

- in plain bearings with self-lubricating filler»], *Metallurhicheskiye protsessi y oborudovanye – Metallurgical processes and equipment*, № 3, pp. 24-28, 2011. (Rus.)
18. T. Hagemann, P. Pfeiffer, and H. Schwarze, «Measured and predicted operating characteristics of a tilting-pad journal bearing with jacking-oil device at hydrostatic, hybrid, and hydrodynamic operation», *Lubricants*, vol. 6, № 3, pp. 1-15, 2018. doi: **10.3390/lubricants6030081**.
19. F. Concli, «Journal bearing: An integrated CFD-analytical approach for the estimation of the trajectory and equilibrium position», *Applied Sciences*, vol. 10, № 23, pp. 1-15, 2020. doi: **10.3390/app10238573**.

Стаття надійшла 07.11.2024

Стаття прийнята 02.12.2024

УДК 621.7-4

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321231

© Іщенко А.О.¹, Рассохін Д.О.², Носовська О.В.³,
Кравченко В.М.⁴, Бем Р.⁵

ВИВЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕМОНТІВ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

У статті розглядається вплив зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами. У сучасній важкій промисловості та машинобудуванні застосування композитів набуває дедалі більшої популярності завдяки їхнім численним перевагам, таким як швидке відновлення працездатності обладнання та можливість проведення ремонтних робіт безпосередньо на місці експлуатації. Проте виконання ремонтів у складних умовах, наприклад, при низьких температурах і високій вологості, ставить перед інженерами нові виклики. У статті аналізуються останні дослідження, які показують, що для забезпечення надійності металополімерного з'єднання необхідно дотримуватися певних умов відносної вологості та температури. Встановлено, що найкращі результати адгезійної міцності досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом та знежирення поверхні спеціальними очисниками. Дослідження проводилися на зразках композитного матеріалу «мультиметал-сталь 1018», виготовленого фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany). Випробування виконувалися на розривній машині PM20 в лабораторії кафедри МОЗЧМ ДВНЗ «ПДТУ». Основні результати показали, що довговічність обладнання, відремонтованого за допомогою композитів, значною мірою залежить від умов нанесення матеріалу на металеву поверхню. При високій вологості та низькій температурі на поверхневих шарах металу конденсується волога, що призводить до корозійних процесів і зниження адгезійної міцності з'єднання «метал-композит». Для підвищення адгезійної міцності рекомендується використовувати рідкотекучий мультиметал як перший адгезійний шар або підігрівати

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6189-7830, ischenko50@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0002-3479-9485, dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1313-4767, nosovska_o_v@pstu.edu

⁴ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-5318-6277, kvm1249@gmail.com

⁵ д-р техн. наук, професор, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0001-7768-4592, robert.boehm.1@htwk-leipzig.de

настоподібний мультиметал. Додатково розглянуто можливість знежирення поверхонь ацетоном, що є більш доступним, хоча фірмові очисники демонструють кращі результати в умовах тривалого використання. Висновки статті підтверджують необхідність врахування зовнішніх факторів під час проведення ремонтних робіт з використанням полімерних композитів. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вивчення впливу інших зовнішніх факторів, таких як механічні навантаження та хімічна агресія, на властивості композитних матеріалів.

Ключові слова: полімер, відновлення, композит, адгезія, обладнання, мультиметал.

A.O. Ishchenko, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska, V.M. Kravchenko, R. Böhm. Studying the complex influence of external factors on the effectiveness of repairs with polymer composite materials. The article discusses the influence of external factors on the effectiveness of repairs with polymer composite materials. In modern heavy industry and mechanical engineering, the use of composites is becoming increasingly popular due to their numerous advantages, such as rapid restoration of equipment performance and the ability to carry out repairs directly at the place of operation. However, performing repairs in difficult conditions, such as low temperatures and high humidity, poses new challenges for engineers. The article analyzes recent studies that show that certain conditions of relative humidity and temperature must be met to ensure the reliability of a metal-polymer joint. It was found that the best adhesion strength results are achieved after processing the samples with a grinding wheel and degreasing the surface with special cleaners. The research was conducted on samples of the composite material «multimetal steel 1018» manufactured by Diamant Metal Plastics GmbH (Germany). The tests were performed on the RM20 tensile machine in the laboratory of the PSTU Department of MMCM. The main results showed that the durability of equipment repaired with composites largely depends on the conditions of material application to the metal surface. At high humidity and low temperature, moisture condenses on the surface layers of the metal, which leads to corrosion processes and a decrease in the adhesive strength of the metal-composite joint. To increase the adhesion strength, it is recommended to use a liquid multimetal as the first adhesive layer or to heat a paste multimetal. Additionally, the possibility of degreasing surfaces with acetone is considered, which is more affordable, although branded cleaners show better results in conditions of long-term use. The conclusions of the article confirm the need to take into account external factors when carrying out repair work using polymer composites. Further research should be aimed at studying the effect of other external factors, such as mechanical stress and chemical aggression, on the properties of composite materials.

