

КРИСТАЛОГРАФІЧНІ ТА РОЗМІРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ ЗВАРНИХ ШВІВ МОНОКРИСТАЛІВ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

І.С. Гах, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, А.В. Завдовесв, Ю.В. Олійник

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: gakh@paton.kiev.ua

Розглянуті кристалографічно-орієнтаційні та розмірно-морфологічні особливості мікроструктури зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів в залежності від вихідної кристалографічної орієнтації та її зміни по макрофронті кристалізації зварного шва. З залученням методу EBSD-аналізу (Electron Backscattering Diffraction) та оптичної металографії досліджено особливості структури окремих зон зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів. Встановлена їх залежність від вихідної кристалографічної орієнтації зварного з'єднання та її зміни по макрофронті кристалізації зварювальної ванни. Показано, що поряд з переважним наслідуванням металом шва кристалографічної орієнтації основного металу може мати місце формування зеренної структури різної кристалографічної орієнтації, морфології, розмірів та природи – кристалізаційної та деформаційної. Розглянуто механізми утворення зерен вказаної природи. Границі зерен кристалізаційного типу є місцем стикування блоків дендритів різної кристалографічної орієнтації. Зерна деформаційного типу є результатом релаксації мікронапружень на стадії охолодження зварного з'єднання і формуються на ділянках, в яких напрямок діючих напружень найбільше співпадає з кристалографічною орієнтацією легкого ковзання. Також виявлено, що зерна деформаційного типу можуть виникати як в металі шва, так і в зоні термічного впливу. При однакових температурних умовах виконання зварних з'єднань кількісні та розмірно-орієнтаційні параметри деформаційної структури металу зони термічного впливу корелюють з аналогічними параметрами елементів структури шва. Вказується на можливість отримання зварних швів без тріщин з досконалою монокристалічною структурою. Бібліогр. 18, рис. 8.

Ключові слова: монокристали, жароміцні нікелеві сплави, зварні з'єднання, EBSD-аналіз, кристалографічна орієнтація, параметри структури, природа зерен, зварювальна ванна, макрофронт кристалізації

Робота пов'язана з постійнозростаючими запитами на підвищення тактико-технічних, експлуатаційних, виробничих та екологічних характеристик газотурбінних двигунів (ГТД), енергетичних установок (ГТУ) як військового, так і громадянського призначення [1–3]. Як відомо, зростання термодинамічних характеристик ГТД, ГТУ досягається, головним чином, за рахунок підвищення температури газу на вході в турбіну та зниження металоємності і маси ротору, що потребує створення та використання нових високожароміцних матеріалів [4, 5]. Підвищення жароміцності за рахунок ускладнення легування, застосування сплавів, особливо з монокристалічною структурою, досягло зараз межі, в зв'язку з погіршенням при цьому їх технологічності. Тому більшість конструкторів та виробників ідуть по шляху вдосконалення конструкції турбіни, в т.ч. з застосуванням зварювання [3, 6]. Однак чим вища жароміцність сплавів, тим гірша їх зварюваність, що проявляється у високій схильності жароміцних нікелевих сплавів до тріщиноутворення та руйнування спеціально створеного структурного стану, особливо, монокристалічності, яка забезпечує оптимальне поєднання механічних характеристик у широкому діапазоні температур та навантажень.

Гах І.С. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-4234>, Задерій Б.О. – <https://orcid.org/0000-0001-6695-6986>,

Звягінцева Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6450-4887>, Завдовесв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>,

Олійник Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9293-4315>

© І.С. Гах, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, А.В. Завдовесв, Ю.В. Олійник, 2023

Більша частина публікацій, які стосуються питань зварювання монокристалів жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) розглядають умови виникнення та попередження утворення в швах так званих дефектів монокристалічної ростової структури та тріщин [7–10]. Результати вивчення механічних характеристик та особливостей руйнування зварних з'єднань [11, 12] вказують на необхідність більш детального дослідження структурно-орієнтаційних змін, які мають місце в результаті термодіформіювального впливу при зварюванні. Зокрема, це стосується спектру кристалографічної орієнтації як в цілому, так і окремих складових структури: наявності локальних структур, мікронапружень та деформацій; характеру, морфології, розміру структурних елементів, границь та величини їх розорієнтування – факторів, які визначають механічні та службові характеристики зварних з'єднань.

