

УДК 621.793.7:621.7.04:621.7.04:621.762

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.12

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. ШОРІНОВ, В. А. ДАЦЕНКО, В. В. ТРЕТЯК

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІСЛЯОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Предметом дослідження є огляд наявних адитивних методів виготовлення та відновлення деталей авіаційної техніки. Актуальність дослідження обумовлена потребою у ефективних технологіях швидкого виробництва та відновлення деталей авіаційної техніки. Впровадження адитивних технологій у аерокосмічній галузі обумовлене необхідністю зниження маси конструкцій і підвищення ефективності використання матеріалів. Для традиційних методів виготовлення коефіцієнт використання матеріалу становить 5-10 %. У той же час адитивні методи дозволяють суттєво знизити втрати матеріалу, наближаючи коефіцієнт використання матеріалу до 0,5–0,8, залежно від геометрії деталі та обраної технології. Однак кожному з адитивних методів притамано недоліки у вигляді поверхневих і об'ємних дефектів: пористість, залишкові напруження, анізотропія, мікротріщини, хвилястість поверхні, геометричні відхилення, несплавлення між шарами, бризки металу. Відповідно, виникає необхідність у післяобробленні поверхонь деталей. **Метою** роботи є дослідження можливості застосування холодного газодинамічного напилювання для післяоброблення деталей для відновлення дефектів і модифікації поверхневого шару. **Наукова новизна** полягає в обґрунтуванні нового підходу до післяоброблення деталей, виготовлених адитивними методами, що ґрунтується на використанні кінетичної енергії частинок у процесі холодного газодинамічного напилювання для усунення типових поверхневих недоліків адитивного виробництва, формуванні заданого комплексу фізико-механічних властивостей, а також відновлення заданої геометрії деталі. **Практична значущість** полягає в тому, що результати дослідження можуть слугувати підґрунтям для розроблення гібридних технологічних процесів, у яких адитивне виробництво відповідає за формування складної геометрії з мінімальною масою, а ХГН – за формування необхідних фізико-механічних властивостей. Використання газодинамічного напилювання для післяоброблення та відновлення дозволяє мінімізувати брак, а також уникнути необхідності повторного виготовлення деталей.

Ключові слова: адитивні методи виготовлення; холодне газодинамічне напилення; покриття; зносостійкість; корозійна стійкість; відновлення авіаційних деталей; поверхнєве оброблення.

1. Вступ

Впровадження адитивних технологій у аерокосмічній галузі обумовлене необхідністю зменшення маси конструкцій і підвищення ефективності використання матеріалів. Для традиційних методів виготовлення шляхом видалення матеріалу, зокрема механічної обробки високоміцних титанових заготовок, яке відповідає використанню лише 5–10% вихідного матеріалу. У той же час, адитивні методи дозволяють суттєво зменшити ці втрати, наближаючи коефіцієнт використання матеріалу до 0,5–0,8, залежно від геометрії деталі та обраної технології [1].

Сучасні авіаційні двигуни та літальні апарати, включаючи платформи п'ятого покоління та цивільні широкофюзеляжні літаки, наприклад, сімейства Boeing 787 і Airbus A350, характеризуються поступовим розширенням застосування адитивного виробництва, переважно для виготовлення допоміжних і середньонавантажених елементів конструкції [2].

Згідно з сучасними оглядовими дослідженнями [1-2], використання методів пошарового синтезу, зокрема плавлення в шарі порошку (Powder Bed Fusion, PBF) і осадження матеріалу спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED), забезпечує можливість створення геометрично складних конструкцій, включаючи топологічно оптимізовані структури, які є недосяжними або економічно недоцільними при застосуванні традиційних технологій лиття або обробки тиском без необхідності використання дорогого оснащення, такого як пуансони, штампи або ливарні форми.

2. Постановка задачі

Стрімкий розвиток металевих адитивних виробництв суттєво розширив можливості створення високотехнологічних деталей для авіаційної, аерокосмічної, енергетичної та інших галузей машинобудування [3-4]. Технології лазерного плавлення в шарі



порошку (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF), осадження матеріалу спрямованою енергією та електродугове адитивне виробництво з використанням дроту (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) забезпечують виготовлення виробів складної геометрії, реалізацію топологічно оптимізованих конструкцій, скорочення кількості складальних одиниць і підвищення коефіцієнта використання матеріалу. Водночас накопичені результати сучасних досліджень свідчать, що широке промислове впровадження адитивних технологій стримується не стільки можливістю формування геометрії, скільки забезпеченням необхідного рівня експлуатаційних властивостей відповідальних деталей.

Одним із ключових недоліків металевго адитивного виробництва залишається формування дефектних поверхневої та приповерхневої зон. Незалежно від технології виготовлення, в деталях можуть виникати пористість, дефекти сплавлення, мікротріщини, висока шорсткість, хвилястість поверхні, геометричні відхилення, анізотропія мікроструктури та значні залишкові напруження. Такі дефекти є концентраторами напружень, прискорюють зародження й розвиток втомних тріщин, погіршують корозійну стійкість і знижують ресурс конструкцій, що особливо критично для авіаційних газотурбінних двигунів, елементів планера, теплонавантажених вузлів ракетної техніки та інших виробів відповідального призначення [4 – 5].

Окремою проблемою є недостатня якість поверхні деталей, отриманих методами DED і особливо WAAM, що зумовлює потребу в значних припусках на механічну обробку та підвищує собівартість виробництва. Для авіаційної та аерокосмічної техніки додатково актуальною є функціоналізація поверхонь, зокрема забезпечення зносо-, корозійної, ерозійної та жаростійкості, а також локального зміцнення окремих зон виробу [6].