Keywords: polymer, restoration, composite, adhesion, equipment, multimetal.

Постановка проблеми. Застосування композитних матеріалів під час відновлення промислового обладнання набуває дедалі більшого поширення у важкій промисловості та машинобудуванні. Відновлення деталей різного устаткування в умовах механічних цехів, коли ремонт виконується в закритих опалювальних приміщеннях, – це оптимальний варіант застосування композитів. Однак у цьому разі не виникає особливих перешкод для використання під час відновлення традиційних методів ремонту – наплавлення, напилення та механічного оброблення. Ефективне ж використання композитів має місце насамперед у тих випадках, коли ремонт виконують в умовах діючого прокатного цеху або взагалі просто неба, без демонтажу деталей і їх відправлення в механічний цех. Ще один фактор, що забезпечує безсумнівну перевагу композитних матеріалів, – це можливість відновлення працездатності машини в найкоротші терміни і на місці експлуатації. Це виявляється можливим шляхом виключення операцій мехобробки завдяки формуванню посадкових та інших поверхонь за допомогою шаблонів і кондукторів. Безумовно, ремонт на місці експлуатації не вичерпує всіх переваг і можливостей ремонту композитами, оскільки трапляються випадки, коли навіть у механічному цеху розібрати конструкцію для встановлення деталі, що відновлюється, на верстат не представляється можливим з тих чи інших причин. А застосування композитів у такому разі дає змогу розв'язати виниклу ремонтну проблему. До таких випадків можна віднести, наприклад, відновлення дзеркала гідроциліндра, коли він вбудований в іншу корпусну деталь, наприклад, у корпус невеликого преса. Слід зазначити,

що композитні матеріали мають безсумнівні переваги, такі як швидке відновлення працездатності машини та можливість ремонту на місці експлуатації без демонтажу деталей. Проте використання композитів у складних умовах (наприклад, при ремонті на відкритому повітрі або в неопалюваних приміщеннях) стикається з багатьма викликами, пов'язаними з впливом зовнішніх факторів на міцність та адгезійну здатність матеріалу. Ця проблема є важливою як з наукової точки зору, оскільки вимагає глибокого розуміння властивостей композитів у реальних умовах, так і з практичної, оскільки її вирішення дозволить значно підвищити ефективність ремонтних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Очікувані властивості композитних матеріалів безпосередньо залежать від призначення та сфери їх застосування, а також від складу і структури компонентів, з яких вони виготовлені [1]. Враховуючи специфічні вимоги до міцності, жорсткості, стійкості до корозії, температурної стабільності, електропровідності або інших властивостей, композитні матеріали можуть бути адаптовані для використання в різних галузях промисловості, таких як авіація, автомобілебудування, будівництво, медична техніка та багато інших. Наприклад, у авіаційній промисловості часто потрібні матеріали з високою міцністю при низькій вазі, тоді як у будівництві важливішими можуть бути довговічність та стійкість до погодних умов. У машинобудуванні, навіть у межах однієї конструкції, можуть використовуватись декілька типів композитів одночасно (рис. 1).

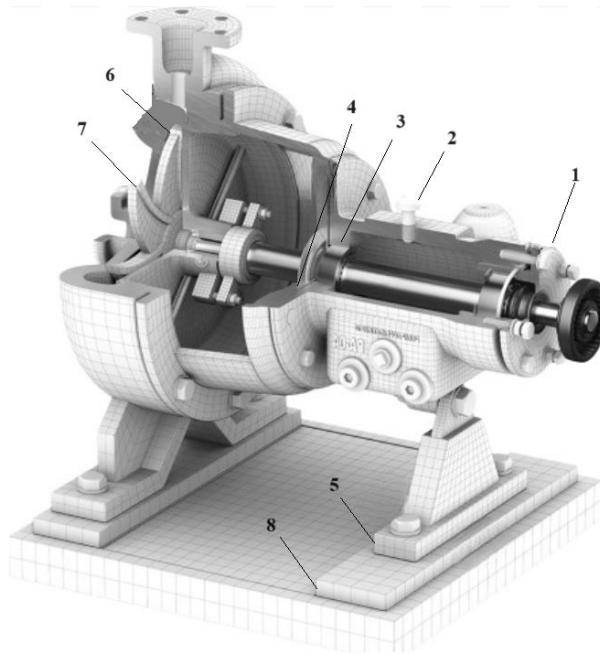


Рис. 1 – Застосування композитних матеріалів: 1. Для відновлення посадкового гнізда підшипника в корпусі; 2. Герметизація масляної пробки; 3. Ущільнення посадкового гнізда підшипника; 4. Герметизація фланців насоса; 5. Відновлення опорних поверхонь корпусу; 6. Захист корпусу насоса від зношення; 7. Захист робочого колеса насоса; 8. Створення захисного шару між опорою корпусу і фундаментом плитою (фото Henkel, Adhesive Technologies, www.henkel.com)

