

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ У КОСМОСІ (Огляд)

В.О. Закорко, Н.В. Піскун

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: nadamova54@gmail.com

У статті систематизовано сучасні уявлення про застосування електронно-променевих технологій для ремонтного відновлення та пошарового формування металевих конструкцій у космічному середовищі. Проаналізовано особливості використання електронно-променевого нагріву та пошарового формування матеріалів у відкритому космосі. Наведено основні переваги електронно-променевих технологій для ремонту конструкцій космічного призначення, зокрема: високу концентрацію енергії, локальність теплового впливу та можливість роботи у вакуумному середовищі. Показано, що електронно-променеві процеси пошарового формування з подаванням присадного дроту, які належать до класу прямого енергетичного осадження (Directed Energy Deposition, DED), є одним із найперспективніших напрямів космічного виробництва завдяки високій концентрації енергії, локальності тепловкладення, природній сумісності з вакуумом і придатності до роботизованого керування. Проаналізовано вплив глибокого вакууму, мікрогравітації, термоцикування, радіаційного середовища та вібрацій на тепломасоперенесення, формування рідкометалевої ванни, структуру матеріалу та дефектоутворення. Узагальнено вимоги до матеріалів, електронно-променевого обладнання, систем подавання дроту, енергозабезпечення, технічного зору та замкненого керування процесом. Окрему увагу приділено відмінності між історично підтвердженими експериментами зі зварювання в космосі, сучасними демонстраціями металевих 3D-друку на орбіті та перспективою створення повноцінних електронно-променевих ремонтних комплексів. Визначено ключові проблеми подальших досліджень: стабілізацію рідкої ванни в мікрогравітації, відтворюваність геометрії шару, зниження пористості та тріщиноутворення, мініатюризацію обладнання, радіаційну та електромагнітну сумісність, а також інтеграцію неруйнівного контролю в автономний технологічний цикл. Бібліогр. 22, табл. 1.

Ключові слова: електронно-променеві технології, електронно-променеве зварювання, пряме енергетичне осадження, пошарове формування, відновлення конструкцій, космічне виробництво, мікрогравітація, роботизований ремонт

Вступ. Розвиток космічної техніки поступово зміщує акцент від одноразового використання апаратів і повної заміни пошкоджених елементів до довготривалої експлуатації, обслуговування та відновлення конструкцій безпосередньо в місці їхньої роботи. Такий підхід є особливо важливим для орбітальних станцій, великих розгортуваних платформ, місячної інфраструктури та міжпланетних місій, де доставка запасних частин із Землі потребує значних фінансових, часових і енергетичних ресурсів [1, 2].

Під час експлуатації космічні апарати та орбітальні конструкції зазнають дії мікрометеоритів і уламків космічного сміття, циклічних температурних навантажень, вакууму, радіаційного опромінення, механічних впливів під час стикування, монтажу або сервісних операцій. Наслідками можуть бути локальні пробої, тріщини, втрата герметичності, деградація поверхневих шарів і зниження ресурсу відповідальних елементів. За таких умов актуальними стають технології, здатні локально відновлювати геометрію, суцільність і ро-

ботоздатність металевих конструкцій без їхнього демонтажу [1, 3].

Історично важливу роль у становленні космічних технологій оброблення металів відіграла вітчизняна наукова школа. У 1969 р. на борту космічного корабля «Союз-6» було виконано перший у світі експеримент зі зварювання в космосі за допомогою установки «Вулкан», створеної в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. Серед випробуваних способів саме електронно-променеве зварювання показало найкращу придатність до роботи у вакуумі. У 1984 р. під час виходу у відкритий космос було здійснено зварювання, паяння, різання та нанесення покриттів ручним електронно-променевим інструментом [1, 4, 5].

У наш час інтерес до космічного виробництва зростає в межах ширшої концепції in-space servicing, assembly and manufacturing (ISAM), що передбачає ремонт, модернізацію, складання та виготовлення елементів космічної інфраструктури без повернення їх на Землю [2]. Окремим підтвердженням актуальності цього напрямку є демонстрації металевих адитивного виробництва на Міжнародній космічній станції: у 2024 р. Єв-

© В.О. Закорко, Н.В. Піскун, 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ропейське космічне агентство (ESA) повідомило про перше формування металевого зразка в космосі за допомогою дротового лазерного процесу [6, 7, 8]. Водночас повноцінні електронно-променеві системи ремонтного відновлення металевих конструкцій у реальній космічній експлуатації ще не впроваджені, що визначає потребу в подальших дослідженнях.

