

# ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ЗАПОБІГАННЯ ДЕФЕКТАМ ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ТОНКОСТІННУ ОСНОВУ

**М.В. Соколовський, В.В. Савицький, О.В. Сіора, Ю.В. Юрченко, Д.А. Гардер, А.В. Бернацький**

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [m\\_sokolovskiy@paton.kiev.ua](mailto:m_sokolovskiy@paton.kiev.ua)  
 Об'єктом дослідження є закономірності взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом під час наплавлення шарів порошкового матеріалу на тонкостінну основу із жароміцної корозійностійкої сталі. Невирішеною є проблема виготовлення бездефектних тонкостінних корпусних деталей, у конструкції яких наявні функціональні елементи, що за своїми характеристиками значно відрізняються від самих деталей та призначені для виконання різного комплексу певних відповідальних завдань. Зазвичай ці елементи створюються за допомогою аргонодугового наплавлення, мікроплазмового наплавлення та інших процесів, але вироби, одержані з використанням таких технологій, мають значну частку браку через високий шанс появи таких дефектів, як проплав і прогин, під впливом термічних деформацій. У даній роботі запропоновано використання лазерного випромінювання для наплавлення функціональних елементів та вивчено методики мінімізації шансів утворення таких дефектів, як прогин і проплав тонкостінної основи. Проведено експериментальні дослідження, за результатами яких відпрацьовано методики наплавлення функціональних елементів на тонкостінну основу. Результати даної роботи доводять перспективність застосування технології лазерного випромінювання для наплавлення функціональних елементів на тонкостінну основу. У результаті роботи було розроблено методи мінімізації впливу лазерного випромінювання на утворення дефекту прогину на 60...80 % та повного запобігання дефекту проплаву. Вони ґрунтуються на максимальному збільшенні площі та швидкості розподілу теплової енергії, завдяки чому стало можливим утворення бездефектних наплавлених шарів. Результати даної роботи плануються використовувати при відпрацюванні технологій лазерного наплавлення функціональних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій виробів ракетно-космічної, авіаційної, хімічної, приладобудівної та інших галузей промисловості. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* лазерне наплавлення, запобігання дефектам, прогин, проплав, технологічні прийоми

**Вступ.** У багатьох галузях промисловості використовуються тонкостінні корпусні деталі, у складі яких наявні функціональні елементи конструкції, що за своїми характеристиками значно відрізняються від самих деталей та призначені для виконання різного комплексу певних відповідальних завдань. Наприклад, такі функціональні елементи використовуються у різних деталях ракетобудівної, хімічної, харчової, медичної, оборонної та інших галузей промисловості.

Зазвичай складні конструктивні елементи тонкостінних корпусних деталей створюються за допомогою аргонодугових і мікроплазмових процесів, однак вироби, одержані з використанням таких технологій, мають значну частку браку через високий шанс появи таких дефектів, як проплав та прогин, під впливом термічних деформацій. Через це існує необхідність у подальшому вивченні процесів, котрі могли б запобігти утворенню таких дефектів. Одним із процесів, що може задовольнити цим вимогам, є лазерне наплавлення. Для визначення необхідних умов для використання технології лазерного наплавлення необхідно

провести дослідження процесів, що відбуваються в зоні обробки, а саме, у тонкостінній основі та наплавленому порошку, під час лазерного наплавлення на тонкостінну основу з високолегованої корозійностійкої сталі, для розробки такого технологічного процесу, при якому шанс утворення таких дефектів, як прогин та проплав тонкостінної основи, було б мінімізовано. Технологічними завданнями до таких конструкцій передбачено низку типових конструктивних елементів, які необхідно виготовити за допомогою лазерного наплавлення, а саме – бандажних поясів, бобишок і площадок для конструктивних елементів. Одним із головних завдань, котре висувається при розробці технологічних процесів лазерного наплавлення об'ємних конструктивних елементів на тонкостінну основу, є запобігання дефектам, а саме – проплавам і прогинам, котрі негативно впливають на працездатність заданих деталей. Виконання завдання щодо наплавлення цих конструктивних елементів наперед побудовану тонкостінну основу потребує вдосконалення наявних технологій на основі матеріалознавчих підходів, а також розробки нових технічних рішень, наприклад використання концентрованих потоків енергії – лазерного випромінювання, та є одним із актуальних завдань прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів.

© М.В. Соколовський, В.В. Савицький, О.В. Сіора, Ю.В. Юрченко, Д.А. Гардер, А.В. Бернацький  
 © Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026  
 Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

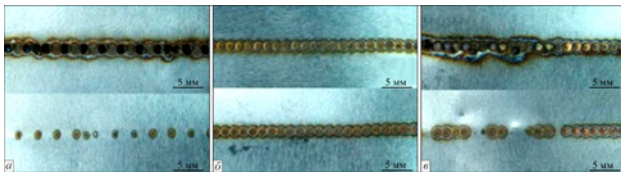


Рис. 1. Типовий дефект у вигляді проплаву тонкостінної основи під час лазерної обробки [1]

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Одним із дефектів, що часто зустрічаються під час роботи з тонкостінними основами, є наскрізне проплавлення тонкостінної основи (проплав) (рис. 1) [1], причини та наслідки якого пов'язані з правильним вибором характеристик робочих режимів і забезпеченням охолодження тонкостінного матеріалу [2–5]. Ці роботи вивчають різні аспекти процесів наплавлення на тонкостінну основу та вказують на ризик утворення дефектів, однак не пропонують жодних методів боротьби з ними.