Метою роботи є визначення впливу вихідної кристалографічної орієнтації зразків на особливості структурних характеристик зварного з'єднання монокристалів ЖНС та її зміни по ширині шва.

Методика досліджень. При дослідженні були обрані промислові жароміцні нікелеві сплави з вмістом інтерметалідної дисперснозміцнюючої

γ' -фази понад 61 %, які широко використовуються в якості конструкційного матеріалу при виготовленні робочих лопаток гарячого тракту авіаційних ГТД.

Виконані нами [8, 9] та іншими авторами [7, 10] дослідження з вивчення кристалографічної орієнтації з'єднання та впливу кривизни макрофронту кристалізації зварювальної ванни на успадкування вихідної кристалографічної орієнтації металом шва та досконалість його структури показали, що для попередження утворення зерен і тріщин необхідно забезпечити обмеження відхилення напрямку проходження температурного градієнту по фронту кристалізації від напрямку $\langle 001 \rangle$. Технологічно це досягається відповідністю площини кромки зварного стику орієнтації високої симетрії $\{100\}$ і формуванням макропластичного фронту кристалізації зварювальної ванни. При аналізі можливих варіантів кристалографічної орієнтації з'єднання зварюваних зразків (площини вихідного металу $\{UVW\}$ і напрямів зварювання $\langle hkl \rangle$), були обрані дві основні кристалографічні комбінації: $\{001\}$, $\langle 100 \rangle$ та $\{110\}$, $\langle 011 \rangle$. Збирання зразків обраних кристалографічних орієнтацій для зварювання виконувалось з точністю до 5° . Дослідні зразки орієнтації $\{110\}$, $\langle 011 \rangle$ в окремих випадках мали відхилення від обраної в межах 10° , що може обумовити при зварюванні різну величину кута відхилення максимального температурного градієнту по фронту кристалізації від напрямку $\langle 001 \rangle$ [8]: до 15° – сприятливі, вище зазначеного рівня – несприятливі умови формування монокристалічної структури. Зразки завтовшки 2 мм для зварювання вирізали електроіскровим методом із монокристалічних відливок, отриманих шляхом високоградієнтної спрямованої кристалізації, з наступним шліфуванням та травленням.

Зварювання виконували електронним променем на режимах, при яких забезпечується стабільне формування наскрізного рівномірного провару та температурно-часові умови формування монокристалічної структури.

В останні роки для оцінки структурних змін моно- та полікристалічних матеріалів внаслідок технологічних та експлуатаційних впливів знаходить успішне застосування метод EBSD-аналізу (Electron Backscattering Diffraction) завдяки автоматизованому поєднанню покорокової оцінки локальних (0,05...1,0 мкм) структурно-деформаційних змін і наступній побудові узагальнених картин [13, 14]. Його використання дозволяє отримати більш широку інформацію в порівнянні з традиційними методами оцінки структури: рентгеноструктурного, дифракції електронів в ПЕМ, нейтронної дифракції, оптичної металографії та ін., які головним чином спрямовані на виявлення

та наступне дослідження основних дефектів ротової структури монокристалів, таких як струменева ліквіація, «паразитні» зерна, поверхневі карбіди та ін. В той же час відомо, що одним із шляхів задоволення високих вимог до механічних та експлуатаційних характеристик ЖНС є оптимізація параметрів їх структури [12–16]. Тому все більшої актуальності набуває більш детальна кількісна та якісна оцінка структури і розробка методів управління формуванням при зварюванні.

Переваги методу EBSD-аналізу особливо проявляються при дослідженнях зварних з'єднань монокристалів, які являють собою композицію із різноструктурних кристалографічно різноорієнтованих ділянок. Його використання дає великий об'єм інформації, необхідної для оцінки еволюції структури з'єднань, важливої як при вирішенні теоретичних, так і прикладних питань формування і управління структурою в процесі зварювання. Однією з важливих переваг EBSD-аналізу є можливість визначення типу та співвідношення елементів структури, механізму її формування. При вивченні монокристалів основним об'єктом досліджень є наявність та характеристики границь зерен – основного фактору, який визначає працездатність конструкцій – їх тип, морфологія, параметри форми та розміри, орієнтування, питома частка кожного типу. Не менш важливим фактором і перевагою методу EBSD-аналізу зварних з'єднань є наочність подання кристалографічної орієнтації як окремих ділянок і елементів структури шляхом кольорового кодування на відповідних картах досліджень, так і в цілому.