Метою статті є узагальнення сучасного стану, технологічних передумов і перспектив застосування електронно-променевих процесів для відновлення металевих конструкцій у космічних умовах, а також визначення основних науково-технічних проблем, які необхідно розв’язати для створення роботизованих ремонтно-виробничих комплексів космічного призначення.

Космічне середовище як технологічний фактор. Умови виконання технологічних процесів у космічному просторі істотно відрізняються від наземних. Для процесів зварювання, наплавлення та адитивного формування металів визначальними факторами є глибокий вакуум, мікрогравітація, обмежене тепловідведення, широкі температурні коливання, радіаційне опромінення, вібрації конструкції та обмеженість енергетичних і масогабаритних ресурсів. Кожний із цих факторів (див. табл.) може бути як перевагою, так і джерелом технологічних ризиків [1, 9].

Для електронно-променевих технологій вакуум є природним робочим середовищем. Він зменшує втрати енергії та розсіювання електронів, підвищує стабільність технологічного процесу, запобігає окисненню алюмінію та утворенню пористості в наплавленому шарі, що безпосередньо впливає на якість відновлення деталей аерокосмічного призначення. При виконанні цього процесу відсутня потреба у захисних газах.

Мікрогравітація змінює співвідношення сил, які діють у рідкометалевій ванні. У мікрогравітації

їхня роль зменшується, натомість визначальними стають поверхневий натяг, змочування, капілярний тиск, дифузійне перенесення та термокапілярні течії Марангоні. Це може змінювати геометрію проплавлення, характер кристалізації, розподіл легувальних елементів і умови формування пористості [1, 10].

Температурний стан космічних конструкцій визначається чергуванням освітлених і затінених ділянок, тепловим випромінюванням у вакуум, роботою бортових систем і локальним тепловкладенням під час ремонту. Поверхневі температури можуть змінюватися в широкому діапазоні, що призводить до термічних напружень і деформацій. Під час електронно-променевого впливу ці напруження накладаються на залишкові напруження від плавлення й кристалізації, тому параметри процесу мають обиратися з урахуванням початкової температури елемента, товщини стінки, теплопровідності матеріалу та умов тепловідведення [11].

Радіаційне середовище та заряджання поверхонь впливають не лише на матеріали конструкцій, а й на електроніку, датчики та системи керування. Для електронно-променевого обладнання додатково важливими є електромагнітна сумісність із бортовими системами, можливість виникнення вторинного випромінювання при гальмуванні електронів у металі, а також потреба у локальному екрануванні чутливих вузлів. Отже, космічне застосування електронного променя потребує системного підходу, який охоплює не лише металургію процесу, а й безпеку, енергетику, тепловий режим та інтеграцію з платформою.

Електронно-променеві дротові процеси прямого енергетичного осадження. Електронно-променеві технології ґрунтуються на перетворенні кінетичної енергії сфокусованого потоку електронів у тепло в зоні взаємодії з металом. Висока густина потужності забезпечує локальний нагрів, глибоке

Основні фактори космічного середовища та їхні технологічні наслідки

Фактор	Вплив на процес	Наслідки для технології
Глибокий вакуум	Стабільне поширення електронного променя; відсутність окиснювальної атмосфери; утруднене конвективне охолодження	Потрібні радіаційне тепловідведення, контроль випаровування легуючих елементів, надійна високовольтна ізоляція
Мікрогравітація	Зменшення природної конвекції; зростання ролі поверхневого натягу, змочування та термокапілярних течій	Необхідні замкнене автоматичне керування процесом, стабілізація подавання дроту, моделювання тепломасоперенесення
Термоцикування	Попередні температурні напруження та зміна теплового стану конструкції	Потрібні режими з мінімальним тепловкладенням, локальний підігрів або контрольоване охолодження
Радіація та заряджання	Деградація електроніки, датчиків і матеріалів; можливі електромагнітні завади	Потрібні радіаційно стійкі компоненти, екранування, електромагнітна сумісність і резервування
Вібрації та обмеження платформи	Коливання робочої зони та відносного положення інструмента	Потрібні точне позиціонування, датчики зворотного зв'язку та компенсація руху маніпулятора

проплавлення, вузьку зону термічного впливу та можливість точного керування тепловкладенням. У космічних умовах ці властивості поєднуються з природною сумісністю електронного променя з вакуумом, що відрізняє його від багатьох дугових і лазерних процесів [1, 12, 13].