При лазерному наплавленні елементів на тонкостінні деталі важливо запобігти утворенню дефекту прогину, який часто з'являється завдяки поєднанню багатьох факторів (рис. 2). Найчастіше утворення вигину пов'язане з нерівномірним розподілом напружень, котрі утворюються при наплавленні багатошарових елементів і не можуть розподілитись достатньою мірою через малу товщину основного матеріалу [6–7]. Це описується в [8], де вказано на утворення значних внутрішніх напружень у перших нанесених шарах порошкового матеріалу, величина яких вважається достатньою для деформації даної поверхні під час експлуатації (рис. 2). Проте у цій роботі розглядалось лише одностороннє наплавлення, без порівняльної оцінки наплавлення з використанням більш комплексної траєкторії наплавлення.

Варто зазначити, що дані, наведені в попередніх роботах, проводились із використанням імпульсно-періодичних джерел лазерного випромінювання. Це впливає на процеси взаємодії лазерного випромінювання з тонкостінною основою під час лазерного наплавлення, особливо під час

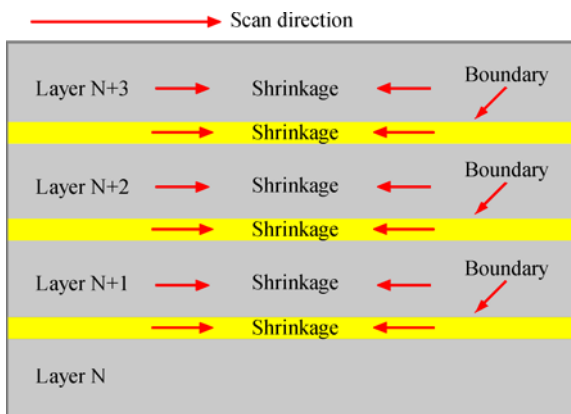


Рис. 2. Абстрактна схема навантажень, що спричиняють деформації при наплавленні конструктивних елементів [8]

використання лазерного технологічного комплексу з безперервним режимом генерації.

Для боротьби з дефектами прогину важливе значення для нас відіграє можливість контролю траєкторії робочих циклів технологічної операції, оскільки вони напряму впливають на отримвану мікроструктуру об'ємного елемента, а також на дотримання умов заданих наперед експлуатаційних характеристик. Також для дотримання заданих наперед розмірів побудованого на деталі об'ємного елемента та для контролю якості необхідно проводити контроль витрат металевого порошку та можливого розфокусування комбінованого потоку лазерної енергії та наплавлювального порошку. Оптимізація режимів лазерної обробки деталі в даному випадку необхідна для забезпечення утворення рівномірної структури в результаті селективного лазерного наплавлення.

Зменшення внутрішніх напружень може бути досягнуто багатьма методами: контролю енергетичних характеристик лазерного випромінювання, про що писали в [9, 10], контролю швидкості подачі порошку [11], а також комплексної термічної постобробки деталі, що була описана в [12]. У даних роботах розглядалися поодинокі випадки аналізу процесу селективного лазерного наплавлення для виконання певних завдань. У цих статтях було помічено спроби створити загальну модель вивчення впливу змінних енергетичної складової процесів адитивного лазерного наплавлення. Проте при порівнянні результатів математичного моделювання структури верхніх шарів оброблюваної поверхні, наданих у даних роботах, було виявлено невідповідність розрахункових схем з експериментальними результатами. Це частково пояснюється різницею в матеріалах та обладнанні, але потребує додаткового підтвердження.

Під час розширення відомих знань щодо процесів наплавлення при роботі з тонкостінною основою було зазначено, що велика увага приділяється впливу змінних режимів обробки на перебіг процесів наплавлення, а також на саму сутність фізичних процесів, що відбуваються у заданих умовах. Так, у [13] описано наплавлення порошкового матеріалу на тонкостінну основу у вигляді штампованої деталі завтовшки 1,5 мм та дефекти прогину, що з'являються при неправильному проведенні даних робіт (рис. 3). Висновком роботи є доведення необхідності правильного закріплення та охолодження деталі, оскільки при наявності повітря позаду тонкостінної основи вона зазнає деформацій під впливом лазерного випромінювання. Однак дані з цієї статті були розраховані на лазерну обробку поверхонь матеріалів, а не для наплавлен-

ня функціональних елементів, і тому не можуть використовуватися для розрахунку процесів наплавлення шарів, загальна висота яких перевищує 0,5 мм. Все це дозволяє стверджувати, що для вирішення поставленого завдання доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню технологічних прийомів для запобігання утворенню дефектів під час лазерного наплавлення об'ємних функціональних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

**Мета роботи** – визначення комплексу технологічних прийомів для запобігання утворенню дефектів під час лазерного наплавлення об'ємних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

Це надасть можливість виготовлення об'ємних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій шляхом лазерного наплавлення, спростить технологічні процеси виготовлення таких деталей та зменшить їхню собівартість.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- визначити методи мінімізації дефектів прогину та пропалу;
- дослідити ефективність технологічних прийомів запобігання утворенню дефектів.