У цьому контексті холодне газодинамічне наплення (Cold Spray, CSAM) є перспективною технологією післяоброблення, ремонту та гібридного адитивного виробництва. Відсутність плавлення під час осадження частинок дає змогу мінімізувати термічний вплив, уникнути утворення крихких фаз і сформувати щільні металеві шари з високою адгезійною міцністю. Технологія також відкриває можливості створення функціональних покриттів і біметалічних конструкцій на основі титанових, нікелевих, алюмінієвих і мідних сплавів [7].

Попри значну кількість досліджень, комплексне поєднання металевго адитивного виробництва та холодного газодинамічного наплення залишається недостатньо систематизованим. Зокрема,

взаємозв'язок між дефектами адитивно виготовлених деталей, можливостями їх усунення та формуванням функціональних поверхневих шарів висвітлено фрагментарно.

У зв'язку з цим актуальним є комплексний аналіз сучасного стану досліджень у сфері металевго адитивного виробництва та холодного газодинамічного наплення з акцентом на дефекти, методи їх усунення, створення функціональних покриттів і біметалічних структур, а також перспективи використання гібридних технологічних підходів для виготовлення, відновлення та підвищення експлуатаційних характеристик деталей.

3. Класифікація та аналіз основних методів адитивного виробництва

У авіаційній промисловості найбільшого поширення набули три основні групи металевих адитивних технологій: лазерне плавлення в шарі порошку, осадження матеріалу спрямованою енергією та електродугове адитивне виробництво з використанням дроту. Кожна з них характеризується специфічним механізмом формування матеріалу, технологічними особливостями та сферою практичного застосування. Основні переваги, обмеження й приклади використання зазначених технологій наведено в таблиці 1.

Вибір матеріалів для адитивного виробництва в аерокосмічній галузі визначається комплексом вимог до питомої міцності, втомної довговічності, тріщиностійкості та корозійної стійкості. Ці критерії узагальнено в сучасних оглядових дослідженнях адитивного виробництва металів [1 – 3].

Найбільш дослідженим і технологічно відпрацьованим матеріалом для адитивних процесів залишається титановий сплав Ti-6Al-4V. Його широке застосування зумовлене поєднанням високої питомої міцності, корозійної стійкості та застосовуваності до процесів типу L-PBF і DED. Сучасні дослідження [4] показують, що під час оптимізації параметрів процесу можливе формування дрібнодисперсної мартенситної або бімодальної мікроструктури.

Зростання використання титанових сплавів у авіаційній і аерокосмічній техніці зумовлене поєднанням високої питомої міцності, корозійної стійкості та технологічної сумісності з сучасними адитивними методами виробництва. Для окремих високотехнологічних військових платформ частка титанових сплавів може сягати 30–40% маси конструкції, тоді як для цивільних літаків цей показник є нижчим і визначається конструктивними та експлуатаційними вимогами [4].

Таблиця 1

Порівняння адитивних методів отримання деталей

Технологія виготовлення	Ключові переваги	Основні обмеження	Застосування	Джерела
Лазерне плавлення у шарі порошку (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF)	Висока точність виготовлення; можливість створення складних внутрішніх каналів і топологічно оптимізованих конструкцій; низький рівень пористості; високі механічні показники після термообробки	Обмежені габарити робочої камери; висока вартість порошків; низька продуктивність; залишкові напруження; анізотропія структури; потреба в підтримках та післяобробленні	Паливна форсунка турбовентиляторних двигунів сімейства CFM LEAP; теплообмінники; елементи паливних систем; кронштейни та силові компоненти літальних апаратів; елементи турбомашин	Liu, S., Shin, Y.C. [4], DebRoy, T. [1], Herzog, D. [3], Blakey-Milner, B. [2], Xu, Z.W. [8], Zaba, K. [10]
Осадження матеріалу спрямованою енергією (Directed Energy Deposition, DED)	Висока швидкість осадження; виготовлення великогабаритних виробів; формування функціонально-градієнтних матеріалів; можливість локального нанесення покриттів і зміни хімічного складу	Значний тепловклад; низька точність порівняно з L-PBF; необхідність подальшої механічної обробки; ризик утворення інтерметалідних фаз і сегреації при виготовленні деталей з декількох матеріалів	Відновлення лопаток турбін; ремонт корпусних деталей двигунів; нанесення зносостійких та жаростійких шарів; виготовлення великогабаритних елементів двигунів і планера	DebRoy, T. [1], Saboori, A., Aversa, A. [10], Ghasempour-Mouziraji, M.A [11], Liu, S., Shin, Y.C. [4].
Електродугове адитивне виробництво з використанням дроту (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)	Висока швидкість осадження (1–10 кг/год); низька вартість матеріалу; високий коефіцієнт використання матеріалу; застосовуваність для великогабаритних конструкцій	Висока шорсткість поверхні ($Ra \approx 20\text{--}50$ мкм та більше); хвилястість шарів; геометричні відхилення; значний тепловклад; грубозерниста анізотропна мікроструктура; потреба в механічній обробці	Лонжерони, нервюри, вузли кріплення, елементи силового набору планера, корпусні деталі ракетно-космічної техніки, великогабаритні танові та алюмінієві заготовки	Denkena, B. [12], Oliveira, J.P. [13], Li, B., Nagaraja, K.M. [14], Blakey-Milner, B. [2], DebRoy, T. [1]

За фазовим складом титанові сплави поділяються на α -, β - та $\alpha+\beta$ -класи. α -сплави (наприклад, Ti-5Al-2.5Sn) характеризуються високою термічною стабільністю та границею повзучості, тоді як $\alpha+\beta$ -сплави (зокрема Ti-6Al-4V) забезпечують оптимальне поєднання міцності, пластичності та технологічності, що зумовлює їх домінування у виробництві відповідальних елементів, таких як диски компресорів, лопатки та корпусні компоненти.

