встановлюють необхідний зазор виступання гумового кільця над поверхнею опорної плити під кристалізатором. Приблизна товщина пластин 2,5 мм. Мірні пластини для контролю товщини, зображенні на рис 5.5.



I- канавка під ущільнення в початковому стані; 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 5.4 – Відновлення опорної поверхні під кристалізатором



Гумове кільце

Мірні пластини

Рисунок 5.5 - Розстановка мірних пластин по периметру канавки.

Зверху на мірні пластини укладається лист по площі гумового кільця для того, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження, і занурення гумового кільця на потрібну глибину. На лист вкладається вантаж для створення необхідного навантаження показаний на рис 5.6.



Рисунок 5.6 - Установка листа і вантажу

Після часткової полімеризації композиту (приблизно 8 годин), знімається вантаж і прибирається надлишок полімеру і нерівності за допомогою шабера. Після того, як видалили нерівності залишаємо ще на 16 годин до повної полімеризації. Відновлені канавки, показані на рис 5.7.



Рисунок 5.7 – Відновлені канавки

В результаті виконаного ремонту відновлена герметичність водоподаючих каналів в опорній плиті під кристалізатором МБЛЗ за допомогою композитного матеріалу. Ремонт позитивно позначився на роботі вузла, оскільки в подальшому виключається можливість корозійного зносу канавки, оскільки композитний матеріал не схильний до корозії виходячи з результатів експерименту. Застосування нового методу ремонту дозволяє скоротити витрати на ремонт (економічний розрахунок виконаний в додатку В), а найголовніше, значно скорочує час простою обладнання. Тому застосування для відновлення композитного матеріалу в даному випадку доцільно.

Відновлені водоподаючі канали ефективно використовується протягом більше ніж 3 років, це підтверджується (актом промислового впровадження котрий представлений в додатку Б), це дозволило скоротити витрати води, та таким чином досягти значної економії фінансових коштів.

5.3 Розробка технологій захисту металоконструкцій

Під час роботи машини безперервного лиття заготовок утворюється пар, котрий негативно впливає на стан металоконструкцій. Оскільки металоконструкції постійно працюють в негативних умовах, то вони раніше строку виходять із ладу. Для захисту металевих конструкцій була розроблена технологія, котра дозволяє захистити їх за допомогою композитного матеріалу. Зношені металоконструкції зображенні на рисунку 5.8.



Рисунок 5.8 – Рама зони вторинного охолодження, котра схильна до корозійного зносу.

Технологія захисту сталевих металоконструкцій

Перед початком захисту необхідно виконати зачистку від іржі, це можна виконати сталевією щіткою, абразивними колами, а коли площа поверхні достатньо велика, то за допомогою пікоструйних машин. Наступним кроком є знежирювання поверхні та очікування повного висихання. Для знежирювання можна застосувати розчинник 646 або ацетон. Потім за допомогою валика або шпателя наносити ґрунт ННК-7053F, та зачекати поки він висохне. Наступний

шар захисне покриття можливо нанести на металоконструкцію після часткового висихання першого. Повне висихання настає протягом 24 годин.

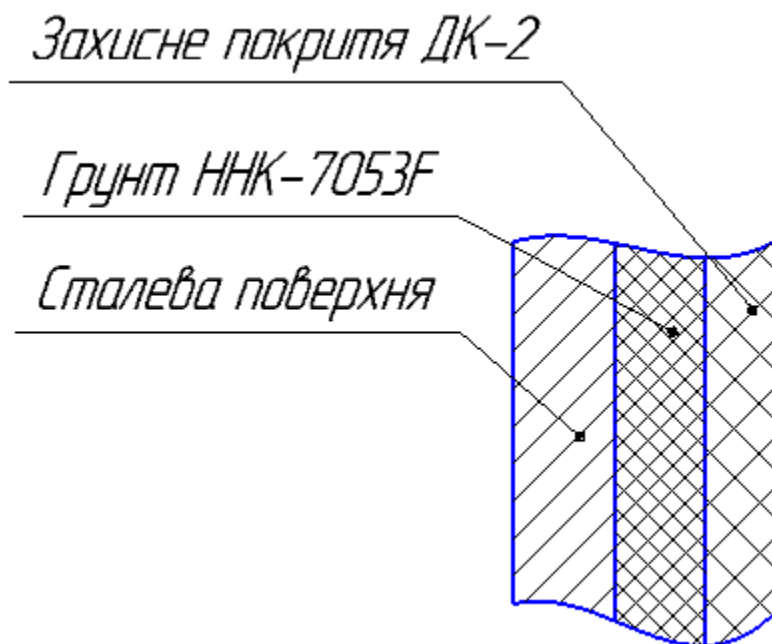


Рисунок 5.9 – Застосування композитного матеріалу для захисту сталевих конструкцій

За результатами впровадження технологій можна зробити висновок що, використання композитних матеріалів при відновленні працездатності устаткування є доцільним в умовах безперервної роботи обладнання.

