

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ СПЛАВУ 1.4859, ВИГОТОВЛЕНОГО ЗА АДИТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ PBF-LB/M, НА ВЛАСТИВОСТІ

Тетяна Миронова, Сергій Буштрук

Анотація. Матеріали, що використовуються в ракетно-космічній техніці для роботи в умовах високих температур та агресивних середовищ, повинні характеризуватися підвищеними антикорозійними властивостями, а також доброю технологічністю. Однією з вагомих переваг адитивної технології лазерного плавлення металевого порошкового шару (PBF-LB/M) є здатність виконувати замкнені тонкостінні конструктивні елементи з товщиною стінок до 0,3 мм, що відповідає параметрам високоефективних теплообмінників або капілярних трубок, виготовлених традиційними методами. Процес PBF-LB/M, який характеризується поступовим надшвидким плавленням і кристалізацією мікрооб'ємів металу, а також повторюваними тепловими коливаннями в субсолідусному діапазоні температур дозволяє отримувати дрібнокристалічні структури з унікальними властивостями. Ці властивості можуть перевищувати показники однакових за хімічним складом матеріалів, отриманих традиційними методами виготовлення, зокрема литтям чи прокатом. Вивченню властивостей виробів, виготовлених за технологією PBF-LB/M з урахуванням структурного фактора присвячено значну кількість наукових робіт. Однак стрімке розширення номенклатури матеріалів для PBF-LB/M технології без їх одночасної кваліфікації і стандартизації призводить до відсутності комплексних даних про властивості, зокрема про міцність та корозійну стійкість, а також їх зміни в процесі подальшої обробки і експлуатації. У даній роботі досліджено структуру, механічні властивості після випробування на одновісний розтяг та стійкість проти міжкристалітної корозії виробів зі сплаву 1.4859 (Fe-32Ni-20Cr-1Nb), виготовлених за адитивною технологією PBF-LB/M. Встановлено, що підвищені показники міцності зумовлені, по-перше, структурними характеристиками матеріалу, зокрема розміром та орієнтацією зерен, станом границь зерен та наявністю виділень надлишкових фаз, по-друге, напрямком (площиною) проведення механічних випробувань, по-третє, наявністю внутрішніх дефектів будови. У стані після друку (за PBF-LB/M технологією) характеристики міцності перевищують вимоги, що пред'являються до литих виробів із цього сплаву, а також до прокату зі сплавів Incoloy 800 та ХН32Т. Дослідження показало, що застосування термічної обробки при 1150°C забезпечує підвищену стійкість проти міжкристалітної корозії.

Ключові слова: ЛАЗЕРНЕ ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛЕВОГО ПОРОШКОВОГО ШАРУ, ЗАЛІЗО-НИКЕЛЕВИЙ СПЛІВ, КВАЗИСТАТИЧНИЙ РОЗТЯГ, АНІЗОТРОПІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ, НЕОДНОРІДНИЙ ЗЛОМ, МІЖКРИСТАЛІТНА КОРОЗІЯ

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF PBF-LB/M ADDITIVELY MANUFACTURED 1.4859 ALLOY ON ITS PROPERTIES

Tatyana Myronova, Sergey Bushtruk

Abstract. Materials used in aerospace for operation under high-temperature and aggressive environmental conditions must exhibit enhanced corrosion resistance as well as good manufacturability. One significant advantage of the laser powder bed fusion of metals (PBF-LB/M) additive technology is the ability to fabricate enclosed thin-walled structural elements with wall thicknesses as low as 0.3 mm, corresponding to the specifications of highly efficient heat exchangers or capillary tubes produced by conventional methods. The PBF-LB/M process, characterized by gradual ultrafast melting and crystallization of metal microvolumes, as well as repeated thermal cycling within the sub-solidus temperature range, enables the formation of fine-grained microstructures with unique properties. These properties may exceed those of chemically identical materials produced by traditional manufacturing technologies such as casting or rolling. A considerable body of scientific work has been devoted to studying the properties of components fabricated by PBF-LB/M, taking into account the structural factor. However, the rapid expansion of the range of materials available for the PBF-LB/M process without concurrent qualification and standardization leads to a lack of comprehensive data on material properties, particularly regarding strength and corrosion resistance, as well as their changes during subsequent processing and operation. This study investigates the microstructure, mechanical properties following uniaxial tensile testing, and resistance to intergranular corrosion of components made of alloy 1.4859 (Fe-32Ni-20Cr-1Nb) produced via the PBF-LB/M additive manufacturing technology. It was established that enhanced strength parameters are attributed, firstly, to the structural characteristics of the material, including grain size and orientation, state of grain boundaries, and the presence of precipitates of secondary phases, secondly, to the direction (plane) of mechanical testing, and thirdly, to the presence of internal structural defects. In the as-built condition (after PBF-LB/M fabrication), the strength characteristics exceed the requirements for cast components made from this alloy, as well as those for rolled products from Incoloy 800 and KhN32T alloys. The study further demonstrated that heat treatment at 1150°C enhances resistance to intergranular corrosion.

Keywords: LASER-BASED POWDER BED FUSION OF METALS, IRON-NICKEL ALLOY, QUASI-STATIC TENSILE LOADING, ANISOTROPIC MATERIAL BEHAVIOR, INHOMOGENEOUS FRACTURE, INTERGRANULAR CORROSION

Information about the authors:

T. Myronova, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro Metallurgical Institute. Prof. ORCID 0000-0003-0105-5479. t.myronova.myh@gmail.com.