Для ремонтного відновлення найдоцільнішими є дровові процеси DED, у яких присадний матеріал подається безпосередньо в рідку ванну, сформовану електронним променем на поверхні основи. Дріт не потребує газового транспортування, краще локалізується в робочій зоні, має вищу ефективність використання матеріалу та менший ризик контамінації обладнання. У мікрогравітації це є принциповою перевагою, оскільки поведінка дисперсного порошку складно прогнозується, а його неконтрольоване поширення може створювати загрозу для оптики, механізмів і систем життєзабезпечення [12, 14, 15].

Електронно-променеве пошарове формування можна розглядати як розвиток традиційних операцій зварювання та наплавлення. У режимі ремонту процес не обов'язково спрямований на виготовлення повної деталі; він може використовуватись для локального заповнення тріщин, відновлення кромки, нарощування втраченого матеріалу, герметизації пробоїв або формування підсилювальних елементів. Такий підхід є особливо цінним для тонкостінних корпусних конструкцій, баків, панелей, ферм та елементів стикувальних вузлів.

Схема процесу містить: підготовку поверхні, точне позиціонування електронно-променевого інструмента (використання автоматичної системи керування процесом наплавлення), формування рідкої ванни, синхронізоване подавання дроту, контроль геометрії валика або шару, охолодження та неруйнівний контроль відновленої ділянки. Для багатошарового формування важливо забезпечити повторюваність висоти шару, ширини доріжки, перекриття суміжних валиків і мікроструктури матеріалу. Порушення будь-якого з цих параметрів може призводити до накопичення геометричної похибки або дефектів у міжшарових зонах.

Порівняно з лазерним дрововим DED електронно-променевий процес має перевагу у вакуумі та ефективному поглинанні енергії металами, однак потребує високовольтного джерела живлення, електронної гармати, системи фокусування та відхилення променя, а також заходів щодо електромагнітної сумісності. Отже, вибір електронного променя для космічного ремонту має бути обґрунтований не лише якістю металургійного процесу, а й можливістю створення компактного, енергоефективного та надійного обладнання.

Тепломасоперенесення та стабільність рідкометалевої ванни. Стабільність рідкометалевої ванни є центральною умовою якісного електронно-променевого відновлення. У зоні плавлення одночасно відбуваються поглинання енергії променя, плавлення основного металу та присадного дроту, перемішування розплаву, випаровування окремих елементів, кристалізація та формування залишкових напружень. У космічних умовах ці процеси відбуваються за зміненого балансу сил і теплових потоків [1, 10].

У мікрогравітації зменшується роль природної конвекції, яка на Землі сприяє перемішуванню розплаву та виносу газових включень. Тому зростає значення керованих механізмів перенесення, способів переміщення тепла, рідкого металу, домішок або газових включень у рідкій ванні наплавленого матеріалу, на які можна цілеспрямовано впливати за допомогою параметрів технологічного процесу, таких як: потужність променя, швидкість переміщення або хімічний склад металу. На відміну від природної конвекції, яка виникає сама через дію сили тяжіння та різницю густини нагрітих і холодніших ділянок металу, керовані механізми – це можливість регулювати процес оператором або системою керування. Невдале поєднання цих механізмів може спричинити розтікання металу, нестабільне змочування, утворення підрізів, напливів або пор.

Термокапілярний ефект Марангоні виникає внаслідок градієнта поверхневого натягу на вільній поверхні ванни. Якщо температура або концентрація поверхнево-активних домішок змінюється вздовж поверхні, розплав переміщується у напрямі, що визначається знаком градієнта поверхневого натягу. Для електронно-променевого пошарового формування це означає, що геометрія ванни залежить не тільки від потужності променя та швидкості переміщення, а й від складу сплаву, чистоти поверхні, стану оксидних плівок та умов випаровування [3, 10].

Окремою проблемою є пористість. У вакуумі зменшується окиснення, однак наявність розчинених газів, зокрема водню в алюмінієвих сплавах, може призводити до утворення пор під час кристалізації. За мікрогравітації газові бульбашки не мають вираженого гравітаційного підйому, тому їхнє видалення з ванни ускладнюється. Це підтверджує важливість попереднього очищення поверхні, контролю складу присадного дроту, оптимізації теплового циклу та застосування режимів, які сприяють дегазації розплаву [11, 16].

Для стабілізації процесу доцільно використовувати комбіновані методи керування: модуляцію струму променя, сканування плями нагріву, регулювання швидкості подавання дроту, контроль висоти робочої відстані, локальне підігрівання або кероване охолодження. Перспективним є перехід від наперед заданих режимів до замкненого керування, у якому параметри процесу корегуються за даними пірометрії, відеоспостереження, датчиків струму, напруги, положення дроту та геометрії сформованого шару. Саме для таких процесів актуальними є алгоритми керування електронно-променевим формуванням у космічному середовищі [17].