5.4 Висновки

Розроблені ефективні технології відновлення обладнання МБЛЗ, які базуються на отриманих даних, щодо характеристик композитних матеріалів, зокрема відновлення герметичності механізму хитання кристалізатора, відновлення працездатності підшипникових опор механізму хитання кристалізатора та роликів секцій, а також підвищення терміну придатності металоконструкцій бункеру зони вторинного охолодження.

Одна з цих технологій дозволила, в термін поточного ремонту, відновити працездатність механізму хитання кристалізатора, за рахунок відновлення герметичності водопостачальних каналів кристалізатора на його опорній поверхні.

Запропонований метод відновлення опор підшипників кочення дозволяє скоротити діючі навантаження на їх опорні поверхні та значно скоротити виконання процесу ремонту.

Для підвищення строку служби металоконструкцій МБЛЗ запропоновано спосіб захисту композитним матеріалом, що дозволяє виключити корозійний знос металоконструкцій бункеру зони вторинного охолодження та підвищити термін їх придатності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравченко В.М. Техническое обслуживание , диагностика и ремонт металлургических машин / Кравченко В.М., Ищенко А.А., Сидоров В.В. Буцукин В.В. // «LAP LAMBERT Academic Publishing». - 2020- 533-с .ISBN 978-620-0-23175-8.
2. Должиков В.П. Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве: учебное пособие / В. П. Должиков. - 3-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2019. - 328 с.
3. Волков, Г. М. Машиностроительные материалы нового поколения : учеб. пособие / Г.М. Волков. — Москва : ИНФРА-М, 2018. — 319 с.
4. Ищенко А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами.- Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 247с.
5. Щеглов Б.А., Сафонов А.А. Теоретические основы и прикладные задачи технологии композитов. М.: Ленанд, 2015. 112 с.
6. Баженов, С. Л. Механика и технология композиционных материалов: Научное издание / С.Л. Баженов. - Долгопрудный: Интеллект, 2014. - 328 с. (ISBN 978-5-91559-160-7)
7. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Напряженно-деформированное состояние многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 8. С. 168-179.
8. Головкин Г.С., Дмитренко В.П. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М.: Инфра-М, 2017. 471 с.
9. Архипов И.К., Абрамова В.И. Эффективные упругие характеристики двухкомпонентного сетевого композита // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 12. С. 473-476.

10. Кязимов К.Г., Гусев В.Е. Эксплуатация и ремонт оборудования систем газораспределения. М.: Издательство: НЦ ЭНАС, 2017. 288 с.
11. А.А. Ищенко; Е.В. Дашко. Ремонт деталей и узлов энергетического оборудования композитными материалами / ПГТУ Мариуполь 2016 С.131 -134.
12. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография / В.Г. Артюх.- Мариуполь, Изд. группа «Университет», 2015.- 288с.
13. Соловей С. А. Современное состояние методов повышения коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости сварных соединений / С. А. Соловей // Автомат. сварка. - 2017. - № 3. - С. 51-58.
14. Кожемякин В. Г. Восстановление поверхностного слоя медной плиты кристаллизатора МНЛЗ с использованием плазменно-дуговой технологии / В. Г. Кожемякин, В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Д. В. Ботвинко // Соврем. электрометаллургия. - 2015. - № 3. - С. 23-26.
15. Материалы и инструменты для ремонта промышленного оборудования: клей Tip-Top, металлополимеры Devcon, Thortex, Copon, Nycote, Scotchkote [Электронный ресурс]:Металлополимеры Devcon/ ЗАО "Ремонтные технологии". – режим доступа: <http://7640906.ru/index.htm>, свободный
16. Стребков В.Т. Антикоррозионная защита строительных конструкций и сооружений в условиях действующего металлургического производства. /Металлург. – 2005. - №5. – С. 65-67.
17. Фролов К.В. Машиностроение. Том III-3. Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров и др. // М.: Машиностроение. – 2000.– 840 с.
18. Ступницкий Т. Р. Разработка электродуговых покрытий для восстановления штоков гидроцилиндров горнодобывающего оборудования с использованием порошковых проволок / Т. Р. Ступницкий, М. М. Студент, В. И. Похмурский, М. Б. Тымусь // Автомат. сварка. - 2017. - № 4. - С. 48-53.

19. Григоренко Г. М. Использование метода сварки трением с перемешиванием для ремонта и восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ / Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник, М. А. Полещук, Е. В. Зеленин, В. И. Зеленин, Ю. Н. Никитюк, В. А. Лукаш // Автомат. сварка. - 2015. - № 5/6. - С. 60-63

20. Полещук М. А. Нанесение защитных покрытий на медные панели кристаллизаторов МНЛЗ способом автовакуумной пайки / М. А. Полещук, М. Г. Атрошенко, А. В. Шевцов, А. Л. Пузрин // Автомат. сварка. - 2016. - № 10. - С. 39-43.