S. Bushtruk. Postg. Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro Metallurgical Institute, ORCID 0009-0002-7855-9819. bushtrukserhii@gmail.com.

Вступ

В останнє десятиліття технології адитивного виробництва все ширше застосовуються для виготовлення деталей та ремонту унікального обладнання в різних галузях. Найбільш розвинутою та поширеною адитивною технологією виготовлення виробів з металу є технологія лазерного плавлення металевих порошкового шару — PBF-LB/M [1], яка також раніше мала акронім L-PBF та є узагальненим позначенням різних запатентованих методів виробництва під назвами SLM, DMLS, LMF.

Застосування технології PBF-LB/M має ряд переваг, таких як висока точність відтворення геометрії та можливість виготовлення тонких елементів (до 0,3 мм), і, разом із тим, має ряд особливостей, зокрема відмінний від традиційних матеріалів рівень властивостей, що слід враховувати в залежності від призначення виробів та вимог до надійності.

Вибір металевих матеріалів для друку за технологією PBF-LB/M зазвичай обмежений переліком стандартизованих матеріалів або рекомендованим переліком матеріалів від виробника обладнання. Виготовлення продукції з нестандартного сплаву потребує відпрацювання режиму друку, що фокусується у першу чергу на забезпеченні щільності, а також основних здавальних характеристик матеріалів. До таких характеристик виробники здебільшого включають механічні властивості в стані після друку, або після стандартизованого режиму термічної обробки. За іншими показниками, зокрема корозійною стійкістю, інформація зазвичай не надається, хоча для забезпечення успішної експлуатації деталей у складних умовах таке визначення необхідне [2].

Для безпечної експлуатації виробів ракетно-космічної техніки, що працюють при підвищених температурах та в агресивних середовищах необхідно використання матеріалів з достатнім рівнем жароміцності та корозійної стійкості. Основними критеріями допустимості використання для таких

матеріалів є достатня стійкість до загальної та міжкристалітної корозії, а також до високотемпературної газової корозії. В іншому випадку вироби мають додатково захищатися спеціальними покриттями, що не завжди відповідає задуму конструкції. Наприклад, при виготовленні за технологією PBF-LB/M високоефективних тонкостінних теплообмінників чи інших елементів, що традиційно виготовляються з капілярних трубок нанесення додаткових покриттів може бути нетехнологічним на всій протяжності поверхні та мати негативний вплив, такий як зменшення теплового потоку крізь стінку через багат шаровість чи неконтрольоване зменшення прохідного перерізу каналів. Тому для таких виробів обґрунтованим є використання високолегованих сплавів з достатньою кількістю нікелю і хрому.

Сплав 1.4859 традиційно виготовляється литтям і використовується без додаткової термічної обробки в агрегатах високого тиску та для довготривалої роботи при високих температурах [4, 5]. Прокатними аналогами даного сплаву є залізо-нікелеві сплави XH32T та Incoloy 800, які застосовуються для роботи в інтервалі температур 600-1050°C в атмосферах промислових газів, а також в енергетичній та нафтохімічній галузях, зокрема й у високотемпературних хімічних реакторах. Також сплав-аналог Incoloy 800 розглядався у проєктах NASA, зокрема у якості екрану нагрівальних елементів в перспективній установці на основі двигуна Стірлінга, де важливим критерієм відбору зокрема була корозійна стійкість [3]. Згідно відкритої комерційної інформації, наразі з друкованого сплаву 1.4859 виготовляються деталі двигунів внутрішнього згоряння та елементи газових турбін. Інформації ж щодо успішного використання друкованого за технологією PBF-LB/M сплаву 1.4859 в хімічній галузі або інших застосувань в умовах агресивних середовищ, а також дані по його корозійній стійкості відсутні.

Постановка задачі

Проблема, що вирішується в даному дослідженні — це визначення можливості використання в агресивному середовищі виробів, виготовлених за технологією PBF-LB/M зі сплаву 1.4859. Вона є окремим випадком більш ширшої проблеми в аерокосмічній галузі щодо усунення невизначеності властивостей матеріалів та сертифікації виробів, які виготовляються за новітніми адитивними технологіями [2].

Об'єктом даного дослідження є зразки-свідки та вироби, що були виготовлені за технологією PBF-LB/M. Предметом дослідження є їх структура та властивості, а саме механічні і корозійні властивості.

Зазначимо, що властивості можуть суттєво відрізнятися для однієї марки сплаву, оскільки залежать від ряду факторів, зокрема від застосованого обладнання, режимів друку, властивостей та якості вихідних матеріалів, а також геометрії виробів. Більш детально фактори, що впливають на властивості описані в роботах [2, 6]. В даній роботі інформація щодо особливостей процесу PBF-LB/M не оговорюється.

Метою даного дослідження є перш за все вивчення впливу адитивного способу виготовлення на структуру і властивості сплаву 1.4859, що раніше традиційно застосовувався лише для лиття.

Завданням є дослідження та документування отриманих властивостей через вплив структури, що має дати комплексне уявлення про матеріал.

Матеріал та методика дослідження

Зразки-свідки та вироби були виготовлені на промисловому принтері виробника з партії порошку марки 1.4859, яка була виготовлена на окреме замовлення.

Хімічний склад досліджували за допомогою оптичної емісійної спектроскопії на приладі SPECTROMAXx.