Матеріали для електронно-променевого відновлення. Вибір матеріалу для космічного ремонтного відновлення визначається вимогами до питомої міцності, жаростійкості, корозійної стійкості, зварюваності, стабільності у вакуумі та сумісності з матеріалом основної конструкції. Найактуальнішими є алюмінієві, титанові, нікелеві, кобальтові, жароміцні сталеві та інтерметалідні сплави. Для кожної групи матеріалів характерними є власні переваги та обмеження, які необхідно враховувати під час вибору технологічної схеми.

Алюмінієві сплави широко застосовують у корпусних елементах, баках, панелях і легких силових конструкціях завдяки низькій густині, високій теплопровідності та хорошій технологічності. Особливий інтерес становлять сплави систем Al–Cu, Al–Mg та Al–Li, зокрема матеріали типу 2219, які використовують у ракетно-космічній техніці. Електронно-променеве зварювання алюмінієвих сплавів забезпечує глибоке проплавлення та високу герметичність, однак потребує ретельного контролю пористості, гарячих тріщин, випаровування легувальних елементів і теплових деформацій [5, 11, 18].

Титанові сплави вирізняються високою питомою міцністю, корозійною стійкістю, жароміцністю та хорошою сумісністю з вакуумними процесами. У вакуумі знижується ризик взаємодії розплаву з киснем і азотом, що є важливим для отримання якісних зварних з'єднань. Для електронно-променевого DED титанові сплави, зокрема Ti–6Al–4V, є одними з найбільш вивчених матеріалів і можуть застосовуватися для силових елементів, кронштейнів, ферм, корпусних деталей і елементів двигунів [12, 15, 19].

Жароміцні нікелеві й кобальтові сплави, а також жароміцні сталі є перспективними для деталей, що працюють за підвищених температур, у вузлах двигунів або теплонавантажених систе-

мах. Їхніми перевагами є опір повзучості, жаростійкість і стабільність структури. Водночас ці матеріали часто мають вузьке технологічне вікно, схильність до тріщиноутворення та високу чутливість до режимів охолодження. Для них потрібні параметри процесу, які мінімізують термічні напруження та забезпечують контроль мікроструктури [20].

Інтерметалідні сплави системи Ti–Al є перспективними для легких теплонавантажених елементів завдяки низькій густині, високій питомій міцності та стійкості проти окиснення. Проте їх широке застосування обмежується крихкістю, складністю механічного оброблення, схильністю до тріщин і підвищеними вимогами до теплового циклу. Тому для таких матеріалів актуальними є дослідження керованої кристалізації (наприклад, спрямована кристалізація дозволяє керувати структурою, а відповідно й властивостями зливку), градієнтних структур, гібридних з'єднань і поєднання електронно-променевого формування з подальшою термічною обробкою [10].

Для ремонтного застосування важливо не лише підібрати матеріал присадного дроту, а й забезпечити металургійну сумісність із основою. У багатьох випадках доцільним є використання близького за складом дроту, але для компенсації тріщиноутворення або зниження залишкових напружень можуть застосовуватися модифіковані присадки. Перспективним напрямом є формування функціонально-градієнтних шарів, у яких склад матеріалу змінюється поступово, зменшуючи ризик різкого переходу властивостей між основою та наплавленим металом.

Обладнання та системи керування. Космічний електронно-променевий ремонтний комплекс має поєднувати джерело електронного променя, високовольтне живлення, систему фокусування та відхилення променя, механізм подавання дроту, роботизований маніпулятор, засоби фіксації до конструкції, сенсорну систему, блоки терморегулювання, енергозабезпечення та керування. На відміну від наземного обладнання, така система повинна бути компактною, стійкою до пускових навантажень, радіації, вакууму, температурних циклів і тривалої автономної роботи [5, 21, 22]. Високовольтне джерело живлення повинно забезпечувати стабільність параметрів променя: прискорювальної напруги та струму, фокусування.

Для ремонту тонкостінних конструкцій важливо забезпечити мале та відтворюване тепловкладення, щоб не допустити пропалювання, надмірних деформацій або пошкодження суміжних

елементів. Для масивніших деталей, навпаки, потрібна достатня глибина проплавлення й надійний металургійний зв'язок між основою та наплавленим шаром.

Система подавання дроту має забезпечувати сталість швидкості, точне положення кінця дроту відносно ванни, мінімальні коливання та синхронізацію з переміщенням променя. У мікрогравітації механічний контакт дроту з ванною, кут подавання, змочування та імпульс подачі стають важливими факторами стабільності. Перспективною є коаксіальна або квазікоаксіальна подача, яка зменшує напрямну залежність процесу та спрощує формування складних траєкторій [15].