21. Качинский В. С. Технология и оборудование для прессовой сварки магнитоуправляемой дугой неповоротных стыков труб малого диаметра в монтажных и стационарных условиях / В. С. Качинский, С. И. Кучук-Яценко, М. П. Коваль, Е. И. Гончаренко // Автомат. сварка. - 2016. - № 5/6. - С. 33-38

22. Шапаренко А. В. Повышение уровня ресурсосбережения в прокатном производстве с помощью электронно-лучевой обработки рабочих валков холодной прокатки / А. В. Шапаренко // Экология и пром-сть. - 2018. - № 2. - С. 74-85.

23. Кулик В. М. Продление ресурса эксплуатации сварных резервуаров из нержавеющей стали путем повышения питтингостойкости / В. М. Кулик, С. А. Осадчук, Л. И. Ныркова, В. П. Елагин, С. Л. Мельничук // Автомат. сварка. - 2016. - № 3. - С. 44-48.

24. Пинчук С.И. Повышение качества противокоррозионной защиты металлоконструкций / С.И. Пинчук // Metallurgical industry. - 2010. - №2. - С. 146-147.

25. Казак К.В. Композиционные высокотемпературные силикатно-эмалевые покрытия для сталей / К.В. Казак, А.К. Казак, В.В. Диденко // Сталь. - 2010. - №5. - С. 131-132.

26. Boris B. Chernov Corrosion and metal protection in seawater / B. Boris // Asia-Pacific journal of marine science and education. - 2011. - №1. p. 81-87.

27. Jacinda L. Schlafly Corrosion protection and connection design / L. Jacinda, P.E. Collins, G.A. Leed, J. Thomas // Modern steel construction. – 2011.– №1. p.122-125.
28. Горбатюк С.М. Использование покрытия для получения диффузионного слоя на стенках кристаллизаторов МНЛЗ / С. М. Горбатюк, А. А. Герасимова, А. Г. Радюк // Metallurg. и горноруд. пром-сть. - 2015. - № 4. - С. 85-88.
29. Albert Molinas Development of new corrosion / Albert Molinas, Amanullah Mommandi. – Colorado: DTD Applied research and innovation branch, 2009. – 74 p.
30. Iscsenko A.A. Renewing worn-out bearing housings using metal-polymer materials / A.A. Iscsenko, Barna Balazs, Molnar Laszlo // GEP, LXIII. Evfolyam. – 2012. – p. 27-30.
31. Замота Т. Н. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте : монография / Т. Н. Замота, В. В. Аулин. - Кировоград : Лысенко В.Ф., 2015. - 302 с
32. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
33. Dr. Gary Heath Anti-wear and corrosion solutions boost boiler life / Dr. Gary Heath // Power Engineer, 2012. – P.49-50.
34. Старов В.Н. Влияние структуры полимеров на эксплуатационные свойства материалов / В.Н. Старов, Ю.Н. Зенни, А.В. Калач // Вестник Воронежского института, 2015. – № 1 (14), С. 11-17.
35. Негий А.Л. Восстановление и защита направляющих материалами зедекс / А.Л. Неглий // Оборудование и инструменты, 2005. – № 2, С. 46-47.
36. Целиков А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов. (в 3-х томах.) Том 2./ А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник, и др.2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия. 1988. 432 с.

37. Шапран Л. А. Об эксплуатационных свойствах роликов МНЛЗ / Л. А. Шапран, Л. Х. Иванова, А. Ю. Хитько, А. А. Бойцов // Металл и литье Украины . - 2017. - № 2/3. - С. 14-17.
38. Буцукин В. В. Исследование влияния упругой деформации рычагов механизма качания на кинематическую точность движения кристаллизатора сортовой МНЛЗ / В. В. Буцукин, Н. А. Родионов // Metallurg. i gornorud. prom-st'. - 2015. - № 7. - С. 132-137.
39. Сотников А.Л. Предупреждение отклонений параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ на основе развития методов диагностики механизма качания: дис. ... канд. Техн. Наук: 05.05.08/ Сотников Алексей Леонидович. – Донецк, 2008. – 205 с.
40. Григоренко Г. М. Восстановительный ремонт слябовых медных кристаллизаторов МНЛЗ. Структура и свойства металла в зоне соединения / Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник, М. А. Полещук, В. И. Зеленин, Е. В. Зеленин // Соврем. электрометаллургия. - 2015. - № 1. - С. 44-49.
41. Воробьева В. И. Противокоррозионная эффективность терпеновых соединений / В. И. Воробьева, Е. Э. Чигиринец, Т. Н. Пилипенко, И. Н. Трус, М. И. Скиба // Metallurg. i gornorud. prom-st'. - 2016. - № 5. - С. 75-80.
42. Тарельник В. Б. Повышение надежности импульсных торцевых уплотнений / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, А. В. Белоус, Т. П. Волошко, А. Н. Жуков // Техн. сервис агропром., ліс. та трансп. комплексів. - 2016. - № 5. - С. 43-54.
43. Сидоров В.А. Анализ систем контроля и диагностирования механизмов качания МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип.102. – С. 46-55.
44. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высшая школа, 1988.- 368с.

45. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005.- 656с.
46. Медовар Л. Б. Моделирование непрерывной разливки комбинированным процессом МНЛЗ + ЭШП / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. В. Сибирь, Е. А. Волченков, Е. А. Педченко, А. А. Полишко, В. А. Лебедь // Соврем. электрометаллургия. - 2017. - № 4. - С. 3-7.
47. Данильченко Ю. М. Диагностика дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения / Ю. М. Данильченко, А. И. Петришин // Вісн. Нац. техн. ун-ту України "КПІ". Сер. Машинобудування. - 2015. - № 3. - С. 159-164.
48. Павлова А. А. Диагностика дефектов подшипников методами неразрушающего контроля / А. А. Павлова // Вестн. ХНАДУ. - 2016. - Вып. 73. - С. 119-122.
49. Назин В.И. Особенности динамических характеристик пружодемпферных конструкций гидростатодинамических подшипников сдвоенного типа / В. И. Назин // Авиаци.-косм. техника и технология. - 2016. - № 6. - С. 27-31
50. Курчаткина В.В. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткина – М.: Колос.– 2000. – 776 с.
51. Молодык Н. В. Восстановление деталей машин / Н. В. Молодык, А. С.Зенкин // Справочник. – М.: Машиностроение.– 1989.–480 с.
52. Касаткин Н.Л. Ремонт и монтаж металлургического оборудования / Н.Л. Касаткин. – М.: «Металлургия», 1970. – 310 с.
53. Кормильцин Г.С. Основы диагностики и ремонта химического оборудования / Г.С. Кормильцин.– Тамбов.: Издательство ТГТУ, 2008.- 120с.
54. Кормильцин Г.С. Диагностика и ремонт технологического оборудования / Г.С. Кормильцин, Р.А. Шубин, А.М. Воробьев. – Тамбов.: Издательство ТГТУ, 2009.- 30с.

55. Кан, Ю.Е. Управление качеством непрерывнолитых заготовок // Сталь. –1991. – №1. – С. 27-28.
56. Spinelli, D. Laser Alignment for the Caster Machine Repair Aisle // AISE Steel Technology. – 2002. – January. – P. 46-47.
57. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.А. Лунев, А.Л. Сотников, Э.М. Ватралик, И.С. Фролов // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №3. – С. 12-25.
58. Industrial 3-D Surveying with Optical Instruments / GLM Laserme technik GmbH. – Witten (Germany): GLM Laserme?technik GmbH, 2007. – 16 p.
59. Laser-Enhanced field services Can Optimize Equipment Performance / SMS Millcraft LCC. – Pittsburgh (USA): SMS Millcraft LCC, 2010. – 2 p.
60. Могильный, С.Г. Новая технология определения геометрических и кинематических параметров вращающихся печей в процессе их эксплуатации / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, И.С. Фролов // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва: зб. наук. пр. – Львів: Львівська політехніка. – 2011. – Вип.1(21). – С. 125-130.
61. Шоломицкий, А.А. Геодезическое обеспечение строительства канатно-ленточного конвейера / А.А. Шоломицкий, А.А. Лунев, К.В. Ковалев // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип.12(173). – С.47-55. – (сер.: гірничо-геологічна).
62. Специальные маркшейдерские работы при строительстве и монтаже оборудования / А.А. Шоломицкий [и др.] // Наук. пр. УкрНДМІ НАН України. – 2011. – №9, Ч.1. – С. 223-235.
63. Наблюдения за деформациями, оценка и прогнозирование технического состояния подъемно-транспортного оборудования / А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, В.М. Нагорный, В.В. Нагорный, Т.Г. Николаева, Н.В. Малеев // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №3. – С. 31-38.