**Матеріали та методи досліджень.** Проведено серію експериментальних напавлень елементів різної форми та розмірів із використанням запропонованих нижче варіантів технологічних режимів. Усі роботи з лазерного наплавлення було виконано на лабораторному стенді, який був змонтований на базі трикоординатного маніпулятора, виготовленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Для експериментів використовувався Nd:YAG-лазер DY044 виробництва фірми «ROFIN-SINAR» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1,06$  мкм. Для експериментальних напавлень використовувався порошок фракції 53...150 мкм марки 16316 виробництва компанії «Castolin Eutectic», який за складом збігається з аустенітною високолегованою

корозійностійкою сталлю AISI 316L. За тонкостінну основу прийнято листи холодного прокату високолегованої корозійностійкої сталі AISI 316Ti завтовшки 3 мм та лист холодного прокату високолегованої корозійностійкої сталі AISI 321 завтовшки 1,2 мм. Під час виконання експериментів було підібрано ряд режимів з такими характеристиками: потужність лазерного випромінювання  $P = 1,5 \dots 2,5$  кВт, швидкість переміщення лазерного променя  $V = 2$  м/хв, швидкість подачі металевого порошку  $Q = 25$  г/хв, дистанція від фокусної площини лазера  $\Delta F = +11$  мм. Для оцінки можливості зниження прогину та деформацій тонкостінної основи були проведені експериментальні дослідження розподілу напружень, що виникають після наплавлення конструкційного елемента. Вимірювання виконано за допомогою тривимірного методу цифрової кореляції зображень (Stereo-DIC), який полягає у стереоскопічній реєстрації зображень поверхні зразка з подальшим кореляційним аналізом для отримання тривимірних полів переміщень і деформацій. [14].

**Результати дослідження зі зменшення дефектів під час лазерного наплавлення.** *Визначення шляхів мінімізації прогину під час створення дослідних виробів.* Під час дослідження було розроблено комплекс технологічних прийомів керування параметрами технологічного процесу лазерного наплавлення, використання яких дозволило підвищити якість і рівень експлуатаційних та функціональних властивостей одержаних об'ємних елементів і розробити технологічні рекомендації із виготовлення виробів для різних галузей промисловості з урахуванням відповідних експлуатаційних вимог. Так, для запобігання перегріву та проплаву тонкостінної основи пропонується ряд технологічних прийомів, пов'язаних зі стратегією сканування:

1. Використання принципу сканування з порядком нанесених доріжок, який передбачає збільшені інтервали між доріжками та зміщенням наповнення між шарами. Утворення інтервалу між двома доріжками, що наплавляються, рекомендується для запобігання перегріву, а зміщення траєкторій між шарами допомагає заповнити невеликі прогалини та забезпечити рівномірне нанесення матеріалу. Різницю між простим наплавленням і запропонованим технологічним прийомом продемонстровано на рис. 4.

2. Чергування відцентрових і доцентрових стратегій сканування при напавленні деталей циліндричної форми або чергування напрямків (з кроком у 45, 90 або 180 °) нанесення порошку під час наплавлення вузлів паралелепіпедної форми.

3. Використання покрокової схеми наплавлення деталей з чергуванням доріжок при напавленні лінійних

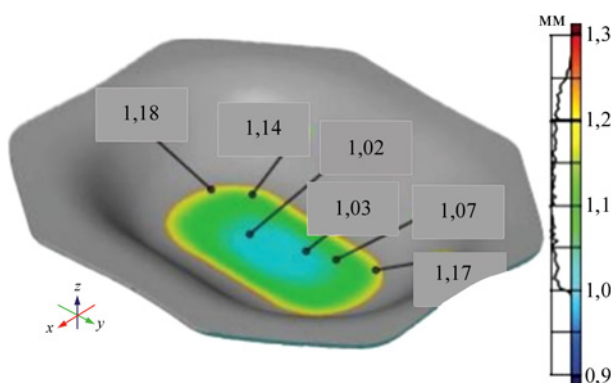


Рис. 3. Тривимірна схема деформації тонкостінної основи після лазерного плавлення елемента [13]. Точність  $\pm 0,15$  мм

елементів на тонкостінну основу. Треба використовувати стратегію наплавлення, наведену на рис. 5.

При лазерному напавленні циліндричних елементів на тонкостінну основу треба використовувати стратегію наплавлення, наведену на рис. 6. Дана стратегія зміщує початкові точки між кожним шаром на  $90^\circ$ , забезпечуючи рівномірніший розподіл температур. При цьому, дана стратегія може використовуватись для наплавлення як цільних циліндричних напавлень, так і пустотілих елементів шляхом варіації траєкторій наплавлення.