Роботизована система повинна виконувати позиціонування інструмента, утримання робочої відстані, компенсацію відносного руху конструкції, підготовку поверхні та контроль геометрії відновленої ділянки. Для позакорабельних робіт особливо важливими є модульність, можливість кріплення до різних типів поверхонь, дистанційне керування та безпечний режим зупинки. У перспективі такі системи мають перейти від телеопераційного керування до напівавтономних і автономних сценаріїв, коли оператор задає область ремонту, а система сама формує траєкторію, режими та контроль якості.

Сенсорна частина повинна охоплювати вимірювання температури, спостереження за ванною, контроль положення дроту, реєстрацію струму та напруги променя, оцінку висоти шару та виявлення дефектів. У наземних системах для цього використовують оптичні камери, інфрачервону пірометрію, спектральний аналіз, лазерне профілювання та акустичні датчики. У космосі вибір сенсорів ускладнюється освітленням Сонцем, вакуумом, радіацією, обмеженнями маси й необхідністю захисту оптичних елементів від бризок і випаровувань.

Значну роль відіграє програмне забезпечення. Для надійного ремонту потрібні моделі теплового поля, деформацій, формування ванни та зростання шару, які працюють у режимі підготовки технологічного процесу та можуть використовуватись як цифрові двійники під час виконання операції. Поєднання моделювання, машинного зору та адаптивного керування дозволяє компенсувати невизначеність космічних умов і підвищити відтвореність результатів.

Сучасний стан і місце електронно-променевих технологій серед інших підходів. Сучасні технології космічного виробництва розвиваються у кількох напрямках: полімерний 3D-друк, ком-

позитне формування, лазерне металеве адитивне виробництво, дугове та електронно-променеве зварювання, механічне збирання, роботизоване сервісне обслуговування. Металевий 3D-друк у космосі вже перейшов від теоретичних концепцій до орбітальних демонстрацій, однак більшість таких експериментів поки що має демонстраційний характер і не є штатною ремонтною технологією для відповідальних конструкцій [2, 6, 7].

Порівняння різних методів показує, що лазерні системи мають високу точність і добре розвинену промислову базу, але часто потребують захисної атмосфери або спеціальної камери, а також мають складні вимоги до оптики. Дугові процеси відрізняються високою продуктивністю та відносною простотою, проте в космічному вакуумі потребують спеціальної організації плазмоутворення та можуть мати ширшу зону термічного впливу. Порошкові методи забезпечують високу деталізацію, але поведінка з порошком у мікрогравітації є технологічно складним і потенційно небезпечним.

Електронно-променеві дровотві процеси займають проміжну, але дуже перспективну позицію – вони поєднують вакуумну сумісність, високу енергетичну ефективність, хорошу придатність до металевих матеріалів і можливість формування шарів із дроту. Їхні основні недоліки пов'язані з високовольтним обладнанням, потребою у точному фокусуванні, можливістю електромагнітних завад і складністю мініатюризації. Саме ці обмеження визначають науково-технічний порядок денний для переходу від експериментальних установок до космічних ремонтних комплексів.

Важливо також розрізняти виготовлення нових деталей і відновлення пошкоджених конструкцій. У першому випадку процес може виконуватися на спеціальній платформі або в герметизованому технологічному модулі. У другому випадку інструмент має працювати безпосередньо на існуючій конструкції, часто у важкодоступній зоні, з невідомим станом поверхні, обмеженим тепловідведенням і високими вимогами до безпеки. Тому ремонтне застосування є складнішим і потребує тісної інтеграції технології з робототехнікою, діагностикою та неруйнівним контролем.

Дефекти, контроль якості та надійність відновлених ділянок. Якість відновленої ділянки визначається не лише зовнішньою геометрією, а й внутрішньою структурою металу, характером міжшарового з'єднання, рівнем пористості, наявністю тріщин, включень, несправів і залишкових напружень. Для космічних конструкцій ці показники мають критичне значення, оскільки ремонт

виконується на відповідальних елементах, доступ до яких після операції може бути обмеженим.

Найхарактернішими дефектами електронно-променевого наплавлення є: пори, гарячі тріщини, непровари, надмірне проплавлення, підрізи, порушення геометрії валика, міжшарове несплавлення, локальне випаровування легувальних елементів і залишкові деформації. Причинами можуть бути: нестабільність подавання дроту, коливання потужності променя, забруднення поверхні, неправильна робоча відстань, надто високі температурні градієнти або неузгодженість між швидкістю переміщення та продуктивністю осадження.