Дослідження структурно-кристалографічного стану зварних з'єднань виконувалось на шліфах, виконаних з поверхні зразків, при використанні оптичного мікроскопу Neophot-32 та електро-

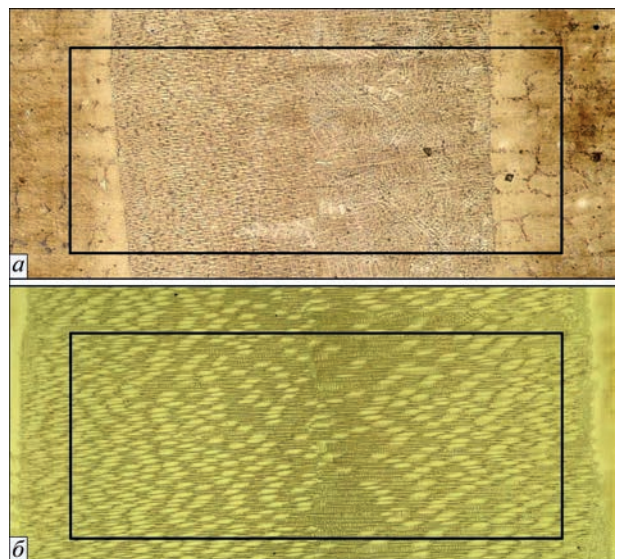


Рис. 1. Структура ($\times 50$) зварного з'єднання ЖНС з поверхнею зразка близькою до (101) (а) та (001) (б) з окресленими ділянками, які досліджувались методом EBSD

ного мікроскопу Verios 460 XHL з приставкою для EBSD-аналізу HKL Nordlys System. Загальна площа сканування електронним променем – 796×2000 мкм, локальність 2×4 мкм. Рис. 1. ілюструє область дослідження на зварних з'єднаннях методом EBSD-аналізу. Розглядалися виявлені в результаті металографічного аналізу характерні [16, 17] ділянки зварних з'єднань монокристалів: основний метал, зона термічного впливу, лінія сплавлення, зона епітаксiального росту та ділянки шва з різним відхиленням кристалографічної орієнтації від вихідної.

В окремих випадках кристалографічна орієнтація структури оцінювалась по фігурах металографічного травлення. Фіксація структури виконувалась з використанням оптичного мікроскопу. Візуалізація структури при цьому здійснювалась шляхом травлення поверхні шліфу.

Підготовка зразків для EBSD-аналізу включала спеціальну технологію «шліфування-полірування» [13, 14], яка дозволяє уникнути нагартування поверхні зразка, що забезпечує високу точність результатів. Акцент при дослідженні робився на зварних з'єднаннях та окремих їх ділянках, для яких виконувались, або ж не були забезпечені умови спрямованої кристалізації монокристалу та формування досконалої монокристалічної структури [7–9, 16, 17]. Розглядалися особливості кристалографічно-орієнтованих та розмірно-морфологічних характеристик окремих характерних зон зварних з'єднань в залежності від виконання зазначених вище умов.

Результати досліджень. Структура основного металу характеризується типовою розвинутою однорідною крупнодендритною будовою [15] з спрямованою кристалографічною орієнтацією (рис. 2, 3), яка відповідає орієнтації зразка в ціло-

