УДК 621.3
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-113

Буштрук С.І.,
Український державний університет науки і технологій
ORCID 0009-0002-7855-9819
E-mail:s.i.bushtruk@ust.edu.ua

Миронова Т.М.,
Український державний університет науки і технологій
ORCID 0000-0003-0105-5479
E-mail:t.myronova.myh@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТА ТОНКОЇ СТРУКТУРИ СПЛАВУ 1.4859 ПІСЛЯ ДРУКУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ PBF-LB/M

Анотація. Досліджено причини зниженої пластичності жароміцного сплаву 1.4859, виготовленого методом PBF-LB/M. Рентгенофазовим аналізом виявлено ГЦК фазу ($Fm\bar{3}m$) з періодом 0,3582 нм та слідами фаз, що належать або NbC, або Fe_2O_3. Растрова електронна мікроскопія підтвердила наявність орієнтованої комірково-стовпчастої дислокаційної структури, з розміром комірок 200...800 нм. Визначено, що PBF-LB/M сприяє виділенню дисперсних часток розміром до 100 нм, які підвищують міцність, але спричиняють зниження пластичності.
Ключові слова: лазерне плавлення металевого порошкового шару, залізо-нікелевий сплав, тонка структура, фазовий склад, пластичність.

S. Bushtruk,
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID 0009-0002-7855-9819
E-mail:s.i.bushtruk@ust.edu.ua

T. Myronova,
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID 0000-0003-0105-5479
E-mail:t.myronova.myh@gmail.com

INVESTIGATION OF PHASE COMPOSITION AND THE FINE STRUCTURE OF ALLOY 1.4859 AFTER PBF-LB/M PRINTING

Abstract. The causes of reduced ductility in the heat-resistant 1.4859 alloy produced by the PBF-LB/M method were investigated. X-ray diffraction analysis revealed an FCC ($Fm\bar{3}m$) phase with a lattice parameter of 0,3582 nm along with traces of phases corresponding to either NbC or Fe_2O_3. Scanning electron microscopy confirmed the presence of an oriented cellular-columnar

dislocation structure with a cell size of 200...800 nm. It was determined that PBF-LB/M promotes the precipitation of dispersed particles up to 100 nm in size, which enhance strength but lead to a decrease in ductility.
Keywords: laser-based powder bed fusion of metals, iron-nickel alloy, fine structure, phase composition, ductility.

Жароміцний сплав на основі заліза 1.4859 (X8NiCrAlTi32-21) є економнолегованою маркою зі зниженим вмістом дефіцитного нікелю, що призначений для роботи в умовах без прямого контакту з полум'ям. При навантаженні 50 МПа та температурах до 1000ºС ресурс довготривалої міцності складає 0,4 години, хоча суттєво зростає до 11,6 годин при зниженні навантаження до 35 МПа [1]. В умовах значно меншого навантаження, в газових середовищах збагачених вуглецем, киснем або воднем, ресурс роботи значною мірою визначається хімічними процесами взаємодії з атмосферою та сягає до 300000 годин при температурі до 760 ºС. За характеристиками жароміцності і жаростійкості сплав 1.4859 посідає проміжне положення між аустенітною сталлю 316L та високонікелевим сплавом Haynes 230 [2, 3].

Для експлуатації в реакційно активних газових середовищах критичною є висока вихідна пластичність. Вона має бути на доволі високому рівні для компенсації окрихчування внаслідок таких небажаних процесів, як насичення твердого розчину воднем, старіння з виділенням надлишкових фаз або деградація меж зерен через дифузію активних елементів.

Усі ці фактори впливають на пластичність сплаву як при температурах експлуатації, так і значно значно більшою мірою при знижених температурах, що є особливо важливим для умов циклічного навантаження.

Як повідомлялося раніше [4], рівень пластичності зразків зі сплаву 1.4859, виготовлених за технологією PBF-LB/M, був нижчим, ніж одержують звичайними методами виробництва. До можливих причин зниження пластичності належать такі фактори: форма деформованого об'єкта, дефекти металургійного походження, а також структурний стан.