64. Leica TDRA6000: Product Brochure / Hexagon AB. – Unterentfelden (Switzerland): Hexagon AB, 2009. – 8 p.
65. Машины непрерывного литья слабовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Беренов – М.; Металлургия, 1991. – 272 с.
66. Родионов Н.А. Обоснование рационального способа уравнивания механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовки: дис. канд. техн. наук: 05.05.08 / Родионов Николай Александрович. – 2015. – 197 с.
67. Буцукин В.В. Исследование влияния упругой деформации рычагов механизма качания на кинематическую точность движения кристаллизатора сортовой МНЛЗ / В.В. Буцукин, Н.А. Родионов // Металлург. и горноруд. про-сть. – 2015. - №7. – С.132- 137.
68. Measurement and sensor specialists for metal producers / Logika Technologies Inc. – Oakville (Canada): Logika Technologies Inc., 2013. – 8 p.
69. Вдовин К. Н. Гидравлическое оборудование металлургических предприятий: ученик / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, Н. А. Чиченев. – Издательство ФГБОУ ВО МГТУ им. Г. И. Носова, 2016. – 299с.
70. Гребенник В.М. Повышение надежности металлургического обо- рудования / В.М. Гребенник, А.В. Гордиенко, В.К.Цапко. М.:Металлургия, 1988. - 688 с.
71. 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).
72. Могильный, С.Г. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. А. Лунев, А. Л. Сотников, Э. М. Ватралик, И. С. Фролов // Металлург. процессы и оборудование. - 2012. - № 3. - С. 12-25.

73. Сотников А.Л. Теория и практика технического диагностирования оборудования предприятий металлургических и энергетических комплексов: тезисы докладов Межд. науч.-практ. конф., 2012 г., Урзуф. – Мариуполь: ММК им. Ильча, 2012. – С. 33-34.

74. Сотников, А.Л. Расчет долговечности подшипников качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А.Л. Сотников, Н.А. Родионов, А.С. Парфенюк // Металлургические процессы и оборудование. – 2014. – №1. С. 71-78.

75. Сидоров В.А. Эксплуатация подшипников качения: монография / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2014. – 175 с.

76. Сидоров В.А. Исследование причин неисправностей работы привода перемещения холодильника МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников, И.Г. Золкин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – №1. – С.21-24.

77. Сотников, А.Л. Виброметрический метод диагностирования подшипников рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2010. – №3. – С. 27-32.

78. Сидоров, В.А. Техническое состояние механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век: тезисы докладов Межд. науч.-техн. конф., 21-23 сентября 2004 г., Донецк. – Донецк: ДонГТУ, 2004. – С. 58.

79. Соловей С.А. Современное состояние методов повышения коррозионной стойкости и сопротивления коррозионной усталости сварных соединений : (обзор) / С. А. Соловей // Автомат. сварка. - 2017. - № 3. - С. 51-58.

80. Соколов, С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.

81. Ищенко А. А. Исследование механических свойств композитного материала в условиях действия ударных нагрузок./ А. А Ищенко, Д.Л. Какарека // *Металлургическая и горнорудная промышленность* 2017 №05- 2017.- с.80-84
82. Ищенко А.А. Комплексное исследование механических свойств композитных материалов /А.А.Ищенко, Е.В.Дашко // 16 Международный научно-практический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте». – К.: АТМ Украины, 2016 – С.107-109.
83. Гринченко, А. С. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок : монография / А. С. Гринченко, А. И. Алферов. — Харьков : Планета-Принт, 2017. — 136 с.
84. Кравченко, В.С. Основы научных исследований: Учебное пособие / В.С. Кравченко, Е.И. Трубилин, В.С. Курасов, В.В. Куцеев, Е.В. Труфляк. – Краснодар: КГАУ, 2005. – 136 с.
85. Кравченко, В.С. Основы научных исследований: Сборник заданий / В.С. Кравченко, Е.И. Трубилин, В.С. Курасов, В.В. Куцеев, Е.В. Труфляк. – Краснодар: КГАУ, 2005. – 105 с.
86. Гринченко А. С. Прогнозирование надежности элементов машин при случайном пуассоновском потоке экстремальных нагружений / А. С. Гринченко, А. И. Алферов // *Техн. сервіс агропром., ліс. та трансп. комплексів.* - 2017. - № 7. - С. 141-148.
87. Музыка Н. Р. Оценка эксплуатационной надежности листовых упругопластических материалов по параметрам твердости / Н. Р. Музыка, В. П. Ламашевский // *Проблемы прочности.* - 2017. - № 3. - С. 158-166
88. Bociaga Elzbieta. Selected technical problems with polymer application on slide ways / Elzbieta Bociaga, Włodzimierz Baranowski // *Technical sciences.* – 2005. – № 8. – P. 233-237.