Ключовою особливістю титану є його висока хімічна активність при підвищених температурах. У процесах L-PBF це зумовлює необхідність використання контрольованої інертної атмосфери (переважно аргону) з низьким вмістом кисню та азоту. Поглинання міжвузлових елементів призводить до утворення крихких фаз і формування так званого газонасиченого (α -case) шару, що супроводжується зниженням пластичності та втомної довговічності матеріалу [1]. Саме тому контроль газового середовища та подальша термічна або механічна обробка є невід'ємною частиною технологічного процесу.

Нікелеві жароміцні суперсплави, зокрема Inconel 718 та Inconel 625, залишаються базовими матеріалами для елементів «гарячої» частини газотурбінних двигунів, де робочі температури 600–1000 °C і вище. Їх застосування обумовлене поєднанням жароміцності, стійкості до повзучості, окислення та стабільності мікроструктури при тривалих термічних навантаженнях, що підтверджується в роботах [2, 15].

Серед нікелевих суперсплавів Inconel 718 залишається найбільш адаптованим до адитивного виробництва, зокрема процесів -PBF, що пов'язано з його відносно стабільною кристалізаційною поведінкою та можливістю ефективного дисперсійного зміцнення. Дослідження [1, 2] показують, що після адитивного виготовлення сплаву Inconel 718 формується дрібнодендритна мікроструктура з вираженою мікросегрегацією ніобію в міждендритних ділянках. Це сприяє утворенню фази Лавеса, яка виснажує матрицю за ніобієм і погіршує умови для формування зміцнювальних γ' - та γ'' -фаз, а тому для досягнення вищих механічних властивостей необхідна подальша термічна обробка.

Алюмінієві сплави залишаються ключовими конструкційними матеріалами для елементів планерів літальних апаратів завдяки поєднанню низької густини, високої питомої міцності та корозійної стійкості. У контексті адитивного виробництва найбільш технологічно застосовуваними є сплави Al-Si-Mg, насамперед AlSi10Mg, що пояснюється їх високою придатністю до процесів L-PBF. Наявність кремнію звужує інтервал кристалізації, покращує текучість розплаву, зменшує усадкові явища та схильність до гарячого розтріскування, забезпечуючи формування виробів із високою відносною густиною.

Натомість високоміцні алюмінієві сплави серії 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu), які широко застосовуються в

силових елементах авіаційних конструкцій, залишаються складними для виготовлення методом L-PBF. Сучасні дослідження [8, 15] свідчать, що основними причинами є селективне випаровування легких легувальних елементів (насамперед Zn і Mg), широкий інтервал кристалізації, а також висока схильність до гарячого розтріскування та пороутворення. У сукупності ці фактори ускладнюють стабілізацію процесу та негативно впливають на формування бездефектної мікроструктури та механічні властивості виробів.

Ключовою проблемою адитивного виготовлення нікелевих суперсплавів методом L-PBF залишається утворення дефектів кристалізації, насамперед гарячих тріщин, а також мікросегрегації легувальних елементів у міждендритних ділянках. У роботах [1, 2] зазначено, що їх формування пов'язане з особливостями затвердіння розплаву, високими температурними градієнтами та великими швидкостями охолодження, характерними для процесу L-PBF. Зменшення дефектоутворення досягається оптимізацією параметрів процесу, стратегії сканування та подальшою термічною обробкою, необхідною для стабілізації мікроструктури й механічних властивостей матеріалу.

Узагальнення сучасних досліджень [1, 2, 4] свідчать, що деталі, отримані методами L-PBF, характеризуються нерівноважною мікроструктурою та сукупністю внутрішніх і поверхневих дефектів, які визначають їх експлуатаційні властивості.

Анізотропія механічних властивостей зумовлена пошаровим формуванням виробу та напрямленою кристалізацією вздовж теплового потоку, що призводить до утворення видовжених колоніальних зерен, орієнтованих уздовж осі побудови. Унаслідок цього механічні властивості в напрямку побудови можуть поступатися аналогічним характеристикам у площині шарів, що підтверджено для сплавів Ti-6Al-4V та Inconel 718 [1, 4].

До найбільш критичних дефектів належать газова пористість, дефекти несплавлення, усадкові порожнини та мікротріщини. Навіть за досягнення високої відносної густини матеріалу ці дефекти залишаються концентраторами напружень і є основними осередками зародження втомних тріщин [6, 17].

Високі температурні градієнти, притаманні процесам L-PBF, спричиняють формування значних залишкових напружень, які можуть призводити до короблення виробів, локального розтріскування та зниження точності. З цієї причини після виготовлення відповідальних деталей застосовують термічну обробку, а для виробів авіаційного призначення – за необхідності також гаряче ізостатичне пресування, що забезпечує додаткове ущільнення матеріалу та зменшення кількості внутрішніх дефектів [1, 2].

Таким чином, незважаючи на значний прогрес адитивних технологій, експлуатаційні характеристики виробів значною мірою визначаються наявністю дефектів поверхневого шару, залишкових напружень і особливостями сформованої мікроструктури.

З огляду на це холодне газодинамічне напилення розглядається як більш придатна альтернатива для обробки та формування виробів із високоміцних алюмінієвих сплавів. Відсутність плавлення виключає втрати легуючих елементів і дозволяє формувати щільні структури без фазової деградації [7, 18].

4. Необхідність післяоброблення поверхонь деталей

Адитивне виробництво часто помилково сприймається як завершений цикл "Net-Shape" (отримання готової форми). Однак для авіаційної галузі стан поверхні деталей безпосередньо після виготовлення є неприйнятним (рис. 1, 2). Основною причиною є висока шорсткість поверхні (R_a в межах 20–50 мкм), наявність частково сплавлених порошків та висока концентрація розтягувальних залишкових напружень. Післяоброблення є обов'язковим і високовартісним етапом адитивного виробництва. Однією з основних проблем металевого адитивного виробництва є забезпечення необхідної якості поверхні та геометричної точності виготовлених деталей.