Контроль якості в космосі має бути максимальним інтегрованим у сам процес. Перед початком ремонту потрібно проводити діагностику пошкодження: визначення розміру тріщини або пробою, товщини стінки, стану поверхні та можливості локального доступу. Під час формування шару система має контролювати температуру, розмір ванни, стабільність дроту та форму валика. Після ремонту необхідним є неруйнівний контроль, який може містити візуальне та оптичне профілювання, термографію, ультразвукові або інші методи, адаптовані до конкретної конструкції.

Для відповідальних елементів доцільно передбачати не одну, а кілька рівнів верифікації: технологічну перевірку стабільності процесу, геометричну перевірку відновленої області, локальну оцінку дефектів і розрахункове підтвердження роботоздатності. У перспективі ці операції мають об'єднуватись в єдиний цифровий контур: діагностика пошкодження, автоматичне планування траєкторії, виконання наплавлення, онлайн-контроль, корегування параметрів і документування результату ремонту.

Основні проблеми та напрями подальших досліджень. Попри значний потенціал електронно-променевих технологій, їхнє практичне впровадження в космічний ремонт стримується комплексом науково-технічних проблем. Їх можна умовно поділити на: матеріалознавчі, технологічні, апаратні, енергетичні, робототехнічні та експлуатаційні.

Матеріалознавчі задачі полягають у вивченні структури та властивостей наплавленого металу в умовах мікрогравітації, визначенні механізмів поро- і тріщиноутворення, оптимізації складу присадного дроту та режимів термічної обробки.

Технологічні задачі охоплюють стабілізацію рідкометалевої ванни, відтворюваність висоти шару, керування змочуванням, зменшення випаро-

вування легуючих елементів, контроль тепловкладення та мінімізацію залишкових напружень.

Апаратні задачі пов'язані з мініатюризацією електронної гармати, підвищенням ресурсу катода, радіаційною стійкістю електроніки, електромагнітною сумісністю, захистом оптики та датчиків і створенням ефективного тепловідведення у вакуумі.

Енергетичні задачі передбачають оптимізацію режимів роботи, зниження пікової потужності, використання буферних накопичувачів енергії та узгодження процесу з бортовою енергосистемою космічного апарата або станції.

Робототехнічні задачі містять фіксацію комплексу на конструкції, точне позиціонування інструмента, компенсацію мікровібрацій, автономне планування траєкторій і безпечну взаємодію з екіпажем або іншими роботизованими системами.

Експлуатаційні задачі стосуються стандартизації ремонтних процедур, кваліфікації відновлених ділянок, створення критеріїв приймання, забезпечення резервування та можливості повторного ремонту.

Найближчим практичним кроком має бути поєднання наземних вакуумних випробувань, експериментів у режимах короткочасної мікрогравітації, числового моделювання та випробувань роботизованих прототипів. Особливу цінність мають експерименти, у яких одночасно реєструються параметри променя, дроту, температурного поля, геометрії ванни та дефектів. Саме такі дані потрібні для створення достовірних моделей і алгоритмів замкненого керування.

Висновки

1. Електронно-променеві дровотві процеси прямого енергетичного осадження є одним із найперспективніших напрямів ремонтного відновлення металевих конструкцій у космічних умовах. Їхні переваги визначаються високою концентрацією енергії, локальністю тепловкладення, глибоким проплавленням, ефективним використанням дроту та природною сумісністю з вакуумом.

2. Космічне середовище одночасно створює переваги та обмеження для електронно-променевого процесу. Вакуум сприяє роботі електронного променя та зменшує окиснення. Мікрогравітація змінює гідродинаміку рідкометалевої ванни, послаблює природну конвекцію та підсилює роль поверхневих і капілярних явищ.

3. Найактуальнішими матеріалами для електронно-променевого відновлення є алюмінієві, титанові, жароміцні та інтерметалідні сплави. Для кожної групи матеріалів необхідне окреме об-

грунтування режимів наплавлення, оскільки їхня схильність до пористості, тріщиноутворення, випаровування легувальних елементів і залишкових напружень істотно відрізняється.

4. Практична реалізація космічного електронно-променевого ремонту потребує створення спеціалізованого обладнання: компактних електронних гармат, надійних високовольтних джерел живлення, систем точного подавання дроту, роботизованих маніпуляторів, датчиків контролю процесу, засобів терморегулювання та енергозабезпечення. Ключовою вимогою є робота в замкненому контурі керування за даними технічного зору, пірометрії, профілювання та контролю параметрів променя.