Мікроструктура досліджувалась на оптичному мікроскопі ZeissAximat.

Випробування на квазістатичний розтяг виконувалось на призматичних зразках ASTM E8 [7] на машині FP-100/1.

Слід зазначити, що виробники зазвичай не виконують випробування на різних типах зразків, переважно обираючи циліндричні зразки. В даному дослідженні виконано випробування на розтяг на призматичних зразках, тому що це більш наближено до реальних умов деформації стінки. Також зразки мали зокрема вихідну після друку шорсткість поверхні, оскільки це більш наближено до стану поверхні оболонкових конструкцій з каналами. Враховувався вплив напрямку випробування відносно площини побудови. В роботі зразки позначалися: «V» – зразки вертикально орієнтовані вздовж OZ напрямку (0°); «H» – зразки горизонтально орієнтовані в площині побудови, в напрямках OY і OZ (90°).

Для визначення впливу анізотропії структури на характер руйнування зразків, що випробували на розтяг, проводили фрактографічні дослідження на мікроскопі PEM-106И.

Випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії (МКК) проводили, як на зразках після друку, так і на зразках, які підлягали додатковій термічній обробці. Для адекватного порівняння результатів випробування застосовували методика за якою досліджують властивості сплавів виготовлених традиційними методами. Було застосовано метод А ISO 3651-2 [8], як для сплаву ХН32Т (відповідає методу АМ ГОСТ 6032). Ці випробування проходили після застосування провокуючого нагріву (сенситизації) при 675°C. Також додатково цим методом досліджувались зразки після гомогенізуючої термічної обробки при 1150°C.

Випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії виконувалось також експрес-методом, який полягає в електролітичному травленні в розчині сульфатної кислоти з щільністю струму 0,65 А/см² впродовж 5 хвилин (відповідає методу Б ГОСТ 6032).

Рішення задачі

Хімічний склад надрукованих зразків зі сплаву 1.4859 відповідає діапазону,

визначеному для стандартного варіанту виготовлення литтям (табл. 1).

Основною структурною складовою в рівноважному стані згідно діаграми

фазової рівноваги сплаву з хімічним складом близьким до фактичного (рис. 1) є твердий розчин аустеніту у всьому інтервалі робочих температур [9].

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних зразків* у порівнянні зі стандартом [4]

% мас.	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	N
EN 10213	Осн.	0,05-0,15	0,5-1,5	< 2,0	< 0,040	< 0,030	19,0-21,0	< 0,5	31,0-33,0	0,5-1,5	-
Фактичні	46,28	0,054	0,89	0,065	0,0053	0,0075	20,07	0,012	31,8	0,80	0,018

* – у визначеному сплаві також присутні 0,0068% Al, 0,021 Ti, 0,022% V, 0,0011

За літературними даними [10-12] у сплаві можливе існування надлишкових фаз, що виділяються під час виготовлення виробів та їх експлуатації. Це насамперед карбіди типу MC і $M_{23}C_6$, а також перехідна G-фаза складу $Ni_{16}Nb_6Si_7$. Оскільки, саме формування карбідів хрому $Cr_{23}C_6$ є основною причиною виникнення міжкристалітної корозії в аустенітних сталях і сплавах з високим вмістом хрому, то подальше комплексне дослідження цього явища вкрай необхідне для кваліфікації сплаву, як замітника марок, що виготовлені традиційними способами, зокрема обробкою тиском чи литвом. Окрім визначених в літературі фаз можлива присутність в структурі нітридів та карбонітридів титану і алюмінію, карбідів ванадію і вольфраму, а також інтерметалідних фаз, таких як γ' (Ni_3Ti), хоча їх вміст не значний, оскільки хімічні елементи, що їх утворюють знаходяться в невеликих кількостях у складі сплаву. Попри невелику кількість цих додаткових фаз, їх вплив на властивості в друкованих сплавах поки що не відомий. Також слід зазначити, що кінетика утворення та розподіл виділень надлишкових фаз, зокрема карбідів чи інтерметалідів, в друкованих сплавах за технологією PBF-LB/M може відрізнитися через особливості режимів друку, температурно-часових параметрів впливу лазера. Наявність більшої протяжності границь зерен, суттєвих напружень, як механічних, так і теплових, а отже і підвищеної поверхневої енергії, спонукатиме до збільшення

інтенсивності утворення фаз на границях зерен.

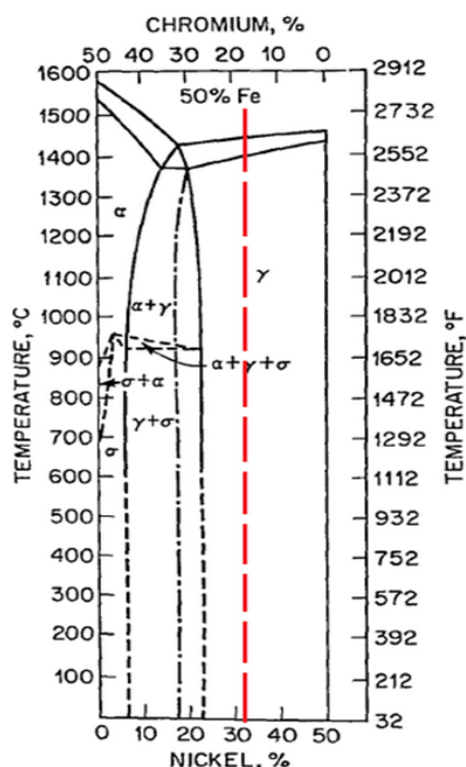


Рисунок 1 – Потрійна діаграма сплаву системи Fe-Ni-Cr в перерізі 50% Fe з лінією концентрації дослідного сплаву, адаптована з джерела [9]