Для запобігання переплаву та зменшенню нерівномірного розподілу термічної енергії на тонкостінній основі пропонується зменшувати потужність лазерного випромінювання при зміщенні траєкторії наплавлення ближче до центру напавленого елемента до величини 50...65 % від потужності лазерного випромінювання, яка використовується при напавленні крайніх доріжок матеріалу.

Для попередньої обробки деталі пропонується стандартні технологічні прийоми, а саме, проведення попереднього знежирення та очищення деталі. Поверхні деталей, на які буде виконувати-

ся наплавлення, слід зачищати до повного видалення іржі, окалини, олії, вологи та інших забруднень. Механічно оброблені заготовки під лазерне наплавлення слід зберігати в герметично закритій тарі в сухому місці (рекомендована відносна вологість – не вища за 60 %). Механічне зачищення поверхні заготовок під наплавлення треба проводити безпосередньо перед лазерним напавленням.

Під час встановлення та закріплення деталі для наплавлення пропонуються такі технологічні прийоми:

1. Закріплення деталі в максимальній кількості точок запобігає нерівномірному прогину тонкостінної основи.

2. Використання теплопровідних підкладок покращить відведення тепла від тонкостінної основи, зменшить прояв явища кольорів мінливості та обмежить можливий прогин. Також для мінімізації впливу лазерного випромінювання на тонкостінну основу рекомендується використання термопасти (наприклад, марок КПТ-5 та КПТ-8(М) або їхніх аналогів), нанесеної на тильну сторону тонкостінної деталі.



Рис. 4. Схематичне зображення розподілу порошку при використанні інтервалів при напавленні доріжок

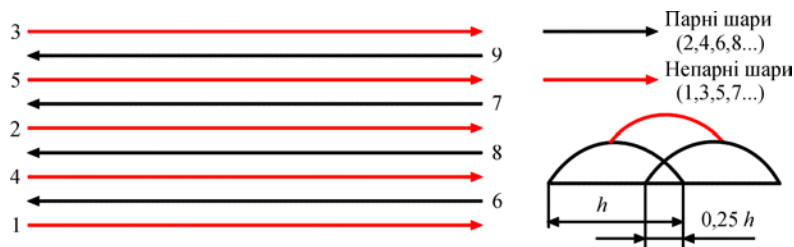


Рис. 5. Схема наплавлення лінійних елементів

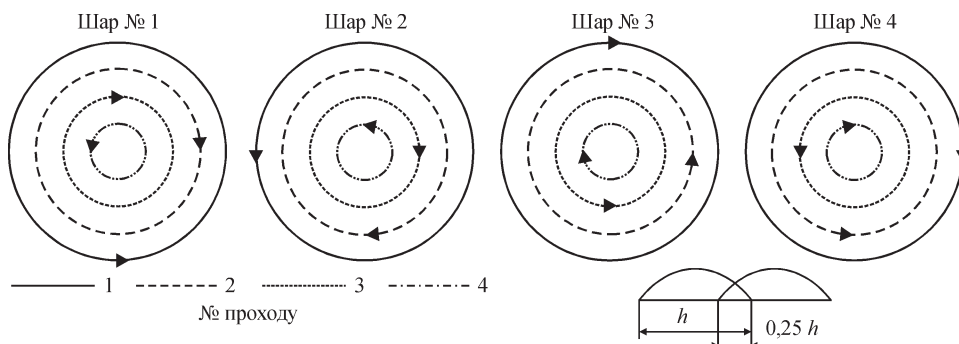


Рис. 6. Схема наплавлення циліндричних елементів

Для боротьби з впливом атмосферного повітря на матеріал, що наплавляється, під час його охолодження пропонується використання таких технологічних прийомів, як:

1. Подача газу за соплом у зоні рекристалізації та охолодження наплавленого матеріалу завдовжки 50...80 мм.
2. Подача газу протягом 10...15 с після закінчення обробки.

Ці технологічні прийоми дозволяють покращити якість нанесеного шару шляхом захисту наплавленого шару матеріалу від взаємодії з оточуючим середовищем.

При наплавленні перших 1...1,5 мм висоти функціонального елемента для забезпечення достатньої величини проплавлення основного металу з метою отримання якісного з'єднання наплавленого елемента до тонкостінної основи при мінімізації шансів проплаву тонкостінної основи було обрано робочий режим з такими характеристиками: погонна енергія 60 Дж/мм, густина потужності 40 кВт/см<sup>2</sup> (еквівалентна потужність лазерного випромінювання  $P = 2$  кВт). Використання даного режиму забезпечує проплавлення основного матеріалу тонкостінної основи до 0,4 мм, що робить його оптимальним при роботі з тонкостінними основами завтовшки до 1,2 мм. Це забезпечує достатнє проникнення наплавленого матеріалу в тонкостінну основу для якісного закріплення та запобігає появі проплавів.