Рис. 1. Фотографії зразків, отриманих методом SLM (100 Вт, 300 мм/с), у різних орієнтаціях: (а) вертикальній та (б) поздовжній [9]



Рис. 2. Фотографія зовнішнього кільця, що входить до складу турбіни двигуна AI-222, виготовленого методом мікроплазмового порошкового наплавлення [19]

Незважаючи на суттєві переваги адитивних технологій щодо коефіцієнта використання матеріалу та можливості виготовлення деталей складної форми, отримані вироби переважно характеризуються значними відхиленнями форми, підвищеною шорсткістю поверхні та наявністю технологічних дефектів [20].

Особливо виражено ця проблема проявляється при використанні технологій осадження матеріалу спрямованою енергією та при електродуговому адитивному виробництві з використанням дроту, де значне тепловкладення, циклічне нагрівання й охолодження матеріалу та особливості формування наплавлених валиків обумовлюють виникнення характерної хвилястості поверхні, нерівномірності шарів, локальних підрізів, напливів і відхилень форми виробу. На відміну від порошкових технологій типу PBF, при використанні яких переважають дефекти сплавлення та пористість, для WAAM суттєвим фактором є саме макрогеометрична неточність поверхонь.

З точки зору забезпечення геометричної точності та визначення припусків на механічну обробку найбільш критичними є хвилястість поверхні, відхилення форми та відхилення положення окремих елементів виробу. Формування хвилястої поверхні є наслідком пошарового нанесення металу та нерівномірного розтікання розплаву. Додатково на якість поверхні впливають нестабільність дуги, розбризкування металу, термічні деформації та локальні порушення режимів наплавлення. У результаті поверхня виробів у стані as-built характеризується значними нерівностями [20].

Хвилястість, підрізи, локальні западини та інші геометричні неоднорідності виступають концентраторами напружень і сприяють зародженню втомних тріщин. Для деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень, поверхневий стан часто стає визначальним фактором довговічності [8].

Дослідження показують, що необроблені WAAM-зразки мають нижчі показники міцності та втомної довговічності порівняно з механічно обробленими аналогами, що пов'язано як з особливостями мікроструктури, так і з наявністю розвиненого поверхневого рельєфу.

Для компенсації зазначених відхилень при проектуванні WAAM-деталей необхідно передбачати додаткові припуски на механічну обробку. У ряді випадків об'єм матеріалу, що видаляється під час фрезерування або шліфування, може бути значним, що знижує коефіцієнт використання матеріалу та збільшує собівартість виробництва. Саме післяоброблення часто стає одним із найбільш трудомістких і витратних етапів технологічного маршруту адитивного виготовлення деталей [14, 12].

Окрім об'ємних дефектів, висвітлених у роботах [16, 21], таких як внутрішня пористість, непровари та залишкові напруження, суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики адитивно виготовлених деталей мають поверхневі дефекти. Для виробів, отриманих методами PBF, DED і WAAM, характерними є підвищена шорсткість і хвилястість поверхні, відкриті пори, поверхневі непровари, мікротріщини, локальні геометричні відхилення та дефекти, пов'язані з нестабільністю процесу формування шарів. Саме поверхневий шар є найбільш критичною зоною з точки зору зародження втомних тріщин, розвитку корозійних процесів і зношування в умовах експлуатації. Крім того, наявність поверхневих нерівностей і дефектів призводить до необхідності збільшення припусків на механічну обробку, що підвищує матеріаломісткість і собівартість виробництва.

Незважаючи на значний прогрес адитивних технологій, експлуатаційні характеристики деталей визначаються не лише властивостями матеріалу основи, але й станом їх поверхні. Для відповідальних виробів аерокосмічної техніки, що працюють в умовах інтенсивного механічного, термічного та корозійного навантаження, конструкційні матеріали не завжди забезпечують необхідне поєднання зносостійкості, корозійної стійкості, теплопровідності, електропровідності або опору високотемпературному окисненню. Це зумовлює необхідність застосування технологій поверхневої функціоналізації, здатних локально модифікувати властивості виробу без зміни характеристик його основного матеріалу.

Одним із сучасних напрямів розвитку адитивного виробництва є поєднання технологій пошарового формування деталей із нанесенням функціональних поверхневих шарів [15, 17, 22]. Такий підхід дозволяє реалізувати розподіл властивостей, за якого матеріал основи забезпечує несну здатність конструкції, тоді як поверхневий шар виконує спеціалізовані функції – підвищує зносо- та корозійну стійкість, покращує тепло- або електропровідність, а також забезпечує відновлення локально пошкоджених поверхонь.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють холодному газодинамічному напilenню як технології формування функціональних шарів на деталях, виготовлених адитивними методами. Відсутність плавлення матеріалу під час осадження частинок мінімізує термічний вплив на основу, що є особливо важливим для титанових, нікелевих і алюмінієвих сплавів. Сучасні дослідження [7, 18, 23] демонструють ефективність холодного газодинамічного напilenня для нанесення мідних, нікелевих, алюмінієвих і композиційних покриттів, які використовують з метою підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, тепло- та електропровідності, а також для

відновлення й локальної модифікації поверхонь відповідальних деталей.

5. Холодне газодинамічне напилення як спосіб відновлення деталей і модифікації поверхонь

Холодне газодинамічне напилення (ХГН, Cold Spray, CS) є твердофазною технологією нанесення металевих покриттів і адитивного формування матеріалу, згідно з якою осадження порошкових частинок відбувається за рахунок їх високої кінетичної енергії без переходу в рідкий стан. Процес реалізується шляхом прискорення металевого порошку в надзвуковому потоці стисненого газу з подальшим ударом частинок об поверхню підкладки, що супроводжується їх інтенсивною пластичною деформацією та формуванням металургійного контакту [22, 23].