В площині XZ або YZ, структура складається із стовпчастих зерен аустеніту (рис. 2а), що витягнуті в напрямку відводу тепла. При невеликих збільшеннях характерною особливістю є наявність структурних елементів, що нагадують

риб'ячу луску. Розмір окремих зерен перевищує у кілька разів крок друку по вертикалі, який визначається відстанню за висотою між так званими «лусками», що є нижніми границями ванн кристалізації при окремих проходах лазера. В іншому напрямку, в площині ХУ, витягнуті зерна аустеніту формують так звані «комірки» (рис. 2б), де по контуру квадратів зі стороною приблизно 100 мкм (у відповідності до кроку сканування лазером по горизонталі), знаходяться витягнуті зерна, а в середині спостерігаються зерна рівновісної форми (рис. 2г). Розмір цих зерен відрізняється, від наддрібних, переважно в зоні стику трьох ванн (рис. 2б та рис. 2г), до значно більших на інших ділянках (рис. 2в).

Циклічні нагрівання до все нижчих температур в субсольвусному інтервалі, по мірі віддалення фронту пошарового плавлення, викликають спочатку процеси гомогенізації та зростання зерен, а потім процеси виділення надлишкових фаз, наприклад вторинних карбідів, з пересичених загартованих об'ємів металу. Виділення надлишкових фаз здійснюється як по тілу зерен, так і по їх границях. Внутрішньозеренні виділення відображені на мікроструктурах (рис. 2б та рис. 2г) після щавлення у вигляді точкових ямок чи штрихів, областей переважного виділення фаз в об'ємі зерен, що виглядають порізному в залежності від орієнтації, а на границях — у вигляді потовщених контурів.

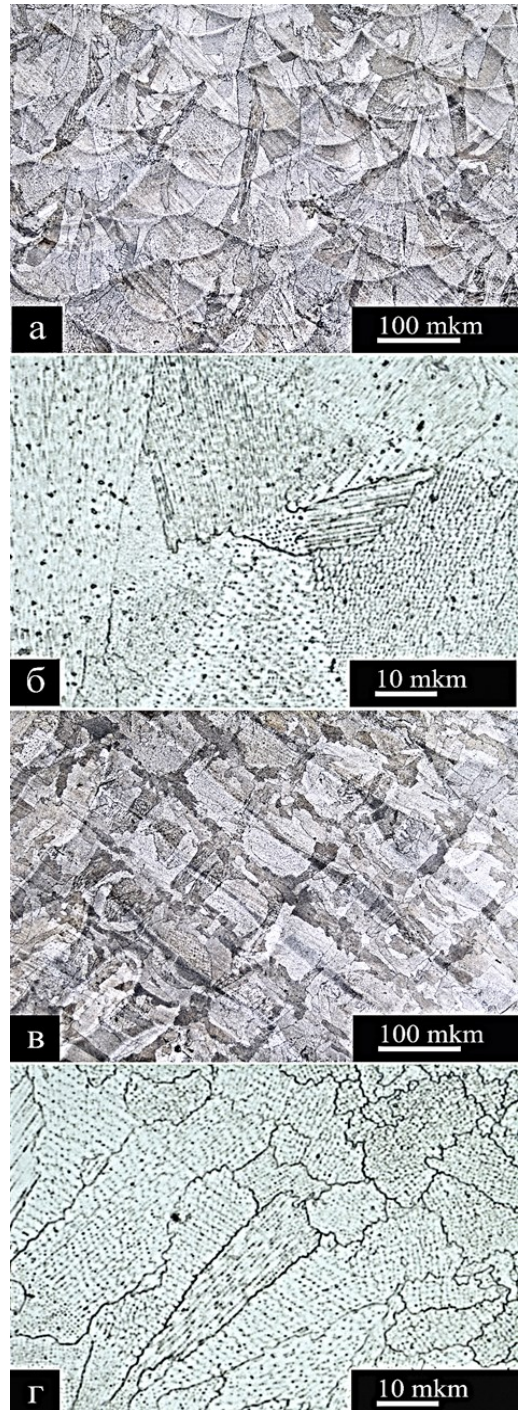


Рисунок 2 – Мікроструктури сплаву 1.4859 в стані після друку за технологією PBF-LB/M
a, б - в вертикальній площині побудови (XZ або YZ), *в, г* - в горизонтальній площині побудови (XY).

За результатами виконаного при 20°C випробування на розтяг на технічних діаграмах в друкованому сплаві 1.4859 спостерігається значна анізотропія за показниками міцності та пластичності, в залежності від орієнтації зразків (рис. 3).