89. Friedrich K. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites / K. Friedrich, Z. Zhang, A. Schlarb // Composites Science and Technology. – 2005. – V. 65, Issues 15–16, P. 2329-2343.
90. Hutchings Jan. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials / Jan Hutchings, Philip Shipway // Butterworth – Heinemann, 2017. – 377p.
91. Sunderam A.S. Ballistic Impact Performance Study on Thermoset and Thermoplastic Composites / A.S. Sunderam, A.A. Franezhuth, P.K. Kumar, V. Sivakumar // Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017. – Vol. 17 (6), P. 1260-1267.
92. Mao Xinyong A complete methodology for identifying dynamics of heavy machine tool through operational modal analysis / Mao Xinyong, Yan Ruizhi, Cai Hui, Li Bin, Luo Bo, He Songping // Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part B-Journal Of Engineering Manufacture, 2015. – Vol. 230, P. 1406-1416.
93. Mahdi Rahmani Experimental Investigations on Stick-Slip Phenomenon and Characteristics of LinearGuides / Mahdi Rahmani, Stephan Krall, Friedrich Bleicher // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering, 2015. – Vol. 100, P. 1023-1031.
94. Bianch G. Analysis of vibration damping in machine tools / G. Bianch, S. Ganga, N. Cau, F. Paolucci // Procedia CIRP, 2014. – Vol. 21, P. 367-372.
95. Basu S.K. Analysis of optimum velocity in case of stick – slip slidind under normal oscillating force applied on the slide / S.K. Basu // Mech. Engng. Bull (India), 2017. – № 7, P. 117-119.
96. Song J. Reciprocating friction and wear of poliyimide composites with solid lubricants / J. Song, G. Zhoo, Q. Ding, I. Qiu // Journal of Polymer Engineering, 2018. – Vol. 38, P. 363-370.
97. Mahdi R. Experimental investigations on stick – slip phenomenon and friction characteristics on linear guides / R. Mahdi, K. Stephan, B. Friedrih // Procedia Engineering, 2015. – Vol. 100 (january), P. 1023-1031.

98. Ефремов В.Д. Металлорежущие станки / В.Д. Ефремов, В.А. Горохов, А.Г. Схиргладзе. — М.: изд. ТНТ, 2016. — 695 с.
99. Минаков А.П. Анализ способов повышения износостойкости направляющих металлорежущих станков / А.П. Минаков, И.М. Юшкевич, И.Д. Камчицкая и др. // Вестник Белорусско-Российского университета. Машиностроение, 2016. — № 3 (52), С. 40-50.
100. Мусохранов М.В. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов / М.В. Мусохранов, В.В. Калмыков, М.Ю. Авраменко // Фундаментальные исследования, 2016. — № 8 (часть 1), С. 55-58.
101. Бушуев В.В. Металлорежущие станки. — М.: Машиностроение, 2014. — т.2, 608 с.
102. Пилипенко А. И. Исследование ингибирования гидрооксидом натрия коррозии констукционных материалов систем оборотного водоснабжения / А. И. Пилипенко, А. М. Панчева, А. М. Резниченко, О. В. Миргород, Н. Н. Мирошниченко, А. Л. Синческул // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2017. - № 2/1. - С. 21-28
103. Браиловский М.И. Оптимальные современные материалы для изготовления базовых конструкций и элементов металлорежущих станков / М.Н. Бранловский, А.Г. Воскобойник, А.А. Дьяконов, И.В. Шмид // СТИН, 2016. — № 4, С. 2-7.
104. Ковальов В.Д. Розробка систем управління якістю роботи важких верстатів і інструментів / В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко // Сборник научных трудов. Качество, стандартизация. — Киев, 2014.
105. Kovalev V. Adaptive optimal control of a heavy lathe operation / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, P. Dašić // Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), April 2014. — Vol. 4, Issue 4. — P. 269-275.
106. Xiong Yao Machining process parameters optimization for heavy-duty CNC machine tools in sustainable manufacturing / Xiong Yao, Wu Jun, Deng Chao,

Wang Yuanhang // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2016. – Vol. 87, P. 1237-1246.

107. Струтинский В.Б. О восстановлении направляющих станков с помощью полимерного материала / В.Б. Струтинский, Е.А. Ищенко, В.П. Гришко, Д.А. Воробьев // Вісник Приазовського Державного технічного університету, 2015. – т.2, вип. 30, С. 91-97.

108. Струтинский В.Б. Триботехнические исследования полимерных композитов, применяемых при воостановлении направляющих станков / В.Б. Струтинский, А.В. Радионенко, Е.А. Ищенко // Проблеми тертя та зношування, 2015. – № 2 (67), С. 4-11.

109. Ищенко Е.А. Разработка способов повышения качества полимерных покрытий направляющих станков / Е.А. Ищенко // Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», м. Чернігів, 2016.

110. Mahdi Rahmani Experimental Investigations on Stick-Slip Phenomenon and Characteristics of LinearGuides / Mahdi Rahmani, Stephan Krall, Friedrich Bleicher // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering, 2015. – Vol. 100, P. 1023-1031.