На відміну від процесів, що базуються на плавленні матеріалу, під час ХГН температура робочого газу становить близько 300 – 800 °C і залишається нижчою від температури плавлення більшості конструкційних металів. Унаслідок цього осадження відбувається в твердій фазі, що мінімізує окиснення матеріалу, практично виключає утворення зони термічного впливу та суттєво обмежує фазові перетворення, характерні для рідкофазних технологій. Завдяки цьому вихідна мікроструктура матеріалу основи зберігається значно краще, ніж під час термічного наплавлення або лазерного осадження.

Однією з характерних особливостей деталей, виготовлених методами L-PBF, DED і WAAM, є наявність поверхневих і приповерхневих дефектів, зокрема відкритої пористості, дефектів несплавлення, мікротріщин і підвищеної шорсткості.

У цьому контексті холодне газодинамічне напилення доцільно розглядати не лише як технологію нанесення покриттів, а й як інструмент модифікації поверхневого шару деталей, виготовлених адитивними методами. Високошвидкісне зіткнення частинок із

поверхнею супроводжується значною пластичною деформацією частинок і локальних ділянок підкладки, що забезпечує формування щільного металевого шару з низькою пористістю та високою адгезією. Для деталей з поверхневими дефектами це сприяє ущільненню приповерхневої зони, частковому заповненню відкритих пор і нерівностей, а також поліпшенню суцільності поверхневого шару.

Крім відновлення геометрії поверхні, ХГН забезпечує можливість локальної функціоналізації деталей шляхом нанесення шарів із заданими фізико-механічними властивостями. Залежно від складу порошкового матеріалу можуть бути сформовані зносостійкі, корозійностійкі, електропровідні, теплопровідні або жаростійкі покриття, що істотно розширює функціональні можливості адитивно виготовлених виробів без повторного плавлення матеріалу основи [17, 18, 22, 23].

Однією з ключових переваг холодного газодинамічного напилення є можливість локальної модифікації поверхневого шару без зміни властивостей матеріалу основи. Це дозволяє поєднати високу конструкційну міцність деталі, отриманої адитивними методами, із функціональними властивостями, необхідними для роботи в конкретних умовах експлуатації.

Для алюмінієвих і магнієвих сплавів ця технологія використовується здебільшого для створення щільних захисних шарів, які підвищують корозійну стійкість і зносостійкість поверхні. Для мідних порошків ХГН забезпечує формування покриттів із високою електро- та теплопровідністю завдяки відсутності плавлення й обмеженому окисненню матеріалу під час осадження. Це відкриває можливість локального формування струмопровідних або тепловідвідних елементів на деталях із титанових і нікелевих сплавів [18, 23]. У таблиці 2 наведено основні матеріали порошків для ХГН і перелічено основні призначення, властивості та приклади застосування для деталей аерокосмічної техніки (АРКТ).

Таблиця 2

Основні матеріали порошків для ХГН

Матеріал порошка	Типові марки	Основне призначення покриття	Основні властивості	Приклади застосування в АРКТ	Особливості ХГН
Титанові сплави	Ti, Ti-6Al-4V	Відновлення поверхонь, корозійний захист, локальне нарощування матеріалу	Висока питома міцність, корозійна стійкість, сумісність із титановими деталями	Лопатки компресора, елементи планера, корпусні деталі	Потребують високих швидкостей частинок; забезпечують щільні покриття
Нікелеві суперсплави	Inconel 718, Inconel 625, NiCr	Відновлення гарячої частини двигунів, жаростійкі та корозійностійкі покриття	Жароміцність, стійкість до повзучості, окислення та термоциклічної втоми	Камери згоряння, компоненти турбіни, соплові вузли	Формують щільні покриття з мінімальним окисненням; можливе поєднання з термообробкою

Матеріал порошка	Типові марки	Основне призначення покриття	Основні властивості	Приклади застосування в АРКТ	Особливості ХГН
Алюмінієві сплави	Al, AlSi10Mg, Al6061, Al7075	Відновлення геометрії, антикорозійний захист, ремонт конструкцій	Мала густина, висока корозійна стійкість	Панелі планера, обшивка, корпусні елементи	Відсутність плавлення запобігає втраті Zn і Mg, що особливо важливо для сплавів серії 7xxx
Мідь і мідні сплави	Cu, CuCrZr	Теплопровідні та електропровідні покриття	Висока тепло- й електропровідність	Камери згоряння ракетних двигунів, теплообмінники, струмопровідні елементи	ХГН ефективний для матеріалів, складних для лазерного друку через високу теплопровідність і відбивну здатність
Кобальтові сплави	CoCr, Stellite	Зносо- та ерозійностійкі покриття	Висока твердість, жаростійкість, стійкість до фретинг-зношування	Крайки лопаток, контактні поверхні	Використовуються переважно для локального зміцнення поверхні
MCrAlY-порошки	NiCoCrAlY, CoNiCrAlY	Захист від високотемпературного окиснення та газової корозії	Формування стабільної оксидної плівки, жаростійкість	Лопатки турбіни, жарові труби, камери згоряння	Один із найбільш поширених для покриттів гарячої частини ГТД
Карбідовмісні композиції	WC-Co, WC-Ni, Cr ₃ C ₂ -NiCr	Підвищення зносостійкості та ерозійної стійкості	Висока твердість, зносостійкість	Посадкові поверхні, вали	ХГН дозволяє зберегти карбідну фазу без значного термічного руйнування

Практичні аспекти застосування методу підтверджено в роботах [22, 24], де показано ефективність холодного напилення для відновлення геометричних параметрів і експлуатаційних характеристик авіаційних деталей. На рис. 3, 4 показано можливості виготовлення гідравлічного кулачкового швидкокорознімного з'єднання методом ХГН і відновлення пошкодженого корпусу.