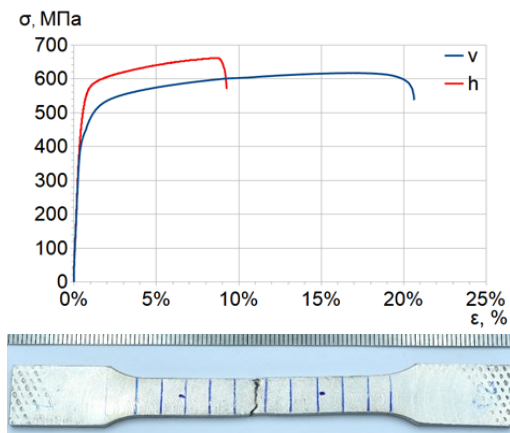


Рисунок 3 – Технічні діаграми розтягу зразків V і H та зразок після випробування

Зазначимо, що на властивості впливають особливості підготовки зразків перед випробуванням. Зразок V, що відповідає куту 0°, має значно вищі показники пластичності за рівномірним видовженням, але нижчі показники міцності. Слід зазначити, що на зразку V механічна обробка зі зняттям дефектного підповерхневого шару, що зазвичай має глибину до 200 мкм і зумовлений процесом сплавленням контуру виробу під час друку, не проводилася, а замість цього виконувалось шліфування для зниження шорсткості на двох з чотирьох поверхонь призматичного зразка. Стан поверхні та підповерхневого шару впливає на процес руйнування та властивості, але підвищена пластичність все ж свідчить про доволі високу анізотропію. Зразок H, що відповідає куту 90°, був механічно оброблений зі зняттям дефектного підповерхневого шару та забезпеченням шорсткості поверхні на рівні Rz20 з усіх сторін призматичного зразка та має значно вищі показники міцності при нижчих значеннях пластичності за рівномірним видовженням.

За результатами розрахунку стандартних контрольних параметрів визначено (табл. 2), що за показниками міцності зразки мають рівень властивостей, які значно перевищують вимоги до ливарного варіанту виготовлення даної марки, а також вимоги до прокатних сплавів XH32T і Incoloy 800. Отримані показники твердості дещо нижчі за довідкові і, так само як показники міцності, мають деяку анізотропію в залежності від площини вимірювання. За характеристикою пластичності, відносним видовженням, друкований сплав, навпаки, поступається, не забезпечуючи встановлених норм для аналогів, у тому числі і рівня властивостей, які декларує виробник.

Вагоме перевищення гарантованих показників механічних властивостей в різних марках сталей і сплавів, де не передбачається зміцнення термічною обробкою, є розповсюдженим явищем для друкованих за технологією PBF-LB/M виробів. Це пояснюється у першу чергу більш значним подрібненням мікроструктури [2, 6], завдяки чому виникає ефекту зміцнення, відкритий Холлом і Петчем, для кожного кристала зі зменшенням його розміру. Зазначимо, що інший процес зміцнення, за рахунок виділення надлишкових фаз в тілі та по границям зерен, не є достатньо вивченим в умовах PBF-LB/M та суттєво відрізняється в залежності від системи легування сплаву.

Таблиця 2 – Механічні властивості

Зразок / стандарт	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ_5 , %	HV
Зразок V	617	430	27	218
Зразок H	661	511	20	226
Дані виробника (довідкові)	670-770	460-560	29-39	≥ 236
1.4859 (лиття)	≥ 440	≥ 180	≥ 25	-
XH32T	≥ 470	≥ 195	≥ 25	-
Incoloy 800	≥ 520	≥ 205	≥ 30	-

Виконане на різних зразках після випробування на розтяг фрактографічне

дослідження свідчить про наявність різної морфології поверхні (рис. 4 і рис. 5).

На зразку V спостерігається більш деформований контур (рис. 4а), що свідчить про вищу пластичність ніж на зразку Н, де ця особливість не дуже виразна (рис. 5а). На зразку V є чіткий контур пор під поверхнею, а також окремі пори та багато розщеплень по всьому перерізу поверхні руйнування (рис. 4б, в). Навпроти, на зразку Н контур приповерхневих пор не спостерігається, але наявні розрізнені кристалізаційні пори та лише поодинокі розщеплення (рис. 5б, г). Слід зазначити, що поверхня руйнування зразка V співпадає із горизонтальною площиною побудови ХУ, мікроструктура в якій наводилась (рис. 2в), а розщеплення являють собою розкриті тріщини, які на деяких ділянках формують квадратні клітинки правильної форми зі стороною приблизно 100 мкм, що відповідає кроку сканування лазером та формуванню витягнутих в площині ХУ кристалів. Попри наявність пор і тріщин, спричинених впливом технології друку PBF-LB/M, зломи слід вважати в'язкими, через наявність ямкового мікрорел'єфу (рис. 4г і рис. 5г) і розвиненої поверхні в розщепленнях (рис. 4д). Руйнування вздовж друкованої структури з квадратних комірок може відбуватись через окрихчення границь зерен. Але цьому суперечить наявність на зразку Н (рис. 5в) ділянки злому, де руйнування проходило крізь декілька шарівсплавленого металу із чітко відокремленими тонкими границями ванн, і в кожному випадку без наявності тріщин саме по границях зерен. Розщеплення можуть бути пов'язані також із в'язким руйнуванням по тілу більших зерен, що отримали інший тепловий імпульс ніж сусідні об'єми металу, що й спричинило їх зростання, а також, можливо, і через одночасне розчинення надлишкових фаз. Хоча останнє припущення не підтверджується наявністю у витягнутих волокнах металу наддрібних (<1 мкм) надлишкових фаз (рис. 5д).