111. Bianch G. Analysis of vibration damping in machine tools / G. Bianch, S. Ganga, N. Cau, F. Paolucci // Procedia CIRP, 2014. – Vol. 21, P. 367-372.

112. Tomaš Bakša Durability of Cutting Tools during Machining of Very Hard and Solid Materials / Tomaš Bakša, Tomaš Kroupa, Pavel Hanzl, Miroslav Zetek // 25th DAAAM International Symposium of Intelligent Manufacturing and Automation, 2015. – Vol. 100, P. 1414-1423.

113. Бруяка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие. / Бруяка В.А., В.Г. Фокин, Я.В.Курвева.-Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. -148с.

114. Song J. Reciprocating friction and wear of polyimide composites with solid lubricants / J. Song, G. Zhoo, Q. Ding, I. Qiu // Journal of Polymer Engineering, 2018. – Vol. 38, P. 363-370.

115. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Численное моделирование поведения пластины из полимерного композита под действием динамических нагрузок при наличии множественных дефектов между слоями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 10. С. 271-278.

116. Анцулов А.В. Аналитическая модель износных отказов роликовых конических подшипников качения // Механическое оборудование металлургических заводов. №1(8) 2017.

117. Дашенко А.Ф. Теоретические основы инженерной механики : [учебник] / А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, Ю. Н. Свиначев. - Одесса : Плутон, 2015. - 655 с. - Библиогр.: с. 652-655.

118. Медведский А.Л. Сравнительный анализ критериев разрушения многослойной композитной пластины при наличии межслоевых дефектов / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. Вып. 9. С. 399-409.

119. Штаерман И. Я. Контактна задача пружності / И. Я. Штаерман. - М.: Гостехтеориздат, 1949. - 295 с.

120. Гогаев К. А. Износостойкие высокотемпературные композиционные подшипники скольжения на основе алюминидов титана / К. А. Гогаев, В. А. Барабаш, А. Н. Демидик, А. И. Быков, В. Т. Варченко, В. Л. Сироватка // Порошковая металургия. - 2018. - № 3/4. - С. 77-82

121. Струтинский В.Б Математические и экспериментальные методы исследования металлорежущих станков при восстановлении направляющих с помощью полимера / В.Б. Струтинский, Т.Н. Карпенко, Е.А. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. – №3(672), С. 17-23 .

122. Вульфсон И. И. Краткий курс теории механических колебаний / И. И. Вульфсон— Библиотека ВНТР. — М.: ВНТР, 2017. — 241 с.
123. Бондаренко Л. Н. Теоретические основы гасителей колебаний трением качения / Л. Н. Бондаренко, С. А. Яковлев, И. Е. Крамар, А. И. Шаптала // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2015. - № 4. - С. 153-162.
124. Беляев Н.М. Соппротивление материалов Гос.Изд. Физ-Мат. Лит., М, 1962г, 856с.
125. Артюх Г.В. Энергоёмкость полиуретановых амортизаторов.// Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1999.- Вып.4. с.166-172.
126. Артюх Г.В., Артюх В.Г., Беляев А.Н. Малогабаритные упругие элементы для металлургических машин.// Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2002.- Вып.6. с.137-140.
127. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругой колебаний, изд. «Машиностроение», М, 1967. 316с.
128. Пат. №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.
129. Пат. №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.
130. Пат. №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.

131. Пат. №130011 Україна, МПК (2006): F16C 33/00, B05D 1/26 (2006.01), B23P 9/02 (2006.01), B23P 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.

ДОДАТОК А

Belzona 1111 (Super Metal):

Ключевая техническая информация:	
Жизнеспособность при температуре 25°C	15 минут
Время отверждения для полной механической нагрузки при температуре 25°C	20 часов
Адгезионная прочность на отрыв (D4541 / ISO 4624)	228 кг/см ² (22,33 МПа) отверждение при комнатной температуре на абразивоструйно очищенной стали
Прочность на сжатие (ASTM D695)	907 кг/см ² (88,9 МПа) отверждение при комнатной температуре
Теплостойкость	93°C во влажных условиях, 200°C в сухих условиях
Высокая адгезия к таким материалам, как	Алюминий, медь, сталь, нержавеющая сталь, чугун, свинец, стекло, дерево, большинство видов пластмассы и др.
Типичные применения	Адгезив для сцепления металлов и создания регулировочных прокладок, затирка, приклеивание, заплаточный ремонт и др.
Размер упаковки продукта	400 г, 1 кг, 5 кг. Размер упаковки может варьироваться в зависимости от региона.