При подальшому наплавленні для максимізації об'єму нанесеного за прохід матеріалу разом із мінімізацією кількості переплавленого попередньо нанесеного матеріалу було обрано робочий режим з наступними характеристиками: погонна енергія 45 Дж/мм, густина потужності 30 кВт/см<sup>2</sup> (еквівалентна потужність лазерного випромінювання  $P = 1,5$  кВт). Використання даного режиму забезпечує вдвічі меншу глибину проплавлення відносно попереднього режиму та створює стабільнішу дрібнозернисту структуру, що зменшує шанси утворення дефектів у вигляді пор і пустот.

**Визначення ефективності розроблених технологічних прийомів.** Відомо, що при наплавленні елементів на тонкостінні деталі між наплавленим шаром і основою виникає високий температурний градієнт, а також різниця між коефіцієнтами теплового розширення основи та порошку сплаву. Це викликає різницю в тепловому розширенні та усадці при охолодженні кожного наплавленого треку, що призводить до появи залишкових напружень і деформацій у виготовлених зразках (рис. 7) [15].

При визначенні ступеня небезпеки прогину матеріалу тонкостінної основи, а також величини прогину та інших деформацій тонкостінної осно-

ви було проведено експериментальне вимірювання вигинів деталей. Схематичні профілі наплавлених зразків наведено на рис. 8.

Результати візуальних і мікрометричних досліджень показали як загальний, так і місцевий прогин у зоні наплавлення. Як відомо з попередніх досліджень [15, 16], загальні деформації тонкостінної основи виникають у випадках, коли теплове розширення зони наплавлення тонкостінної деталі є більшим, ніж площа поверхні, на яку наплавлення не проводиться. У той же час, вигин тонкостінної основи в околі зони обробки виникає через стиснення наплавленого матеріалу в активній зоні наплавлення під час охолодження. Це, в свою чергу, призводить до створення стискаючих напружень сили усадки, що обумовлює вигин деталей. Результати мікрометричних вимірювань максимальних величин вигину тонкостінної основи завтовшки 1,2 мм під час лазерного наплавлення лінійних елементів заввишки 3,5 мм у 10 проходів наведено в таблиці.

Необхідно зазначити, що однорідні деформації зразків, отримані при величинах погонної енергії у 45 та 60 Дж/мм, зменшують шанс появи дефектів у місцях зміни напрямку прогину в порівнянні зі зразком, отриманим при величині погонної енергії у 75...90 Дж/мм. Результати, наведені в таблиці, візуалізовано на графіку рис. 9.

Для визначення профілю прогину матеріалу тонкостінної основи за технологією тривимірного методу цифрової кореляції зображень Stereo-DIC, принцип якої описано в [14], було проведено експериментальне визначення розподілу залишкових деформацій після наплавлення конструктивного елемента.

За результатами аналізу побудованої моделі було визначено, що:



Рис. 7. Типовий прогин з тильної сторони тонкостінної основи під час наплавлення [15]

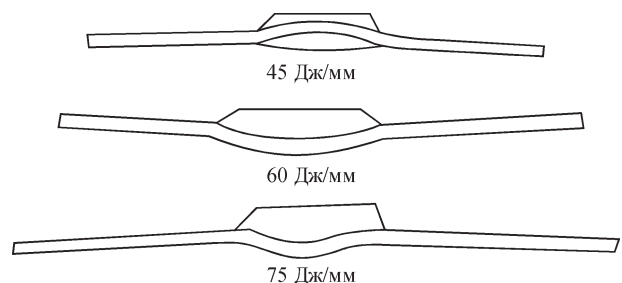


Рис. 8. Профілі зразків наплавлених елементів відповідно до використаної погонної енергії

1. Внутрішні напруження при лазерному наплавленні концентруються по зовнішніх границях наплавленого шару та його торцю.

2. Зміни у напружено-деформованому стані прямо впливають на вигин і форму деталі. Було визначено, що збільшення величини погонної енергії на 15 Дж/мм призводило до збільшення величини абсолютного прогину на 20...30 %.

3. Форма конструктивного елемента, що наплавляється, прямо впливає на ступінь деформації тонкостінної основи в залежності від площі поверхні матеріалу. Це пов'язано з розподілом теплових полів. Наприклад, при наплавленні елементів циліндричної та кубічної форми було зазначено рівномірний розподіл теплових полів і пов'язаних з ними деформацій у всі сторони. У той же час, під час наплавлення таких елементів, як ребра жорсткості та армуючі пояси, розподіл стає нерівномірним.

4. При використанні зразків з більш примусовим водяним чи комбінованим охолодженням деталі спостерігалось зменшення абсолютних значень внутрішніх напружень по всій поверхні деталі.

Для перевірки даних було проведено серію контрольних експериментів, під час яких було визначено, що використання цих технологічних прийомів значно (у залежності від форми елемента та обраної схеми наплавлення) знижує шанси утворення дефектів. Після аналізу результатів експерименту за технологією Stereo-DIC було визначено та представлено профілі прогину зразків під час наплавлення за різними режимами та з використанням комплексу технологічних прийомів (рис. 10).