5. Сучасні орбітальні демонстрації металевого адитивного виробництва підтверджують актуальність напрямку, але не замінюють досліджень саме електронно-променевого ремонтного відновлення відповідальних конструкцій. Подальший розвиток має бути спрямований на стабілізацію ванни в мікрогравітації, зниження дефектності, кваліфікацію відновлених ділянок, мініатюризацію обладнання та інтеграцію процесу з автономними роботизованими платформами.

6. Створення електронно-променевих ремонтно-виробничих комплексів може стати важливою складовою майбутньої космічної інфраструктури. Такі системи здатні збільшити ресурс космічних апаратів, зменшити залежність від доставки запасних частин із Землі, підвищити автономність орбітальних, місячних і міжпланетних місій та сформувати технологічну основу для довготривалого освоєння космічного простору.

Список літератури/References

- Naden, N., Prater, T.J. (2020) *A review of welding in space related technologies*. NASA/TM-2020-220557. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200002259/downloads/20200002259.pdf>
- NASA. *In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing (ISAM)*. <https://www.nasa.gov/isam/>
- Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Закорко В.О. та ін. (2026) Технологічні аспекти відновлення космічних апаратів методом адитивного електронно-променевого наплавлення. *Космічна наука і технологія*, 32(2), 81–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2026.02.081>
- Терновий, Ye.H., Piskun, N.V., Zakorko, V.O. et al. (2026) Technological aspects of spacecraft restoration by additive electron-beam surfacing. *Space Sci. and Technol.*, 32(2), 81–98 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2026.02.081>
- Лобанов Л.М., Ланкін Ю.М., Терновий Є.Г. та ін. (2024) Елементи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних робіт на поверхні Місяця. *Космічна наука і технологія*, 30(2), 40–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>
- Lobanov, L.M., Lankin, Yu.M., Ternovyi, Ye.H. et al. (2024) Elements of electron-beam welding technology for aluminium alloys for assembly and repair-restoration works on the lunar surface. *Space Sci. and Technol.*, 30(2), 40–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>
- Патон Б.С., Лобанов Л.М., Асніс Ю.А. та ін. (2017) Обладнання та технології для електронно-променевого зварювання в космосі. *Космічна наука і технологія*, 23(4), 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>
- Paton, B.Ye., Lobanov, L.M., Asnis, Yu.A. et al. (2017) Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Sci. and Technol.*, 23(4), 27–32 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.027>
- ESA. *First metal part 3D printed in space*. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/09/First_metal_part_3D_printed_in_space
- ESA. *A close-up look at the first metal part made in space*. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/A_close-up_look_br_at_the_first_metal_br_part_made_in_space
- Allard, C. (2024) First metal part 3D printed in space. *Nat. Rev. Mater.*, 9, 766. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00745-3>
- (2003) *Space technologies, materials and structures*. Ed. by B. Paton. London, CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780367801045>
- Kartavykha, A.V., Asnis, E.A., Statkevich, I.I. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed β -stabilized γ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. *Mater. Letters*, 188, 88–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.103>
- Лобанов Л.М., Міленін О.С., Терновий Є.Г. та ін. (2023) Закономірності формування пористості при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої сили тяжіння. *Космічна наука і технологія*, 29(3), 57–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>
- Lobanov, L.M., Milenin, O.S., Ternovyi, Ye.H. et al. (2023) Regularities of porosity formation during electron-beam welding of aluminium alloys under reduced gravity. *Space Sci. and Technol.*, 29(3), 57–66 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>
- Taminger, K.M., Hafley, R.A. (2006) *Electron beam freeform fabrication (EBF3) for cost effective near-net shape manufacturing*. NASA/TM-2006-214284. https://www.researchgate.net/publication/277298888_NASATM-2006-214284_Electron_Beam_Freeform_Fabrication_EBF_3_for_Cost_Effective_Near-Net_Shape_Manufacturin
- Taminger, K.M.B., Hafley, R.A. (2003) Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process. In: *Proc. of the 3rd Annual Automotive Composites Conf.* <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040042496/downloads/20040042496.pdf>
- Hafley, R.A., Taminger, K.M.B., Bird, R.K. (2007) Electron beam freeform fabrication in the Space environment. In: *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 8–11 January, Reno, Nevada*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-1154>
- Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I. (2022) A coaxial wire-feed additive manufacturing of metal components using a profile electron beam in space application. *J. of Mater. Eng. and Perform.*, 31, 6069–6082. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06994-z>
- Терновий Е.Г., Бондарев А.А., Лапчинский В.Ф., Лозовская А.В. (2000) Влияние гравитационных сил, растворенного водорода и исходной температуры на свойства и плотность соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных сплавов. В: *Космос: технологии, материаловедение, конструкции. Сб. науч. тр.* Б.Е. Патон (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 528.
- Ternovoy, E.G., Bondarev, A.A., Lapchinsky, V.F., Lozovskaya, A.V. (2000) Influence of gravitational forces, dissolved hydrogen and initial temperature on the properties and density of joints during electron-beam welding of light structural alloys. In: *Space: Technologies, Materials Science, Structures*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, PWI, 528 [in Russian].
- Seifzer, W.J., Taminger, K.M. (2007) Control of space-based electron beam free form fabrication. In: *18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070030308/downloads/20070030308.pdf>
- Бондарев А.А., Лапчинский В.Ф., Лозовская А.В., Терновий Е.Г. (2000) Исследование структуры и распределения элементов в сварных соединениях, выполненных электронным лучом на сплавах 1201 и АМг6 в услови-