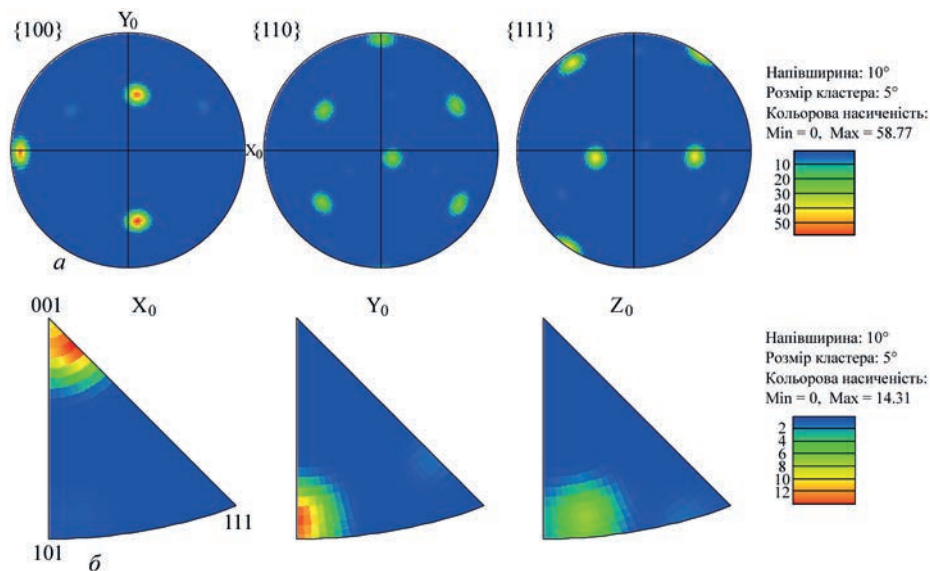


Рис. 2. Прямі (а) та зворотні (б) полюсні фігури основного металу зварного з'єднання монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка близькою до (101)

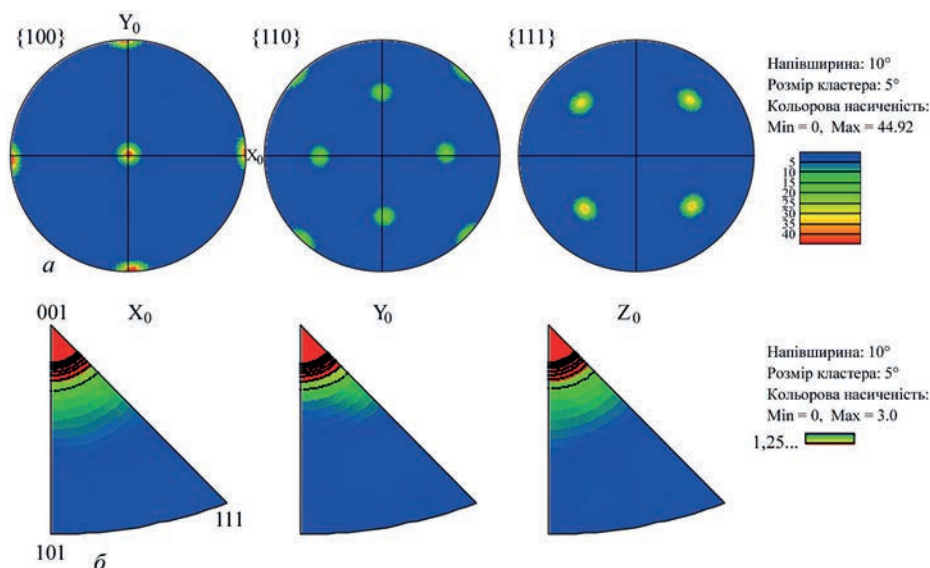


Рис. 3. Прямі (а) та зворотні (б) полюсні фігури основного металу зварного з'єднання монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка (001)