Рис. 3. Гідравлічне кулачкове швидкокорознімне з'єднання з алюмінієвого сплаву 6061, виготовлене методом холодного газодинамічного напилення (SPEE3D) [7]



Рис. 4. Фотографії корпусів до (а) та після відновлення (б) [24]

Перспективним напрямом є створення біметалічних і багатоматеріальних конструкцій. На відміну від технологій, що базуються на плавленні, твердофазний характер ХГН дає змогу поєднувати матеріали з істотно різними фізико-хімічними властивостями, зменшуючи ризик утворення крихких інтерметалідних фаз, характерних для рідкофазних процесів. Завдяки цьому стає можливим поєднання високої питомої міцності титанових або нікелевих сплавів із високою тепло- чи електропровідністю міді або підвищеною корозійною стійкістю інших функціональних матеріалів [15, 17]. На рис. 5 представлено біметалічну камеру згоряння, сформовану методом LP-DED.



Рис. 5. Біметалічна камера згоряння: лайнер із GRCor-42, виготовлений методом L-PBF, і зовнішня оболонка зі сплаву NASA HR-1, сформована методом LP-DED (RPM Innovations / NASA) [2]

Сучасні дослідження демонструють зростаючий інтерес до гібридних адитивних технологій, у яких ХГН інтегрується з процесами L-PBF або DED. Такі технології адитивного виробництва забезпечують формування геометрично складної конструкції, тоді як холодне газодинамічне напилення використовується для локального відновлення поверхонь, нанесення функціональних шарів або створення багато-матеріальних зон із заданими експлуатаційними властивостями [10, 15, 17, 23].

Висновки

У результаті аналізу сучасних наукових публікацій встановлено, що адитивне виробництво металевих виробів є одним із ключових напрямів розвитку аерокосмічного машинобудування, що забезпечує виготовлення деталей складної геометрії, зменшення матеріаломісткості конструкцій, скорочення кількості складальних операцій. Промислового поширення набули технології лазерного пошарового сплавлення порошкового шару, спрямованого енергетичного осадження та електродугового адитивного виробництва, кожна з яких характеризується певними технологічними перевагами, обмеженнями та сферою застосування.

Показано, що експлуатаційні характеристики адитивно виготовлених деталей значною мірою визначаються особливостями сформованої мікроструктури та наявністю внутрішніх і поверхневих дефектів. Найбільш характерними є пористість, дефекти несплавлення, залишкові напруження, анізотропія властивостей, підвищена шорсткість і хвилястість поверхні. Зазначені особливості негативно впливають на втомну довговічність, корозійну стійкість і геометричну точність виробів, що обумовлює необхідність післяоброблення та методів модифікації поверхневого шару.

Аналіз сучасних досліджень показав, що із забезпеченням геометричної точності дедалі більшого значення набуває формування функціональних поверхонь, які надають деталям властивостей, недостижних лише за рахунок матеріалу основи. До таких властивостей належать підвищена зносостійкість, корозійна та жарова стійкість, а також покращені тепло- й електропровідні характеристики.

Встановлено, що холодне газодинамічне напилення є перспективною технологією поверхневої інженерії для адитивно виготовлених виробів. Завдяки твердофазному механізму осадження процес дозволяє формувати щільні покриття з мінімальним термічним впливом на матеріал основи, зберігати його фазовий склад і створювати функціональні шари різного призначення.

Таким чином, інтеграція адитивного виробництва з технологіями поверхневого оброблення, зокрема холодним газодинамічним напиленням, є перспективним напрямком розвитку сучасного матеріалознавства та виробництва. Такий підхід дозволяє поєднати переваги адитивних технологій із формуванням експлуатаційних властивостей поверхні, що створює передумови для підвищення надійності та довговічності деталей.

Внесок авторів: концептуалізація дослідження, формулювання проблеми – **О. В. Шорінов**; огляд та аналіз літературних джерел – **О. В. Бондаренко, О. В. Шорінов, В. А. Даценко**; написання первісного тексту рукопису – **О. В. Бондаренко**; узагальнення висновків – **О. В. Бондаренко, О. В. Шорінов**; фінальне редагування рукопису – **О. В. Шорінов, В. В. Третьак**.