- ях невесомости. В: *Космос: технологии, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр.* Б.Е. Патона (ред.). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 247–252.
- Bondarev, A.A., Lapchinsky, V.F., Lozovskaya, A.V., Ternovoy, E.G. (2000) Study of the structure and distribution of elements in welded joints made by electron beam on alloys 1201 and AMg6 under weightlessness. In: *Space: Technologies, Materials Science, Structures*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, PWI, 247–252 [in Russian].
18. Mitzner, S., Liu, S., Domack, M.S., Hafley, R.A. (2012) Grain refinement of freeform fabricated Ti-6Al-4V alloy using beam/arc modulation. In: *23rd Annual Intern. Solid Freeform Fabrication Symposium*. DOI: <https://doi.org/10.26153/TSW/15372>
19. Hales, S.J., Domack, C.S., Taminger, K.M. (2020) *Electron beam freeform fabrication of dissimilar materials: Cracking in Inconel 625 on GRCo-84*. NASA/TP-2020-5005040. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205005040/downloads/NASA-TP-2020-5005040.pdf>
20. Taminger, K.M., Watson, J.K., Hafley, R.A., Petersen, D.D. (2007) *Solid Freeform Fabrication Apparatus and Methods*. U.S. Patent 7,168,935.
21. NASA. *Welding in Space. Technology Spec. Sheet*. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/09/7-in-space-welding-spec-sheet-508.pdf>
22. NASA. *Welding in Space. Technology Spec. Sheet*. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/09/7-in-space-welding-spec-sheet-508.pdf>

PROSPECTS FOR USING ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES TO RESTORE METAL STRUCTURES IN SPACE (Review)

V.O. Zakorko, N.V. Piskun

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., Kyiv, 03150, Ukraine. E-mail: nadamova54@gmail.com

The article systematizes the current concepts concerning the application of electron beam technologies for repair restoration and layer-by-layer formation of metal structures in the space environment. The specific features of electron beam heating and additive formation of materials in open space are considered. The main advantages of electron beam technologies for the repair of space structures are summarized, including high energy concentration, localized thermal action and operation in vacuum. It is shown that wire-aisted electron beam layer-by-layer formation processes, which belong to directed energy deposition (DED), are among the most promising approaches to space manufacturing owing to their energy concentration, localized heat input, natural compatibility with vacuum and suitability for robotic control. The effects of high vacuum, microgravity, thermal cycling, radiation environment and vibrations on heat and mass transfer, molten pool formation, material structure and defect formation are analyzed. Requirements for materials, electron beam equipment, wire-feed systems, power supply, machine vision and closed-loop process control are summarized. Particular attention is paid to the distinction between historically verified welding experiments in space, current orbital demonstrations of metal additive manufacturing and the prospects for development of full-scale electron beam repair systems. Key research problems are identified: stabilization of the molten pool in microgravity, repeatability of layer geometry, reduction of porosity and cracking, miniaturization of equipment, radiation and electromagnetic compatibility, and integration of nondestructive testing into an autonomous technological cycle. 22 Ref., 1 Tabl.

Keywords: *electron beam technologies, electron beam welding, directed energy deposition, layer-by-layer formation, structure restoration, space manufacturing, microgravity, robotic repair*

ORCID

V.O. Zakorko – <https://orcid.org/0009-0003-6450-8647>, H.B. Piskun – <https://orcid.org/0000-0003-1459-2310>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

H.B. Піскун

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: nadamova54@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

V.O. Zakorko, H.B. Piskun (2026) Перспективи використання електронно-променевих технологій для відновлення металевих конструкцій у космосі (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 05, 64–71. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.05.08>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 08.06.2026

Отримано у переглянутому вигляді 18.09.2026

Підписано до друку 30.09.2026

Оприлюднено 20.10.2026