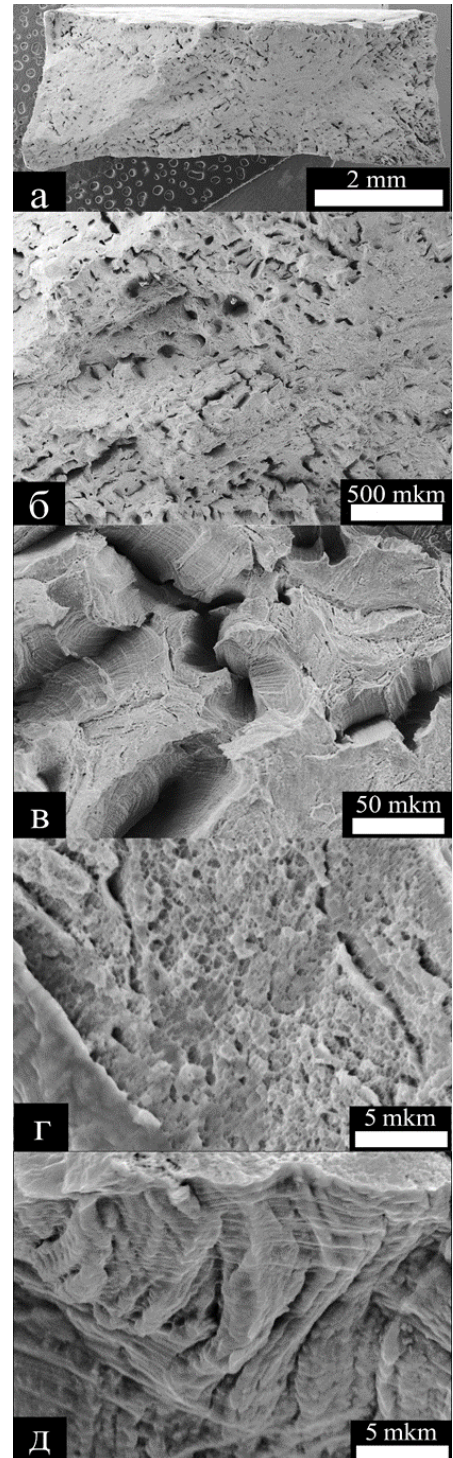


Рисунок 4 – Структури поверхні злому на зразку V після випробування на розтяг

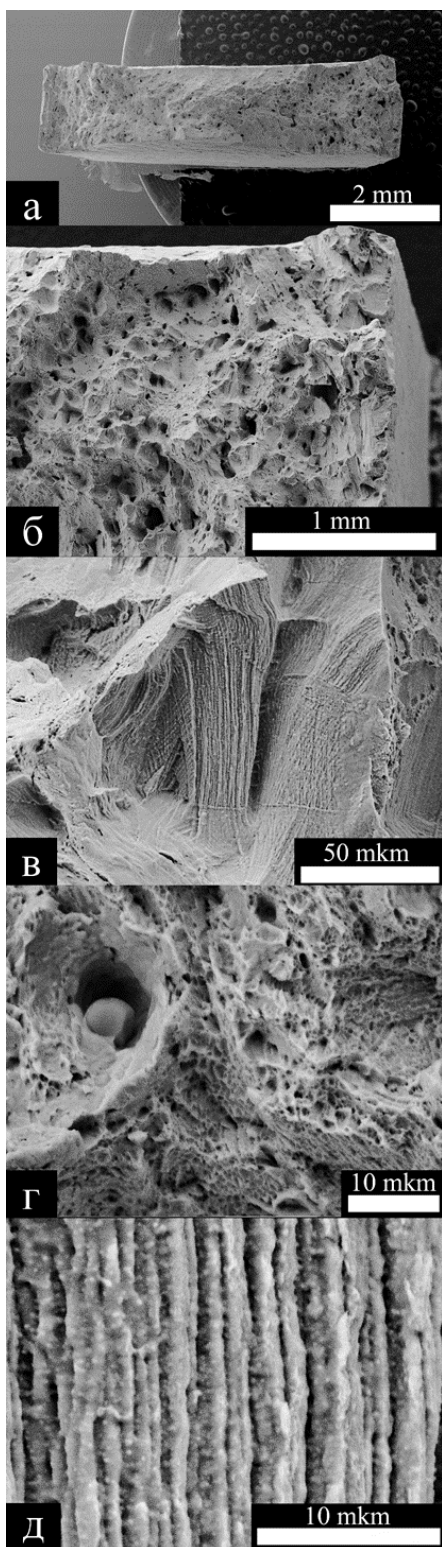


Рисунок 5 – Структури поверхні злому на зразку Н після випробування на розтяг

Підсумовуючи, можна визначити, що за загальною класифікацією зломи обох зразків є неоднорідні по макрогеометрії. По морфології поверхні руйнування зломи слід відносити до волокнистих. За механізмом руйнування вони виникають шляхом злиття мікропустот. За мікрорельєфом зломи в'язкі, а мікробудова зломів складається з ямок.

Таким чином, в умовах роботи в стані квазистатичного розтягу, попри наявність дефектів друку та анізотропію властивостей, цей матеріал без додаткової термічної обробки можна вважати як надійний для експлуатації, в умовах подібних до умов випробування.

Дослідження на стійкість проти міжкристалітної корозії виконувалося в вихідному стані після друку та в трьох інших структурних станах згідно табл. 3.