ТехноПласт-паста Стандарт/ FibaGel ISO

Типичные физические свойства	Единицы измерения	Числовые показатели	Метод
Удлинение при разрыве	%	8,0	ASTM D3039
Относительная плотность	кг/м ³	1,1	Note LV
Твердость	Баркол	30-35	ASTM D2583
Прочность на изгиб	МПа	135	ASTM D790
Адгезия к стали	МПа	20	ISO 4624*6
Ударная прочность	Дж	7,5	ГОСТ 4765-73
Адгезия к стали после погружения	МПа	17,8	ISO 4624 *1,6
Адгезия к стали после циклической термообработки	МПа	10	To -194°C*2,6
Адгезия к ПЭ	МПа	4	ASTM D5179*3
Максимальная рабочая температура	°C	80	
Макс.температура погружения	°C	70	
Выдержка в горячей воде 60°C	°C	отличная	В помещении*4,6
Катодная дисбондментация	мм	1,5	ASTM G42*5,6

MasterBrace ADH 1406

Основные атрибуты	
Производитель 	BASF
Страна производитель	Германия
Состояние материала	Готовая смесь
Тип по составу	эпоксидный
Тип использования	Универсальный
Упаковка	Банка металлическая
Фасовка материала (кг)	5.0
Цвет	 Серый
Прочность на сжатие (20°C) TS EN 196 через 1 день	30 МПа
Прочность на изгиб (20°C) TS EN 196 через 7 дней	75 МПа
Адгезионная прочность через 7 дней к бетону	3 МПа
Адгезионная прочность через 7 дней к стали	3.5 МПа
Минимальная толщина нанесения	2 мм
Максимальная толщина нанесения	30 мм
Минимальная температура при монтаже	5 минус градусов C
Максимальная температура при монтаже	30 градус C
Время переработки (20°C)	40 мин

ДОДАТОК Б

Утверждаю:

Зам. директора по ремонтам

ЧАО МК «АЗОВСТАЛЬ»

А.Е. Егоров

2019г.



Акт

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта Какареки Д.Л. при
восстановлении герметичности подвижной рамы механизма качания кристаллизатора
МНЛЗ-6 конвертерного цеха

Мы, комиссия в составе: механик конвертерного цеха ЧАО МК «АЗОВСТАЛЬ» Кучеренко А.П.; начальник ЦСО ООО «МЕТИНВЕСТ-ПРОМСЕРВИС» Антоненко Н.В., профессора кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии(МОЗЧМ)» Ищенко А.А и аспиранта кафедры МОЗЧМ Какареки Д.Л. составили настоящий акт в том, что в период с 27.09.2016г. по 29.09.2016г. по предложенной аспирантом ПГТУ Какарекой Д.Л. технологии и с участием специалистов ПГТУ восстановлена композитным материалом фирмы "Diamant" герметичность камер для подачи воды подвижной рамы механизма качания кристаллизатора МНЛЗ №6 конвертерного цеха.

Эксплуатация восстановленного узла в период с октября 2016г на протяжении 3-х месяцев до замены, доказала работоспособность разработанной технологии и экономическую целесообразность её использования. Восстановление герметичности выполнено без демонтажа рамы, то есть, непосредственно на месте ее эксплуатации в течение текущего ремонта (48 часов). Традиционная же схема ремонта заключается в демонтаже подвижной рамы, отправке ее в механический цех на наплавку и фрезеровку, что по срокам означало бы вывод из строя МНЛЗ на гораздо более длительный срок.

Особенностью предложенной технологии является то, что она исключает последующее корродирование восстановленного узла и повторение аварийной ситуации с утечкой воды.

От ЧАО МК «АЗОВСТАЛЬ»

Кучеренко А.П.

Антоненко Н.В.

От ПГТУ

Ищенко А.А.,

Какарека Д.Л.

ДОДАТОК В

Утверждаю:
Начальник производства
ЧАО «Каучук»
Тюнин С.А.

« 2 » _____ 2019



Акт

внедрения разработанной в диссертационной работе
аспиранта Какареки Д.Л. технологии восстановления гнезда подшипника
редуктора с помощью композитного материала
«Мультиметалл-Сталь».

Мы, комиссия в составе начальника энергомеханической службы ЧАО «Каучук» Марфлюк И.В. и представителей «Приазовского государственного технического университета» (ПГТУ) – профессора Ищенко А.А. и аспиранта Какареки Д.Л. составили настоящий акт в том, что 25 сентября 2019г по технологии ПГТУ с помощью композитного материала «Мультиметалл-Сталь» восстановлена опорная поверхность под подшипником в редукторе смесителя вальцев. Предыдущий опыт подобных работ восстановления гнезд подшипников показал экономическую целесообразность разработанного метода ремонта, что позволяет в короткие сроки без применения механической обработки ремонтировать вышедшие из строя опорные узлы подшипников.

Разработанная технология имеет широкие перспективы внедрения в промышленности.

от ЧАО «Каучук»

Марфлюк И.В.

от ПГТУ

Ищенко А.А.

Какарека Д.Л.