Даний графік порівнює результати вимірювань абсолютних величин вигину між зразком, де ви-

користовувався рекомендований режим обробки з погонною енергією у 60 Дж/мм, і комплекс технологічних прийомів (лінія «60 Дж/мм + ТП») та три контрольні зразки, де при використанні режимів обробки з густиною потужності у 45, 60 та 75 Дж/мм додаткові комплекси технологічних прийомів не застосовувалися. У результаті проведення досліджень було зазначено, що використання запропонованих технологічних прийомів знижує прогин тонкостінної основи з 4...4,5 мм до 1...1,25 мм. Це свідчить про однозначну ефективність запропонованих технологічних прийомів для зниження величини прогину тонкостінної деталі.

**Обговорення результатів дослідження з мінімізації дефектів.** Аналіз даних, отриманих у результаті даного дослідження, дає безсумнівні докази ефективності запропонованих технологічних прийомів під час лазерного наплавлення на тонкостінну основу завтовшки до 4 мм. Це може бути пояснено використанням комплексного охолодження з використанням підкладного шару у вигляді термопасти в поєднанні з попередньо описаними технологічними прийомами, котрі в сумі призводять до зниження абсолютних значень вигину (різниці між крайніми значеннями вигину деталі) від 3,5...4,5 мм до 1...1,25 мм (у залежності від робочих режимів). Свою роль тут також відіграє оптимізація робочих режимів – під час використання режимів обробки з погонною енергією у 75 Дж/мм тонкостінна основа піддається набагато більшому тепловому впливу навіть у випадку використання технологічних засобів. На додачу до цього, під час структурного аналізу даного зразка в наплавлених шарах було виявлено появу переплавлених шарів, котрі знижували

Величини вигину на зразках з основою завтовшки 1,2 мм

Погонна енергія $E_p$ , Дж/мм	Максимальний прогин по наплавленому елементу $\Delta H_{напл}$ , мм	Максимальний прогин на пластині $\Delta H_{осн}$ , мм	Абсолютний максимальний прогин зразка, мм	Відносне відхилення прогину $\Delta H_{від}$ , %
30	+ 1,19	+ 0,68	1,19	–
45	+ 1,41	+ 0,87	1,41	18
60	– 1,63	– 1,14	1,63	37
75	– 0,85	+ 1,09	1,94	63
90	– 1,51 (проплав)	+ 0,77	2,28	92

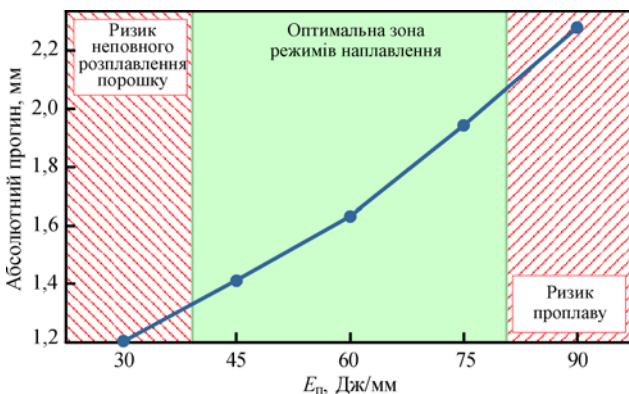


Рис. 9. Залежність абсолютної величини вигину від погонної енергії

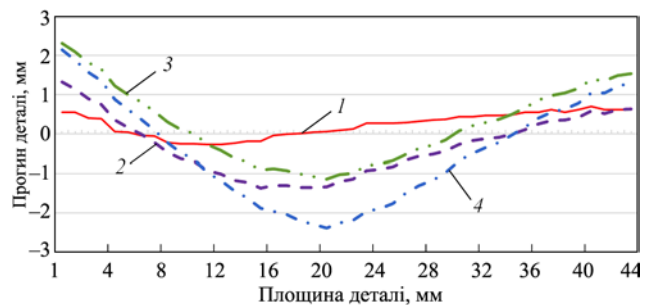


Рис. 10. Зміна профілю прогину тонкостінної основи в залежності від робочих режимів і допоміжних технологічних прийомів: 1 – 60 Дж/мм + ТП, 2 – 45 Дж/мм, 3 – 60 Дж/мм, 4 – 75 Дж/мм

мікротвердість наплавленого матеріалу. Забезпечення якісного закріплення та охолодження тонкостінної деталі також мінімізує шанс утворення дефекту прогину під впливом лазерного випромінювання.

Альтернативне рішення, запропоноване в [13], відрізняється складною формою тонкостінної основи й полягало в підвищенні теплообміну шляхом повітряного охолодження та збільшення контактної поверхні завдяки конвексній формі тонкостінної основи. Цей метод забезпечив бездефектне наплавлення з використанням потужності лазерного випромінювання до 400 Вт, однак потребував спеціального обладнання та не зміг забезпечити бездефектність тонкостінної основи при обробці на потужніших режимах. Це стає можливим завдяки використанню термопасти, що підвищує відносне тепловідведення матеріалу при вищих значеннях лазерного випромінювання завдяки значенню теплопровідності у  $0,65 \dots 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$  відносно теплопровідності повітря  $0,26 \dots 0,28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$ .