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють, що вони не мають конфлікту інтересів щодо цієї публікації, включаючи фінансові, особисті, авторські та інші інтереси, що можуть вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при підготовці цієї публікації вони не використовували методи штучного інтелекту.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback et al. // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Metal additive manufacturing in aerospace: A review / B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden et al. // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 209. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
3. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
4. Liu, S. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review / S. Liu, Y. C. Shin // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 164. – 23 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
5. Defects, microstructure and properties in additive manufacturing of TiAl alloys: Formation mechanisms, influencing factors and improvement strategies / L. Wang, C. Shen, Y. Zhang et al // *Materials & Design*. – 2025. – Vol. 256. – 41 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114235>
6. Bhandari, L. Defects Associated with Metal Additive Manufacturing and Post-processing Techniques / L. Bhandari, V. Gaur // *Metal Additive Manufacturing: Materials Forming, Machining and Tribology*. – 2025. – P. 185–207. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-8162-4_10
7. Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Part 16: Cold Spray. Digital Alloys, January 28. – 2020. – Available at: <https://www.digitalalloys.com/blog/cold-spray/>
8. High cycle fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting / Z. W. Xu, Q. Wang, X. S. Wang et al. // *Mechanics of Materials*. – 2020. – Vol. 148. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103499>
9. Effect of Build-Up Strategy and Selective Laser Melting Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel / K. Žaba, M. Balcerzak, P. Palka et al. // *Materials*. – 2026. – Vol. 19, iss. 1. – 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma19010026>
10. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair / A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese et al. // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9, iss. 16. – 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163316>
11. A review study on metal powder materials and processing parameters in Laser Metal Deposition / M. Ghasempour-Mouziraji, J. Lagarinhos, D. Afonso, R. Alves de Sousa // *Optics & Laser Technology*. – 2024. – Vol. 170. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110226>
12. Denkena, B. Mechanical Finishing of Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Parts / B. Denkena, A. Krodel, P. Pillkahn // *20th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry 2020 (MIC 2020)*, December 2nd 2020, Hannover, Germany. – 2020. – P. 174–180. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3726008>
13. Oliveira, J. P. Micro wire and arc additive manufacturing (μ -WAAM) / J. P. Oliveira, F. M. Gouveia, T. G. Santos // *Additive Manufacturing Letters*. – 2022. – Vol. 2. – 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100032>
14. Integrating robotic wire arc additive manufacturing and machining: hybrid WAAM machining / B. Li, K. M. Nagaraja, R. Zhang et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 129, iss. 7–8. – P. 3247–3259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12517-4>
15. Multi-material additive manufacturing of metals: A review of structures and mechanical characteristics / S. N. Samad, J. Griffiths, G. Manogharan, N. Kouraytem // *Engineering Science in Additive Manufacturing*. – 2025. – Vol. 1, iss. 2. – 46 p. DOI: <https://doi.org/10.36922/ESAM025180010>
16. Defect inspection technologies for additive manufacturing / Y. Chen, X. Peng, L. B. Kong, G. Dong // *International Journal of Extreme Manufacturing*. – 2021. – Vol. 3, iss. 2. – 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abe0d0>
17. Exceptional mechanical properties of dual-phase heterogenous structure in Cf/C and superalloy joints via cold spray additive manufacturing-assisted brazing / P. Wang, W. Shi, L. Gu et al. // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2026. – Vol. 244. – P. 46–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.04.031>
18. Daroonparvar, M. Corrosion in additively manufactured cold spray metallic deposits / M. Daroonparvar, C. M. Kay // *Tribology of Additively Manufactured Materials. Fundamentals, Modeling, and Applications. Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering*. – 2022. – P. 289–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00010-X>
19. Чигілейчик С. Л. Забезпечення механічних властивостей об'ємних виробів із жароміцних нікелевих сплавів, отриманих адитивним мікроплазмовим наплавленням для виробництва деталей авіаційних двигунів : дис. ... док. філос.: 132 Матеріалознавство / С. Л. Чигілейчик. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2025. – 204 с.
20. Молочков, Д.Є. Покращення керованості процесу формування шарів металу при 3D-друці на основі електродугового зварювання / Д. Є. Молочков. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2024. – 230 с.
21. Assessment of the Critical Defect in Additive Manufacturing Components through Machine Learning Algorithms / A. Tridello, A. Ciampaglia, F. Berto, D. S. Paolino // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, iss. 7. – 21 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074294>
22. Remarkable Potential of Cold Spray in Overlay Restoration for Power Plants: Key Challenges, Recent Developments, and Future Prospects / N. Afandi, S. Mahalingam, A. Wei-Yee Tan et al. // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, iss. 12. – 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13122059>
23. Current Implementation Status of Cold Spray Technology: A Short Review / W. Sun, X. Chu, H. Lan, R. Huang // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2022. – Vol. 31. – P. 848–865

24. Champagne, V. K. Cold spray technology for DOD applications / V. K. Champagne, B. Barnett // *ASETS Defense 2012: Workshop on Sustainable Surface Engineering for Aerospace and Defense, San Diego, CA, USA, August 27–30, 2012. – Presentation. – 34 slides.*

References

1. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 92, pp. 112–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., Leary, M., Berto, F., Plessis, A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 2021, vol. 209, 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
3. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 371–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
4. Liu, S., Shin, Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 2019, vol. 164, 23 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
5. Wang, L., Shen, C., Zhang, Y., Li, F., Zhou, W., Zhang, D., Wu, K., Ruan, G., Ding, Y., Li, Y., Li, H., Hua, X. Defects, microstructure and properties in additive manufacturing of TiAl alloys: Formation mechanisms, influencing factors and improvement strategies. *Materials & Design*, 2025, vol. 256, 41 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114235>
6. Bhandari, L., Gaur, V. Defects Associated with Metal Additive Manufacturing and Post-processing Techniques. *Metal Additive Manufacturing: Materials Forming, Machining and Tribology*, 2025, pp. 185–207. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-8162-4_10
7. Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Part 16: Cold Spray. Digital Alloys, January 28, 2020. Available at: <https://www.digitalalloys.com/blog/cold-spray/>
8. Xu, Z. W., Wang, Q., Wang, X. S., Tan, C. H., Guo, M. H., Gao, P. B. High cycle fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting. *Mechanics of Materials*, 2020, vol. 148, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103499>
9. Żaba, K., Balcerzak, M., Palka, P., Čada, R., Trzepieciński, T., Szczepańska, M. Effect of Build-Up Strategy and Selective Laser Melting Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel. *Materials*, 2026, vol. 19, iss. 1, 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma19010026>
10. Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., Fino, P. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163316>
11. Ghasempour-Mouziraji, M., Lagarinhos, J., Afonso, D., Alves de Sousa, R. A review study on metal powder materials and processing parameters in Laser Metal Deposition. *Optics & Laser Technology*, 2024, vol. 170, 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110226>
12. Denkena, B., Krodell, A., Pillkahn, P. Mechanical Finishing of Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Parts. *20th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry 2020 (MIC 2020)*, December 2nd 2020, Hannover, Germany, 2020, pp. 174–180. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3726008>
13. Oliveira, J. P., Gouveia, F. M., Santos, T. G. Micro wire and arc additive manufacturing (μ -WAAM). *Additive Manufacturing Letters*, 2022, vol. 2, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100032>
14. Li, B., Nagaraja, K. M., Zhang, R., Malik, A., Lu, H., Li, W. Integrating robotic wire arc additive manufacturing and machining: hybrid WAAM machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 129, iss. 7–8, pp. 3247–3259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12517-4>
15. Samad, S. N., Griffis, J., Manogharan, G., Kouraytem, N. Multi-material additive manufacturing of metals: A review of structures and mechanical characteristics. *Engineering Science in Additive Manufacturing*, 2025, vol. 1, iss. 2, 46 p. DOI: <https://doi.org/10.36922/ESAM025180010>
16. Chen, Y., Peng, X., Kong, L. B., Dong, G. Defect inspection technologies for additive manufacturing. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, vol. 3, iss. 2, 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abe0d0>
17. Wang, P., Shi, W., Gu, L., Ran, H., Pan, Z., Su, Y., Song, X., Cao, J., Chen, H., Li, W. Exceptional mechanical properties of dual-phase heterogeneous structure in Cf/C and superalloy joints via cold spray additive manufacturing-assisted brazing. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, vol. 244, pp. 46–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.04.031>
18. Daroonparvar, M., Kay, C. M. Corrosion in additively manufactured cold spray metallic deposits. *Tribology of Additively Manufactured Materials. Fundamentals, Modeling, and Applications. Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering*, 2022, pp. 289–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821328-5.00010-X>
19. Chyhileichyk, S. L. *Zabezpechennia mekhanichnykh vlastyvostei obiemnykh vyrobiv iz zharomitsnykh nikelovykh splaviv, otrymanykh adytyvnym mikroplazmovym naplavlenniam dlia vyrobnytstva detalei aviatsiynykh dvyhuniv*. PhD Thesis [Ensuring mechanical properties of bulk products made of heat-resistant nickel alloys obtained by additive microplasma deposition for the production of aircraft engine parts]. Zaporizhzhia, 2025. 204 p.
20. Molochkov, D. Ye. *Pokrashchennia kero- vanosti protsesu formoutvorennia shariv metalu pry 3D-drutsi na osnovi elektroduhovoho zvaryuvannia* [Improvement of the metal layer formation process in 3D printing based on arc welding]. Zaporizhzhia, NU “Zaporizka politekhnika” Publ., 2024. 230 p.
21. Tridello, A., Ciampaglia, A., Berto, F., Paolino, D. S. Assessment of the Critical Defect in Additive Man-