Розглянемо основні сфери застосування композитів, а також вимоги, що висувуються них:

1. При будівництві первинних конструкцій, що дають змогу знизити вагу конструкції та підвищити її втомну стійкість. Необхідна висока динамічна міцність, а також стійкість у робочому діапазоні температур;

2. Збірка вторинних конструкцій, для фіксації частин або компонентів на основній конструкції, а також для підвищення розподілу навантаження. Важливе значення має адгезія. При цьому композити мають бути такими, що легко наносяться і швидко тверднуть;

3. Механічна збірка в межах пари елементів дає змогу запобігти самовідгвинчуванню деталей, а також забезпечує герметизацію. Важливим фактором є витрата композитних матеріалів, що дає змогу виконувати неодноразову заміну компонентів механізму із заміною композиту. Крім того, композит має виконувати функцію ущільнювача, що підвищує міцність з'єднання;

4. Захист поверхонь, що дає змогу створити додатковий шар, який перешкоджає зносу. Пріоритетним є час ремонту з використанням композитних матеріалів.

У поточній статті ми розглянемо тільки варіант застосування композитних матеріалів як шару, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження.

Не менш важливим питанням є і безпека застосування композитів. Зокрема, відомі розробки, спрямовані на унеможливлення викиду розчинників під час футерування обладнання гумоподібним композитом [2].

Не менш важливим є умови нанесення композиту, які можуть впливати на його кінцеві характеристики. Ці умови включають температуру та вологість середовища, методи нанесення (наприклад, ручне накладання шарів, розпилення або використання прес-форм), а також час і технології затвердіння. Важливо також враховувати адгезію між шарами та можливість виникнення дефектів, таких як бульбашки повітря або неоднорідності в структурі матеріалу. Всі ці фактори можуть значно впливати на якість та довговічність готового композитного виробу, тому ретельне планування та контроль процесу нанесення є критичними для досягнення бажаних властивостей матеріалу. Крім того, ремонт на місці експлуатації об'єкта в неопалюваному приміщенні або взагалі просто неба пов'язаний з цілою низкою обмежень як за температурними умовами, так і з інших причин, що впливають і на міцність композиту, і на його адгезійну здатність. Саме з цієї причини видається доцільним провести аналіз виконаних раніше експериментальних досліджень з погляду особливостей властивостей композитів у реальних умовах їх застосування.

До таких умов насамперед слід віднести:

- температурні режими застосування та експлуатації композитів;
- вологість повітря під час виконання робіт;
- якість підготовки поверхні під час нанесення композиту, включно із зачищенням і знежиренням;
- правила нанесення композиту на відновлювану поверхню.

Від цих факторів залежать як міцність композитного матеріалу, так і його адгезійна здатність. Попередні дослідження [3-5] показали, що для забезпечення довговічності і надійності металополімерного з'єднання необхідно дотримуватись певних умов відносної вологості та температури. Дослідження адгезійної міцності показали, що наявність забруднювальних речовин на поверхні металу, метод підготовки поверхні та якість знежирення значно впливають на міцність з'єднання. Попередня обробка поверхні може бути виконана за допомогою хімічних методів, плазмової обробки, лазерної обробки або піскоструминної обробки. При цьому застосування лазера активує поверхню вуглепластиків і негативно впливає на міцність основної поверхні [6]. Необхідність попередньої обробки продиктована не тільки прагненням видалити забруднення, а й необхідністю збільшити полярність поверхні, а також площу контакту на межі полімер-поверхня. Слід зазначити, що піскоструминна обробка є трудомістким процесом і може призвести до пошкодження поверхні. Одним із сучасних методів зачистки поверхні є створення відривного шару [7]. При цьому видалення зношеного шару призводить до утворення нової, незабрудненої поверхні. Однак таку поверхню необхідно активувати, а саму технологію потрібно застосувати під час виготовлення деталі, що робить її використання для наявних механізмів нерентабельним. Застосування вологої хімічної обробки поверхонь дає змогу ефективно підвищити міжфазну адгезію [8]. Однак такий метод не може бути автоматизований. Крім того, під час обробки утворюється велика кількість хімічних відходів, що може завдати істотної шкоди навколишньому середовищу.