Таблиця 3 – Структурний стан зразків для контролю стійкості проти МКК

№	Стан	Режим термічної обробки	Твердість
1	Після друку	-	226HV
2	Сенситизація	675°C, 4 год, повітря.	217HV
3	Гартування	1150°C, 1 год, повітря.	175HV
4	Гартування і сенситизація	1150°C, 1 год, повітря і 675°C, 4 год, повітря.	177HV

Випробування за стандартизованим методом для марки ХН32Т у сульфатній кислоті, згідно методу А ISO [8], показало, що зразки, які підлягали термічній обробці гартуванням, мали вищу стійкість

протиміжкристалітної корозії у порівнянні зі зразками після друку, а також в станах де виконувалась сенситизація.

На зразках в стані після сенситизації (група №2), результат випробування на вигин 90° був незадовільним з руйнуванням одного зі зразків, при тому що на іншому зразку з'явилися лише дрібні надриви, хоча до деформації на поверхнях зразків при мікροаналізі не було жодних ознак розтравлення границь зерен (рис. 6).

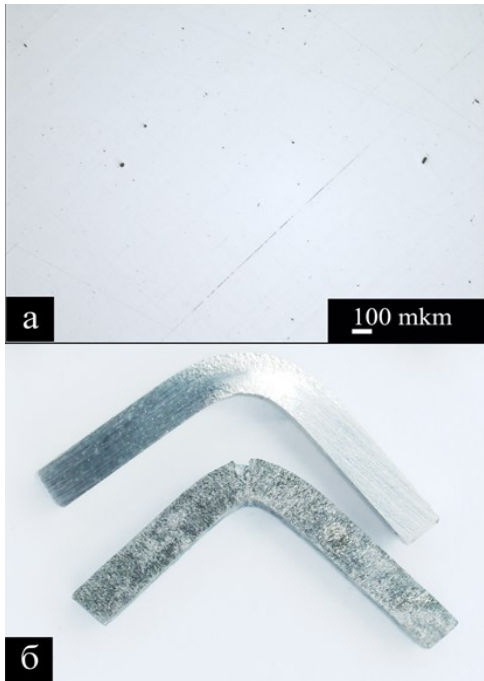


Рисунок 6 – Результати випробування на МКК методом ISO зразків групи №2 (сенситизація)

а - мікроструктура поверхні до випробування на вигин, б - фотографії профілю зразків після випробування на вигин 90°.

Результати випробувань експрес-методом показали, що в усіх станах окрім №3 (гартування) розтравленні ділянки знаходилися переважно на границях витягнутих зерен, сформованих під час друку з кроком 100 мкм. На рис. 7 показані результати випробування на поверхні зразків в площині побудови ХУ. На зразках, що проходили сенситизацію виникла найбільша атака вздовж границь витягнутих зерен, попри проведення гартування.

Стандартизоване для марки ХН32Т випробування на вигин на кут 180° при дослідженні друкованого сплаву 1.4859 показало, що позитивні результати є лише на зразках, що проходили гартування 1150°C (рис. 8), а в інших випадках на окремих зразках спостерігаються надриви або тріщини на поверхні вже при вигині на кут 90°, що пов'язано з низькою пластичністю.

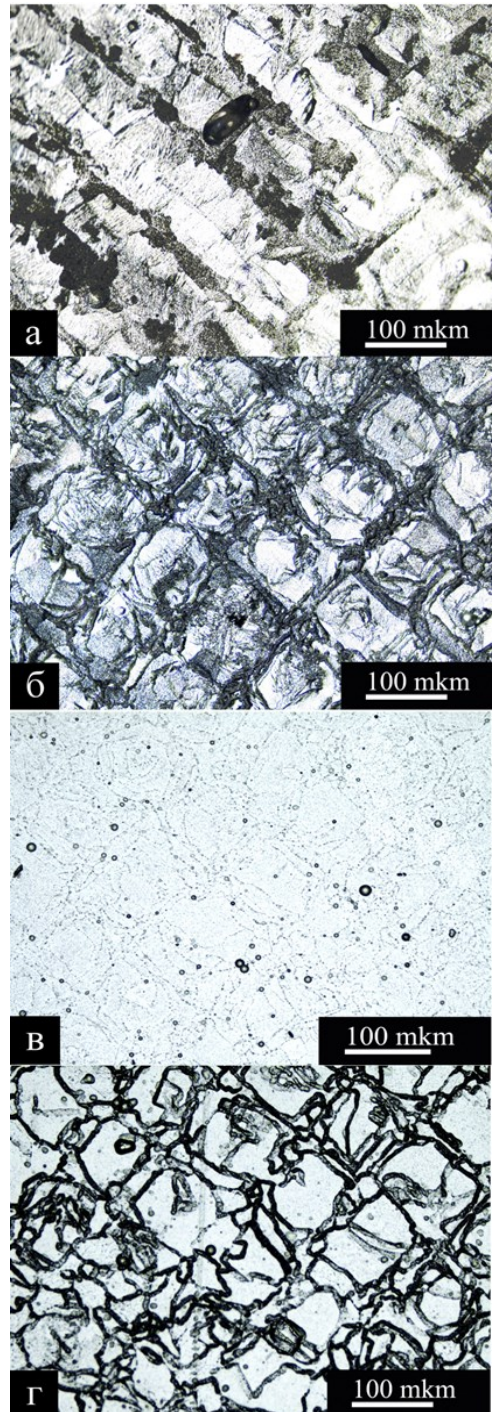


Рисунок 7 – Зразки після випробування на МКК експрес-методом

а - зразок №1 (без термічної обробки), б - зразок №2 (сенситизація), в - зразок №3 (гартування), г - зразок №4 (гартування та сенситизація).