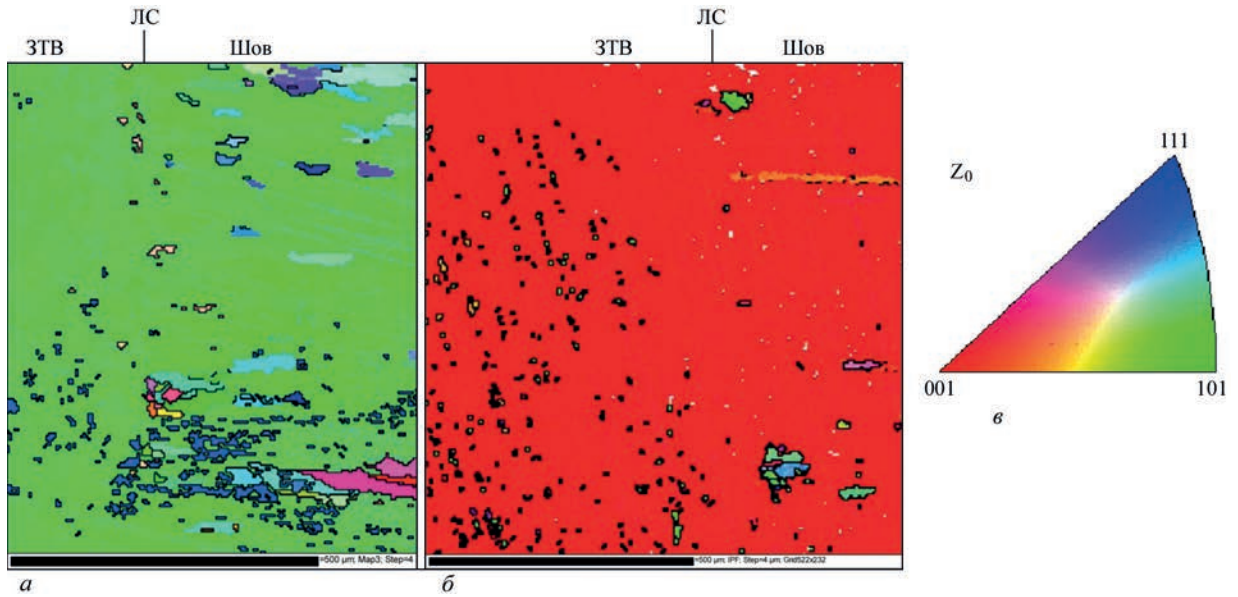


Рис. 4. Карти орієнтувань зони епітаксiального росту та ділянки сплавлення зразків з поверхнею, близької до (101) (а) і (001) (б) ЖНС, при відповідності вихідної кристалографічної орієнтації (КГО) умовам спрямованої кристалізації. КГО-легенда до карти орієнтувань (в). ЗТВ – зона термічного впливу, ЛС – лінія сплавлення