Попри значні досягнення у вивченні властивостей композитів, залишаються *невирішеними питання впливу низьких температур і високої вологості на полімеризацію матеріалу, а також оптимізації умов нанесення композитів на різні поверхні*. Необхідно також детальніше вивчити вплив різних методів підготовки поверхні та знежирення на адгезійну міцність з'єднань у реальних умовах експлуатації.

Метою цієї статті є вивчення впливу зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами. Завданнями дослідження є:

1. Визначення оптимальних умов відносної вологості та температури для нанесення композитних матеріалів.

2. Аналіз впливу різних методів підготовки поверхні та знежирення на адгезійну міцність з'єднань.

3. Розробка рекомендацій щодо використання композитних матеріалів у складних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилися на зразках композитного матеріалу «мультиметал-сталь 1018», виготовленого фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany) з такими характеристиками (Таблиця 1).

Таблиця 1

Технічні характеристики матеріалу «мультиметал-сталь 1018»

Межа міцності при стисненні	Н/мм ²	макс.160
Межа міцності при розтягуванні	Н/мм ²	76
Межа міцності під час зсуву	Н/мм ²	89
Межа міцності під час вигину	Н/мм ²	22
Модуль пружності	Н/мм ²	14.000
Коефіцієнт лінійного подовження		$32 \cdot 10^{-6} \text{ K}$
Температурна стійкість - тривала	°C	-40 / + 90°C
Коефіцієнт тертя зчеплення зчеплення		> 0,5
Час обробки при +20°C	хв.	~ 45
Затвердіння при +5°C	год.	~ 72
Затвердіння при +20°C	год.	~ 24
Питома вага	г/см ³	2,4
Зберігання	міс.	12
Розмір упаковки	кг	1,5 + 4,5

Випробування виконували на розривній машині РМ20 в лабораторії кафедри МОЗЧМ ДВНЗ «ПДТУ». Основні результати показали, що довговічність обладнання, відремонтованого за допомогою композитів, залежить від температури та вологості навколишнього середовища. За високої вологості та при цьому недостатньо високої температури на поверхневих шарах металів, з якими контактуватиме композит, конденсується волога, яка згодом може відігравати роль центрів зародження корозійних процесів, що знижують адгезійну міцність з'єднання «метал-композит». Вивчення впливу цих чинників дало змогу рекомендувати таке співвідношення відносної вологості та температури навколишнього середовища, яке визначає значення температури, за якої можна виконати ремонт, забезпечуючи довговічність і надійність утвореного металополімерного з'єднання [3]. Для забезпечення надійності металополімерного з'єднання рекомендується дотримуватись наступних умов:

- Відносна вологість 80% при температурі > 30°C;
- Відносна вологість 70% при температурі > 25°C;
- Відносна вологість 60% при температурі > 18°C.

Температура навколишнього повітря, а отже й температура композиту в момент змішування та полімеризації, визначає багато інших особливостей застосування цих матеріалів, без знання та врахування яких виконання ремонтних робіт не буде успішним та ефективним.

Так, наприклад, температура навколишнього повітря визначає час, відведений для вироблення, тобто час нанесення композиту на металеву поверхню. Експерименти, проведені з «мультиметалом-сталь 1018», дали змогу побудувати графік, наведений на рис. 2. Він у першому наближенні дає змогу оцінити, як впливає підвищення вихідної температури його компонентів на час вироблення і за необхідності виконати коригування технології відповідно до зовнішніх умов проведення ремонтних робіт.

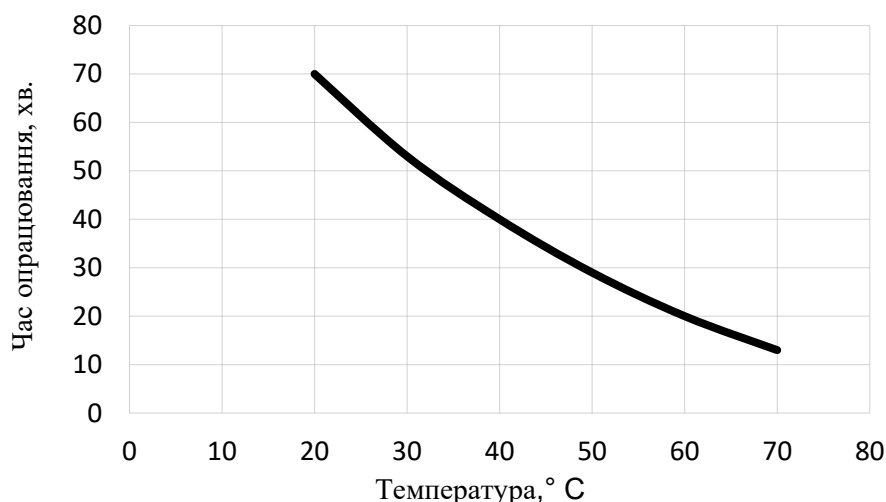


Рис. 2 – Залежність часу вироблення матеріалу «мультиметал-сталь 1018» від температури навколишнього середовища