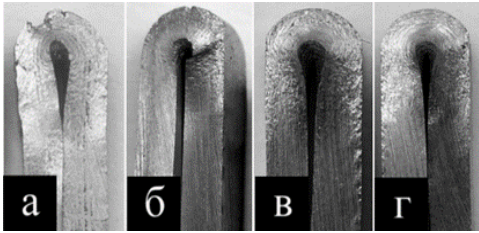


Рисунок 8 – Зразки сталі 1.4859 після випробування на вигин 180°

а - зразок №1 (без термічної обробки), б - зразок №2 (сенситизація), в - зразок №3 (гартування), г - зразок №4 (гартування та сенситизація).

Наукова новизна

Досліджено структуру та комплекс властивостей зразків, виготовлених за технологією PBF-LB/M сплаву 1.4859, зокрема характеристики міцності і пластичності при квазістатичному випробуванні на розтяг, а також корозійні властивості при випробуваннях за різними методиками на стійкість проти міжкристалітної корозії в розчинах сульфатної кислоти. Отримані результати комплексного дослідження є новими, що за результатами літературного пошуку для цієї марки досі не публікувалися.

Висновки

1. Зразки сплаву 1.4859 після друку за технологією PBF-LB/M характеризуються анізотропними властивостями після випробування на розтяг, з більш високими показниками міцності для горизонтальних зразків та більш високими показниками пластичності для вертикальних зразків.

За результатами фрактографічного дослідження поверхонь зломів зразків

2. визначається переважно ямковий рельєф, що свідчить про високу енергію процесу руйнування. Разом із тим, у зломі вертикального зразка спостерігаються періодичні розщеплення правильної квадратної форми з кроком 100 мкм, що відповідає кроку руху лазера в горизонтальній площині побудови за PBF-LB/M процесом, де формуються витягнуті однонаправлені зерна.

3. Проведене різними методами дослідження корозійних властивостей

друкованого за технологією PBF-LB/M сплаву 1.4859 підтвердило чутливість границь зерен до провокуючого нагріву (сенситизації) за результатами випробування на стійкість проти міжкристалітної корозії в розчинах сульфатної кислоти.

4. Термічна обробка (гартування від 1150°C) підвищує корозійну стійкість, а також пластичність, але призводить до зниження міцності сплаву на 25% за показниками твердості.

5. Загальна орієнтація зерен, що були утворені під час друку за технологією PBF-LB/M зберігається навіть після проведення високотемпературної термічної обробки (гартування від 1150°C), що впливатиме на властивості, хоча й в меншій мірі ніж у вихідному стані.

6. Для застосування в агресивних середовищах друкованих за технологією PBF-LB/M виробів зі сплаву 1.4859 рекомендовано виконання гартування для гомогенізації структури, що, призведе до деякого зниження міцності сплаву, але значно підвищить надійність довготривалої роботи.

7. Температурний діапазон використання друкованих за технологією PBF-LB/M виробів зі сплаву 1.4859 в агресивних середовищах має бути уточненим шляхом випробування в умовах, що імітують експлуатаційні. Це необхідно з огляду на підтверджену чутливість до провокуючого нагріву та збереження нетипової структури навіть після високотемпературної термічної обробки.

Бібліографічні посилання

1. ISO/ASTM 52911-1:2019 Additivemanu facturing – Design – Part 1: Laser-based powderbed fusion of metals.
2. B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Sneddenetal., Metaladditiv emanu facturing in aerospace: A review, Materials & Design, Volume 209, 2021, 110008, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
3. NASA-TM-83609 Oxidation and Corrosion Resistance of Candidate Stirling Engine Heater-Head-Tube Alloys, Joseph R. Stephens and Charles A. Barrett, National

Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center, May 1984, Document ID: 19840020893

(<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19840020893/downloads/19840020893.pdf>)

4. EN 10213:2007+A1:2016 Steelcastings for pressure purposes.

5. EN 10295:2002 Heat resistant steel castings.

6. ASM Handbook®, Volume 24 – Additive Manufacturing Processes – Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.

7. ASTM E8/E8M-22 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

8. ISO 3651-2:1998 Determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steels – Part 2: Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (duplex) stainless steels – Corrosion test in media containing sulfuric acid.

9. Handbook Of Stainless Steels, Donald Peckner, I.M. Bernstein. McGraw-Hill, 1977.

10. S. Kargarnejad, V. Abbasi-Chianeha, Failure analysis of a burn ring made of 20Cr32Ni1Nb alloying a turbine combustion chamber / Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2014.07.001>

11. Luis Shigenobu Monobe, Cláudio Geraldo Schön, Microstructural and fractographic investigation of a centrifugal cast 20Cr32Ni + Nb alloy tube in the ‘as cast’ and aged states, Journal of Materials Research and Technology, Volume 2, Issue 2, April–June 2013, Pages 195–201 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.006>

Xiaofeng Guo, Xiankai Jia, Jianming Gong, Luyang Geng, Jianqun Tang, Yong Jiang, Yingying Ni and Xinyu Yang, Effect of long-term aging on microstructural stabilization and mechanical properties of 20Cr32Ni1Nb steel, Materials Science & Engineering A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.057>