ufacturing Components through Machine Learning Algorithms. *Applied sciences*, 2023, vol. 13, iss. 7. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074294>

22. Afandi, N., Mahalingam, S., Tan, A. W. Y., Manap, A., Yunus, S. M., Sun, W., Zulkipli, A., Chan, X. W., Chong, A. I. X., Om, N. I., Bhowmik, A. Remarkable Potential of Cold Spray in Overlay Restoration for Power Plants: Key Challenges, Recent Developments, and Future Prospects. *Coatings*, 2023, vol. 13, iss. 12. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13122059>

23. Sun, W., Chu, X., Lan, H., Huang, R. Current Implementation Status of Cold Spray Technology: A Short Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, vol. 31, pp. 848–865

24. Champagne, V. K., Barnett, B. Cold spray technology for DOD applications. *ASETS defense 2012: Workshop on sustainable surface engineering for aerospace and defense*, San Diego, CA, Aug 27-30, 2012, 34 p.

Надійшла до редакції 16.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 30.07.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

PROSPECTS OF APPLICATION OF GASDYNAMIC SPRAYING FOR POST-PROCESSING OF PARTS OBTAINED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Oleksii Bondarenko, Oleksandr Shorinov, Vadym Datsenko, Volodymyr Tretiak

The subject of the study is a review of existing additive manufacturing and repair methods for aircraft parts. The relevance of the study is due to the lack of effective technologies for rapid production and repair of aircraft parts. Currently, the introduction of additive technologies in the aerospace industry is driven by the need to reduce structural mass and improve material efficiency. For traditional manufacturing methods, the material utilization factor is 5-10%. At the same time, additive methods can significantly reduce material losses, bringing the material utilization factor to 0.5–0.8 depending on the geometry of the part and the selected technology. However, each of the additive methods has inherent disadvantages in the form of surface and volumetric defects: porosity, residual stresses, anisotropy, microcracks, surface waviness, geometric deviations, non-fusion between layers, metal splashes. Accordingly, there is a need for post-processing of the surfaces of parts. **The purpose** of the work is to investigate the possibility of using cold gas-dynamic spraying for post-processing of parts to repair defects and modify the surface layer. **The scientific novelty** lies in the substantiation of a new approach to post-processing of parts manufactured by additive methods, which is based on the use of kinetic energy of particles in the process of cold gas-dynamic spraying to eliminate typical surface defects of additive manufacturing, the formation of a given set of physical and mechanical properties, and the restoration of a given geometry of the part. **The practical significance** lies in the fact that the results of the study can serve as a basis for developing hybrid technological processes, in which additive manufacturing is responsible for forming complex geometry with minimal mass, and CS is responsible for imparting the necessary physical and mechanical properties. The use of gas-dynamic spraying for post-processing and restoration allows you to minimize defects, as well as avoid the need to re-manufacture parts.

Keywords: additive manufacturing methods; cold gas dynamic spraying; coating; wear resistance; corrosion resistance; restoration of aviation parts, surface treatment.

Бондаренко Олексій Васильович – PhD, ст. викладач кафедри конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шорінов Олександр Володимирович – кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Датенко Вадим Анатолійович – PhD, ст. викладач кафедри теорії авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Третяк Володимир Васильович – кандидат техн. наук, доцент, професор кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksii Bondarenko – PhD, Senior Lecturer at the Aircraft Engine Design Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.v.bondarenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7943-8555.

Oleksandr Shorinov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aviation Engines Manufacturing Technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679.

Vadym Datsenko – PhD, Senior Lecturer at the Aircraft Engine Theory Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.datsenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-0650-562X.

Volodymyr Tretiak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Aviation Engines Manufacturing Technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.tretyak@khai.edu, ORCID: 0000-0003-4493-2689.