Для запобігання виникненню дефектів наплавлених елементів, пов'язаних з прогином та проплавом тонкостінної основи, було запропоновано використання таких технологічних прийомів, як:

1. Багатоточкове закріплення тонкостінної основи.
2. Створення та оптимізація схем наплавлення для одержання однорідного та збалансованого процесу тепловіддачі.
3. Використання тепловідвідних підкладок та охолоджувальних елементів.
4. Використання примусового (газового, водяного чи комбінованого) охолодження тонкостінної основи.
5. Підвищення теплопровідності тонкостінної основи шляхом використання термопаст.

Використання цих технологічних прийомів підвищує теплопровідність матеріалу, тим самим зменшуючи можливість утворення внутрішніх напружень, що є передумовою утворення місцевих пластичних деформацій, та збільшуючи швидкість охолодження деталі. Використання оптимізованих траєкторій наплавлення забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії, що мінімізує шанс утворення загального прогину тонкостінної основи.

У подальшому необхідно врахувати, що для наплавлення на тонкостінні основи зі складнішою формою для забезпечення ефективності запропонованих технологічних прийомів необхідне створення спеціалізованого обладнання у вигляді охолоджувальних елементів із матеріалів з високою теплопровідністю (мідь, алюміній тощо). При цьому при реалізації наплавлення на тонкостінні деталі додатково необхідно врахувати вплив складної геометрії деталей на розподіл температур.

Подальші роботи за даною тематикою будуть містити виготовлення функціональних елементів на зразках, близьких за характеристиками до реальних деталей (за матеріалами та геометрією), з конкретнішими випробуваннями для умов, близьких до експлуатаційних. Це відкриє дорогу до подальшого розвитку технології та створення технологічних карт для впровадження даної технології на підприємствах вітчизняної промисловості.

## Висновки

1. Визначено методи мінімізації дефектів прогину та пропалу під час лазерного наплавлення функціональних елементів на тонкостінну основу. Вони полягають у контролі робочих режимів лазерного випромінювання – рекомендовано дотримуватись таких граничних величин характеристик робочих режимів: густини потужності у  $30 \dots 40 \text{ кВт}/\text{см}^2$  та погонної енергії у  $45 \dots 60 \text{ Дж}/\text{мм}$ ; а також у забезпеченні достатньо міцного закріплення тонкостінної основи та використанні комплексного комбінованого варіанту охолодження оброблюваної деталі. Комбінація даних технологічних прийомів збільшує теплопровідність і швидкість охолодження тонкостінної деталі та мінімізує появу таких дефектів, як прогин і проплав.

2. У результаті досліджень ефективності технологічних прийомів до запобігання утворенню дефектів було визначено, що завдяки високій теплопровідності термопасти  $0,65 \dots 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$ , а також використанню спеціальних траєкторій обробки та технологічних прийомів загальної прогин деталі під час обробки лазерним випромінюванням потужністю у 2 кВт знижується з 4,5 мм до  $1 \dots 1,25 \text{ мм}$ .

## Список літератури/References

1. Su, J., Li, J., Zhu, K., Xing, F., Qiu, X., Liang, J. (2025) Optimization of laser welding parameters and fixed stress span design to minimize deformation in ultra-thin ferritic stainless steel. *Metals*, 15(3), 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15030325>
2. Cheng, J., Xing, Y., Dong, E., Zhao, L., Liu, H., Chang, T., Chen, M., Wang, J., Lu, J., Wan, J. (2022) An overview of laser metal deposition for cladding: defect formation mechanisms, defect suppression methods and performance improvements of laser-cladded layers. *Materials*, 15(16), 5522. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15165522>
3. Rosen, G.D., Stucker, B. (2015) *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Ch.10. Springer, New York.
4. Pulin, N., Ojo, O.A., Zhuguo Li (2014) Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy. *Acta Materialia*, 77, 85–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.039>
5. Mukherjee, T., Manvatkar, V., De, A., DebRoy, T. (2017) Dimensionless numbers in additive manufacturing. *J. Appl. Phys.*, 121, 064904. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4976006>
6. Altuncu, E., Tarim, M. (2024) Investigation of the bending behavior of IN625/SUS316L laser-cladding layers applied to GGG40. *Materials and Technology*, 58(3), 363–370. DOI: <https://doi.org/10.17222/mit.2023.1075>