У практиці виконання ремонтів часто трапляються випадки, коли відновлювати обладнання доводиться восени за температури навколишнього середовища від 5 до 15°C. При цьому реакція полімеризації матеріалу сповільнюється і виникає питання щодо можливості навантаження відремонтованого вузла через 24 години, які вказані в технічній характеристиці матеріалу, як час набору матеріалом повної міцності. Природно, що зі зниженням температури вводити в дію відновлене обладнання можна з урахуванням збільшеного терміну набору міцності композитом. На підставі виконаних досліджень з матеріалом «мультиметал-сталь 1018» було побудовано графіки, представлені на рис. 3, що відображають зміну часу набору міцності матеріалу під час варіювання температури, які дали змогу запропонувати таку емпіричну залежність, що дає змогу визначити оптимальні терміни пуску в роботу відремонтованого обладнання [4]:

$$\sigma_T = 0,02 \cdot \exp(0,1 \cdot t) + \frac{360}{n}, \quad (1)$$

де σ_T – межа плинності матеріалу;

t – температура витримки, °C;

n – час витримки, доба.

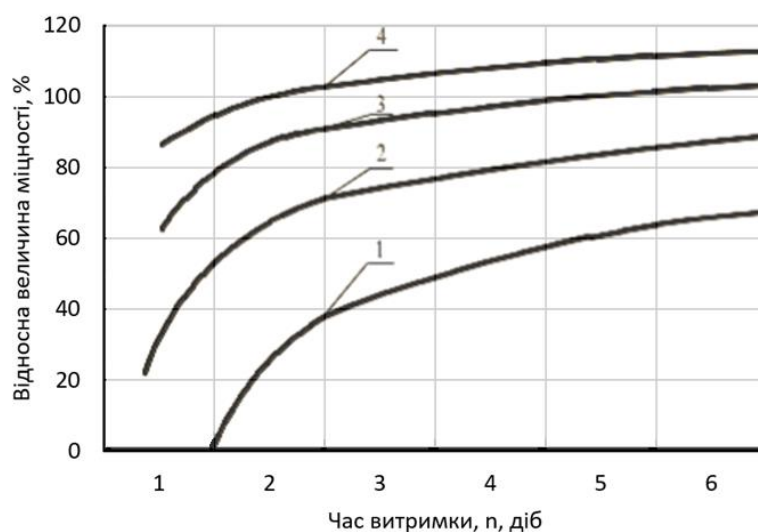


Рис. 3 – Залежність міцності мультиметалу від часу полімеризації за різних температур навколишнього середовища: 1 – температура повітря +5°C; 2 – температура повітря +10°C; 3 – температура повітря +15°C; 4 – температура повітря +20°C

Як видно з наведених графіків, за температур від 5 до 15 градусів час набору міцності йде в нескінченність, тобто застосовувати композит за таких температур недоцільно без використання спеціальних способів штучного підвищення температури шару композиту в період його полімеризації.

Адгезійна міцність у багатьох випадках визначає можливість застосування композитних матеріалів для різного виду ремонтних робіт. Під терміном адгезія слід розуміти явище, що полягає у виникненні фізичної або хімічної взаємодії між полімером і металом під час їхнього молекулярного контакту, що призводить до утворення нової гетерогенної системи адгезійного з'єднання.

Другий вживаний надалі термін – когезія – характеризує зчеплення частинок, що перебувають в одному агрегатному стані в металополімерному матеріалі, зумовлене утворенням зв'язків між складовими його молекулами, які призводять до об'єднання цих частинок в єдине ціле з найбільшою когезійною міцністю.

Величина адгезії вимірюється силою відриву на одиницю площі контакту пари матеріалів «полімер-метал». Однак за такого відриву можуть мати місце три випадки руйнування контакту зазначеної пари матеріалів. Перший із них характеризується чистим адгезійним руйнуванням, коли металополімер повністю відокремився від металу. Другий випадок руйнування називається когезійним, коли руйнування відбувається по масиву металополімеру або, що менш імовірно, по масиву металу. І, нарешті, третє, змішане руйнування відбувається як по масиву матеріалу, так і по лінії розділу матеріалів «композит-метал». Саме такий випадок найчастіше спостерігається на практиці.