У даній роботі для визначення структурного стану застосовували рентгенофазовий аналіз (ДРОН-3, випромінювання Kα-Co) та растрову електронну мікроскопію (РЕМ-106И, детектор вторинних електронів).

За результатами рентгенофазового аналізу визначено основну фазу матриці – аустенітну фазу на основі заліза (ґратка ГЦК, просторова група $Fm\bar{3}m$). Фактичний період кристалічної ґратки 0,3582 нм, що дещо менше за стандартний показник 0,360...0,363 нм, та більше за розрахований рівнянням Вегарда на основі фактичного хімічного складу з [4] – 0,342 нм.

Необхідно зазначити, що співвідношення інтенсивностей піків відповідних кристалографічних площин не збігаються з існуючими порошковими еталонами (за базою PCPDFWIN). Це пов'язано з наявністю переважної орієнтації зерен (текстури) та значних внутрішніх напружень. Виявлений ефект потребує подальшого рентгеноструктурного аналізу з детальнішою зйомкою окремих характерних піків.

Міноритарні фази за результатами аналізу не були виявлені в достатній кількості для їх точної ідентифікації застосованим методом. Слід зазначити, що для сполуки NbC були визначені три з чотирьох важливих піків, а орієнтована кількість фази складає ~1 %, проте з доволі великою похибкою. Небажана фаза Fe_2O_3 в кількості ~1 % може бути присутня за умови відсутності NbC. У цьому випадку вона могла утворитися на поверхні внутрішніх дефектів при внутрішньому високотемпературному окисненні під час друку. Раніше про присутність невеликої кількості дефектів повідомлялося в роботі [4] за результатами металографічного дослідження.

При виконанні дослідження на РЕМ-106И встановлено, що зерна і субзерна орієнтовані здебільшого в напрямку друку по висоті. Усередині зерен існує дрібна комірково-стовпчаста дислокаційна структура, подібна визначеній авторами роботи [5] для сплаву схожого хімічного складу в стані після друку, з додатковим підтвердженням цього положення за допомогою ПЕМ. Розмір комірок, виявлених після травлення структури сплаву 1.4859 в реактиві Калінга, складає 0,2...0,8 мкм, тоді як в роботі [5] – 0,4...1 мкм.

У сплаві 1.4859 була виявлена присутність рівномірно розподілених дрібних сфероподібних часток другої фази розміром до 100 нм у міжкомірковому просторі, які раніше також були знайдені при вивченні зломів в роботі [4]. У роботі [5] автори не знайшли присутності карбідних, інтерметалідних чи оксидних фаз.

Визначено причини підвищеної крихкості жароміцного сплаву 1.4859, виготовленого за технологією PBF-LB/M. Встановлено, що попри надвисокі швидкості кристалізації, подальший тепловий вплив під час пошарового плавлення зумовлює виділення дисперсних часток надлишкової фази, що підвищує характеристики міцності, але водночас дещо знижує пластичність.

Бібліографічні посилання

1. TSONEV, V. "TENSILE TESTING OF 1.4859 STEEL AT HIGH TEMPERATURES." Journal of the Balkan Tribological Association 31.4 (2025).
2. MANAURITE 900: Heat Resisting Casting Available to Purchase Producer or Source: Manoir Industries, Manoir Pîtres Alloy Digest (2019) 68 (3): SS-1304.
3. W. G. Kim. D. W. Kim, W. S. Ryu, C. H. Han, J. H. Yoon and J. Chang, Mechanical property and its comparison of superalloys for high temperature gas cooled reactor, KAERI report, KAERI/AR-723/2005 (2005).
4. Myronova, T., & Bushtruk, S. (2025). STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF PBF-LB/M ADDITIVELY MANUFACTURED 1.4859 ALLOY ON ITS PROPERTIES. Journal of Rocket-Space Technology, 34(2), 61-71. https://doi.org/10.15421/452515
5. Yang, Jingfan, et al. "Sensitization, desensitization, and carbide evolution of Alloy 800H made by laser powder bed fusion." Additive Manufacturing 50 (2022): 102547. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102547