7. Lan Kang, Peng Song (2024) Bending behaviour of surface corroded and perforated corroded steel tubes repaired by laser cladding additive manufacturing. *Thin-Walled Structures*, **203**, 112213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112213>
8. Yang, T., Xie, D., Yue, W., Wang, S., Rong, P., Shen, L., Zhao, J., Wang, C. (2019) Distortion of thin-walled structure fabricated by selective laser melting based on assumption of constraining force-induced distortion. *Metals*, **9**(12), 1281. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121281>
9. Zhonghua, Li, Renjun, Xu, Zhengwen, Zhang, Ibrahim, Kucukkoc (2018) The influence of scan length on fabricating thin-walled components in selective laser melting. *International J. of Machine Tools and Manufacture*, **126**, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2017.11.012>
10. Abele, E., Stoffregen, H.A., Kniepkamp, M., Lang, S., Hampe, M. (2015) Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements. *J. of Materials Processing Technology*, **215**, 114–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.017>
11. Jichang Liu, Lijun Li (2005) Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, **37**(4), 287–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.04.009>
12. Xu Niu, Ruixian Qin, Yunzhuo Lu, Bingzhi Chen (2021) Energy absorption behaviors of laser additive manufactured aluminium alloy thin-walled tube tailored by heat treatment. *Materials Transactions*, **62**(2), 278–283. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020271>
13. Ahuja, B., Schaub, A., Karg, M., Schmidt, R., Merklein, M., Schmidt, M. (2015) High power laser beam melting of Ti-6Al-4V on formed sheet metal to achieve hybrid structures. In: *Proc. SPIE 9353, Laser 3D Manufacturing II, 93530X (16 March 2015)*. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2082919>
14. Korzhyk, V., Khaskin, V., Savitsky, V., Klochkov, I., Kvasnytskyi, V., Perepichay, A., Peleshenko, S., Grinyuk, A., Alohyn, A., Shutkevych, O. (2022) Calculation-experimental procedure for determining welding deformations and stresses based on a digital image correlation method. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **5**(1(119)), 44–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265767>
15. Yu, J., Sun, W., Huang, H., Huang, Y. (2020) Study on the deformation control and microstructures of thin-walled parts repaired by laser cladding. *Coatings*, **10**(4), 369. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10040369>
16. Plati, A., Tan, J., Golosnoy, I., Persoons, R., vanAcker, K., Clyne, T. (2006) Residual stress generation during laser cladding of steel with a particulate metal matrix composite. *Adv. Eng. Mater.*, **8**, 619–624. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200600063>
17. Kushnarova, O.S., Berdnikova, O.M., Alekseenko, T.O., Sokolovskyi, M.V., Siora, O.V., Lukashenko, V.A. (2025) Influence of the substructure on the change of mechanical properties in the surface layers of structural steel during laser and laser-plasma alloying. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **769**(7-8), 695–705. DOI: <https://doi.org/10.1080/15421406.2025.2495828>

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL METHODS FOR COMBATING DEFECTS THAT FORM DURING LASER CLADDING ON A THIN-WALLED BASE

M.V. Sokolovskyi, V.V. Savytsky, O.V. Siora, Yu.V. Yurchenko, D.A. Harder, A.V. Bernatskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [m\\_sokolovskyi@paton.kiev.ua](mailto:m_sokolovskyi@paton.kiev.ua)

The object of the study is the dependencies of the interaction of laser radiation with the material during the deposition of layers of powder material on a thin-walled base made of heat-resistant corrosion-resistant steel. The problem this study addresses is that during the manufacturing of thin-walled body parts, the design of which contains functional elements that differ significantly in their characteristics from the parts themselves and are intended to perform a different set of certain critical tasks. Typically, these elements are created using argon-arc cladding, microplasma cladding and other processes, but products obtained using such technologies have a significant proportion of defects due to the high chance of defects such as penetration and deflection under the influence of thermal deformations. This work proposes the use of laser radiation for cladding of functional elements and studies methods for minimizing the chances of defects such as deflection as well as burn-through of a thin-walled base. Experimental studies have been conducted, the results of which have been used to refine the methods for cladding of functional elements on a thin-walled base. The results of this work prove the prospects of using laser technology for cladding of functional elements onto a thin-walled base. As a result of the work, methods were developed to minimize the influence of laser radiation on the formation of a deflection defect by 60–80% and to completely prevent any burn-through. These methods are based on the principle of increasing the area and speed of thermal energy distribution, which allow for formation of defect-free cladded layers. The results of this work are planned to be used during development of technologies for laser cladding of functional elements onto thin-walled parts of critical structures of products in space, aviation, chemical, instrument-making and other industries. 17 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

*Keywords: laser cladding, defect prevention, bending, burn-through, technological methods*

### ORCID

Соколовський М.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3243-5060>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>, Сіора О.В. – <https://orcid.org/0009-0005-8542-1633>, Юрченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9253-009X>, Гардер Д.А. – <https://orcid.org/0000-0002-4066-8182>, Бернацький А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

### АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

М.В. Соколовський

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

E-mail: [m\\_sokolovskyi@paton.kiev.ua](mailto:m_sokolovskyi@paton.kiev.ua)

### РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

М.В. Соколовський, В.В. Савицький, О.В. Сіора, Ю.В. Юрченко, Д.А. Гардер, А.В. Бернацький (2026) Визначення технологічних прийомів запобігання дефектам під час лазерного наплавлення на тонкостінну основу. *Автоматичне зварювання*, **02**, 25–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.03>

### ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 01.08.2025

Отримано у переглянутому вигляді 20.10.2025

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 11.04.2026