Для оцінки адгезійної міцності металополімерних матеріалів у лабораторії кафедри МОЗЧМ ПДТУ були проведені дослідження, в яких використовували відомий метод рівномірного відриву із застосуванням статичних руйнівних навантажень. Випробування проводилися на розривній машині Р-20 з граничною силою розтягування 200 кН, швидкість переміщення повзунів становила 300 мм/хв, допустима похибка вимірювань $\pm 1\%$. Форма зразків, що застосовуються в експериментах, показана на рис. 4, а розмір становив 20 мм у вузькій частині та 25 мм у широкій частині. Загальна висота зразка – 45 мм. Зразки утримувалися під час випробувань спеціальними зчепленням з шарнірними пристроями, що запобігають впливу на зразки інших навантажень, окрім тих, що розтягують.

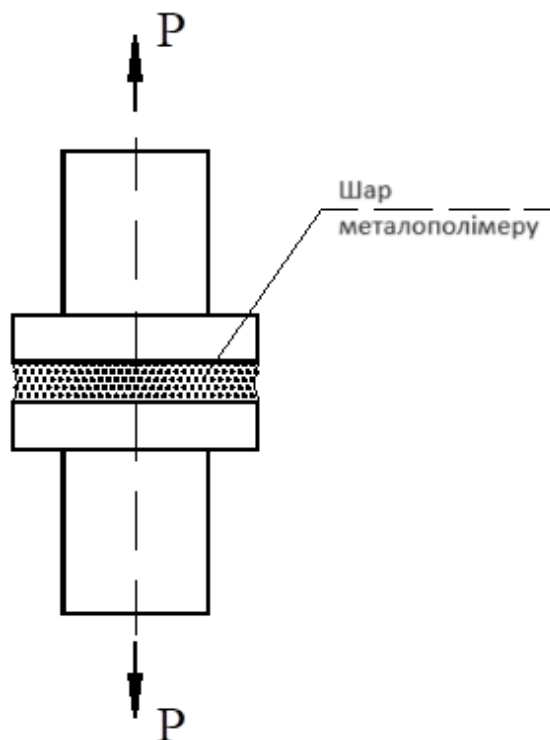


Рис. 4 – Форма зразків, що застосовуються у випробуваннях

Після зачищення контактних поверхонь зразків, їх знежирення і просушування на обидві з них наносили шляхом втирання шар металополімеру або пластикметалу, а потім зразки з'єднували, при цьому шар металополімеру становив від 0,9 до 1,1 мм.

Вплив способу зачищення та знежирення поверхні. Результати порівняння адгезійної міцності з'єднання зразків, контактна поверхня яких оброблялася в трьох варіантах: голкофрезою, наждачним кругом і торцевою фрезою, у разі використання одного й того самого матеріалу «мультиметал-сталь 1018» показали, що найкращі результати, що характеризуються середньою величиною 30 МПа, досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом. У разі обробки поверхні голкофрезою та торцевою фрезою адгезійна міцність знижується на 20-25% порівняно із зачисткою наждачним кругом.

Вплив застосовуваних очищувачів поверхні зразків дав змогу встановити, що вироблений фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany) очищувач порівняно з ацетоном дає незначне підвищення міцності адгезійного з'єднання на 5-10%, і тому в більшості випадків можна без великої шкоди для кінцевого результату ремонту виконувати знежирення поверхонь за допомогою ацетону. Водночас за відомостями фірми-виробника, фірмовий знежирювач гарантовано унеможливає виникнення центрів корозії під шаром металополімеру через певний час, чого не можна однозначно унеможливити під час використання вітчизняного ацетону. Тому під час виконання відповідальних ремонтних робіт доцільним є використання ацетону для попереднього знежирення поверхні (залежно від ступеня забрудненості, один або два рази), а лише потім виконання остаточного очищення фірмовим знежирювачем.

Вплив наявності на поверхні зразків забруднювальних речовин. Цікавим видається вплив на адгезійну міцність наявності на поверхні, наприклад, масляних плівок або води. За умови обов'язкового виконання умови зачищення поверхні незалежно від наявності олії або води і за умови обов'язкового втирання мультиметалу в поверхневий шар металу виявилось, що зниження адгезійної міцності відбувається в разі наявності оливної плівки (олія індустріальна 20) на 20-25% і в разі наявності води на 30-35%. Безумовно, в тих видах робіт, де адгезія відіграє визначальну роль, як, наприклад, у разі ремонту пошкоджень у газо- або нафтопроводах, таке зниження можна вважати значним і небажаним. Водночас у тих випадках, коли полімерний матеріал працює на стиск і адгезійна міцність не визначає довговічність конструкції, як, наприклад, під час відновлення гнізда підшипника, таке зниження є цілком допустимим, якщо не брати до уваги ймовірність появи центрів корозії на поверхні відновлюваної конструкції за наявності води в місці нанесення матеріалу.

Вплив ґрунтовки поверхні. Оскільки існує дві модифікації матеріалу мультиметал (пасто-подібний і рідиннотекучий), то дуже часто під час використання пастоподібного матеріалу не завжди якісно вдається виконати нанесення першого адгезійного шару через неможливість якісно втерти цей шар у поверхню зразка. Для поліпшення зчеплення першого шару з металом можливі два прийоми: перший – наносити перший шар із підігріванням матеріалу до 40-45°C. Такий нагрів робить пастоподібний мультиметал пластичнішим, що дає змогу виконати необхідні вимоги щодо втирання першого шару. Однак підігрівання не завжди можливе або зручне у виробничих умовах і тому застосовують як ґрунтовку під час нанесення першого адгезійного шару рідкотекучий мультиметал. Результати випробувань дали змогу встановити, що застосування мультиметалу рідиннотекучого як першого адгезійного шару підвищує адгезійну міцність з'єднання на 15-25%. Близький до цього результат дає і використання попереднього підігріву пастоподібного мультиметалу. Таким чином, у виробничих умовах для підвищення адгезійної міцності може бути використаний один із названих прийомів, залежно від наявності мультиметалу рідиннотекучого або можливості підігріву мультиметалу пастоподібного.

Питання адгезійної міцності композитів класу мультиметал були порушені також у роботі [5]. У ній, зокрема, зроблено дуже важливі для практичного застосування висновки. Наприклад, тривала перерва між операціями знежирення і нанесення матеріалу може знизити адгезійну міцність майже у 2 рази. Тому пропонується не виходити за рамки двогодинного інтервалу між знежиренням і нанесенням полімерного матеріалу. Оскільки в роботі, яку ми розглядаємо, випробування адгезійної міцності виконували шляхом докладання зсувного зусилля, цікавою видається зміна співвідношення адгезійної та когезійної міцності в міру збільшення шорсткості зразків. Було встановлено, що чим більша шорсткість поверхні, тим більший вплив на зусилля зрізу має когезійна складова. Тому під час виконання ремонтних робіт доцільним видається обрання такої

схеми відновлення, за якої полімерний матеріал працюватиме не на відрив, а на зріз, і в цьому разі збільшення шорсткості поверхні, безумовно, відіграватиме важливу роль у забезпечення міцності утвореного з'єднання «металополімер-метал».

Для того, щоб ще більше збільшити адгезію такого з'єднання, в роботах [9], [10] пропонується виконувати фосфатування металевої поверхні. Фосфатні шари на поверхні металу хімічно з ним пов'язані та складаються зі зрощених між собою металевих кристалів, які можуть утворювати розвинену шорстку поверхню. Фізико-хімічні та адгезійні властивості фосфатних шарів зумовлюють високу здатність поверхонь адсорбувати та поглинати металополімерні композиції, що наносяться на них. Як було встановлено дослідженнями після попередньої абразивної обробки та фосфатування адгезійна міцність з'єднання збільшується на 30-40% [9], [10].

Висновки

Висновки з проведених досліджень дозволяють зробити наступні рекомендації:

1. Для забезпечення надійності з'єднань композитів необхідно дотримуватись певних умов відносної вологості та температури.
2. Найкращі результати адгезійної міцності досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом та знежирення поверхні фірмовим знежирювачем.
3. Для підвищення адгезійної міцності рекомендується використовувати рідкотекучий мультиметал як перший адгезійний шар або підігрівати пастоподібний мультиметал.

This research was carried out within the framework of the joint project «Development of technology for the protection and restoration of hydropower equipment with the latest domestic composite materials» under grant number 01DK24021, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine and the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF). The project is being implemented as part of a measure to support joint Ukrainian-German research projects for implementation in 2024-2025.

Перелік використаних джерел:

1. Madrid M., Turunen J., Seitz W. General industrial adhesive applications: Qualification, specification, quality control, and risk mitigation. *Advances in Structural Adhesive Bonding*. 2-nd ed. Woodhead Publishing, 2023. Pp. 849-876. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91214-3.00023-5>.
2. Weir Minerals. Launches New Zero VOC Adhesive Range for Rubber Lining. URL: <https://www.global.weir/newsroom/news-articles/weir-minerals-launches-new-zero-voc-adhesive-range-for-rubber-lining/> (дата звернення: 15.05.2024).
3. Спосіб відновлення опорної поверхні важконавантажених машин: пат. 41759 Україна: МПК B05D3/12. №2001031777; А. О. Іщенко, О. В. Іщенко; заявл. 16.03.01; опубл. 15.02.05, Бюл. № 2. 4 с.
4. Спосіб відновлення опорної поверхні важконавантажених металургійних машин: пат. 4804 Україна: МКИ B05D3/12. №20040402991; А. О. Іщенко, В. П. Гришко, І. А. Калініченко, І. К. Єфимов; заявл. 22.04.04; опубл. 15.02.05, Бюл. № 2. 4 с.
5. Визначення можливості використання компаундів фірми «Діамант-адгезив» під час ремонту суднових технічних засобів. Звіт ПІВДЕНДІМФ. Одеса, 1997. 97 с.
6. Tao R., Alfano M., Lubineau G. Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 109. Pp. 84-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.041>.
7. Czarnecki J. V., Wetzel M., Dolderer D., Eisenschink C. The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproducible But Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics / J. Holtmannspötter et al. *The Journal of Adhesion*. 2013. Vol. 89(2). Pp. 96-110. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2012.731828>.
8. Katnam K. B., Da Silva L. F. M., Young T. M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*. 2013. Vol. 61. Pp. 26-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.03.003>.

9. Штекель Л. И. Полимерная «холодная» сварка. Современные методы ремонта судового оборудования с использованием полимерных материалов. Одесса: Студия «Негоциант», 2003. 132 с.
10. Визначення механічних характеристик ремонтних полімерних матеріалів / Іщенко А. О., Гришко В. П., Єфімов І. К., Молнар Л. *Захист металургійних машин від поломок*. 2005. Вип. 8. С. 93-98.

References:

1. M. Madrid, J. Turunen, and W. Seitz, «General industrial adhesive applications: Qualification, specification, quality control, and risk mitigation», in *Advances in Structural Adhesive Bonding*, 2-nd ed., Woodhead Publishing in Materials, 2023, pp. 849-876. doi: 10.1016/B978-0-323-91214-3.00023-5.
2. Weir Minerals. Launches New Zero VOC Adhesive Range for Rubber Lining [Online]. Available: <https://www.global.weir/newsroom/news-articles/weir-minerals-launches-new-zero-voc-adhesive-range-for-rubber-lining/>. Accessed on: May 15, 2024.
3. A.O. Ishchenko, and O.V. Ishchenko, «Sposib vidnovlennja opornoї poverhni vazhkonavantazhenih mashin» [«Method of restoring the bearing surface of heavily loaded machines»], *Patent 41759 UA Appl. 2001031777*, Feb. 15, 2005. (Ukr.)
4. A.O. Ishchenko, V.P. Grishko, I.A. Kalinichenko, and I.K. Efimov, «Sposib vidnovlennja opornoї poverhni vazhkonavantazhenih metalurgijnih mashin» [«Method of restoring the bearing surface of heavily loaded metallurgical machines»], *Patent 4804 UA Appl. 20040402991*, Feb. 15, 2005. (Ukr.)
5. «Vyznachennia mozhyvosti vykorystannia kompaundiv firmy «Diamant-adhezyv» pid chas remontu sudnovykh tekhnichnykh zasobiv» [«Determining the possibility of using compounds from the company «Diamant-adhesive» during the repair of ship technical equipment»], Southern Research Institute of the Marine Fleet, Odessa, Ukraine, Report, 1997. (Ukr.)
6. R. Tao, M. Alfano, and G. Lubineau, «Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 109, pp. 84-94, 2018. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.02.041.
7. J. Holtmannspötter, J.V. Czarnecki, M. Wetzels, D. Dolderer, and C. Eisenschink, «The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproduceable but Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics», *The Journal of Adhesion*, vol. 89, no. 2, pp. 96-110, 2013. doi: 10.1080/00218464.2012.731828.
8. K. B. Katnam, L. F. M. da Silva, and T. M. Young, «Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities», *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 61, pp. 26-42, 2013. doi: 10.1016/j.paerosci.2013.03.003.
9. L.Y. Shtekel, *Polymernaia «kholodnaia» svarka. Sovremennye metody remonta sudovoho oborudovaniya s ispolzovaniem polimernykh materiyalov* [Polymer «cold» welding. Modern methods of repair of ship equipment using polymer materials]. Odessa, Ukraine: Studio «Negoziant», 2003. (Rus.)
10. A.A. Ishchenko, V.P. Grishko, I.K. Efimov, and L. Molnar, «Vyznachennia mekhanichnykh kharakterystyk remontnykh polimernykh materialiv» [«Determination of mechanical characteristics of repair polymer materials»], *Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok – Zakhyst metalurhiynykh mashyn vid polomok*, vol. 8, pp. 93-98, 2005. (Rus.)

Стаття надійшла 28.05.2024

Стаття прийнята 18.06.2024