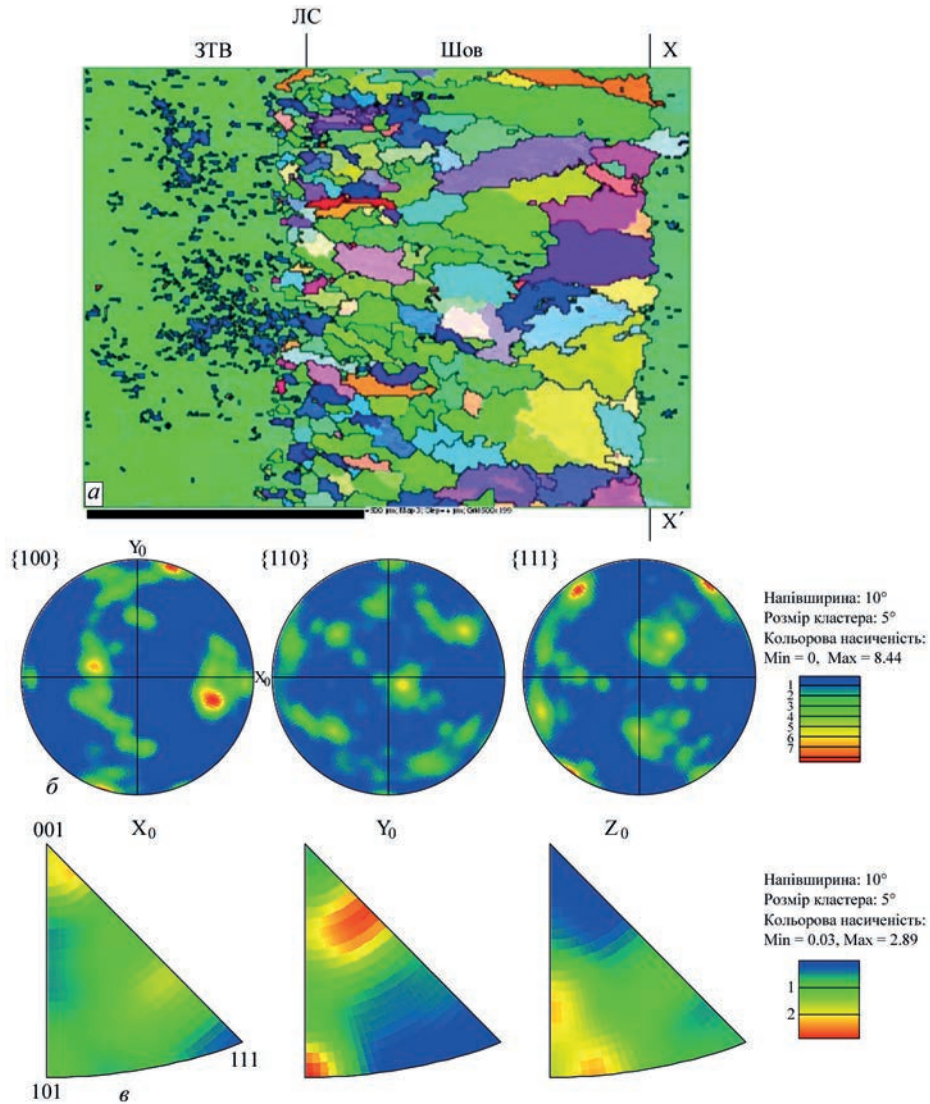


Рис. 5. Карти орієнтувань (а) ділянки зварного з'єднання з поверхнею зразка близькою до (101), прями (б) та зворотні полюсні фігури (в) при невідповідності ділянки шва умовам спрямованої кристалізації. КГО-легенда до карти орієнтувань (див. рис. 4, в). ЗТВ – зона термічного впливу, ЛС – лінія сплавлення, X-X' – вісь шва

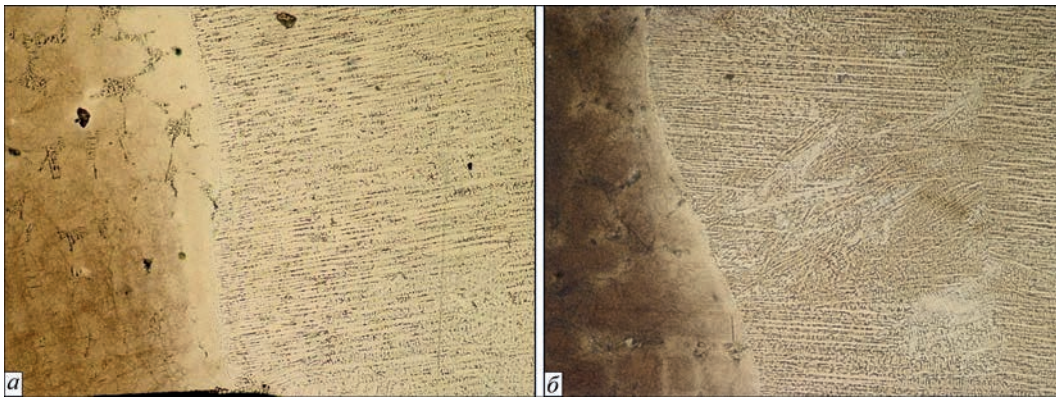


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 100$) ділянки шва ЖНС в районі прямолінійної зони сплавлення (а) та локальної зміни її геометрії (б) му та визначається умовами високоградієнтного вирощування вихідного монокристалу.

Метал зони термічного впливу (ЗТВ) зберігає вихідну кристалографічну орієнтацію. Однак має місце зміна по мірі наближення до лінії сплавлення морфології та розмірів, розподілу основної зміцнюючої складової сплаву γ - γ' -фази, про що детально йшлося у роботі [17]. В мікроструктурі металу ЗТВ зразка з сприятливою кристалографічною орієнтацією спостерігається формування до 10 % розсіяних дрібнодисперсних до 10 мкм зерен орієнтації [111] для вихідної орієнтації [101] (рис. 4, а), та вихідної орієнтації [101] для [001] (рис. 4, б) відповідно, що може свідчити про їх деформаційну природу. Про деформаційну природу виявлених зерен, окрім певної кристалографічної орієнтації, свідчить їх морфологія, розмір та результати комплексного аналізу карт орієнтувань і мікронапружень, а також місце розташування у зварному з'єднанні. Кількість зерен, як і їх орієнтація, корелює зі ступенем відхилення вихідної кристалографічної орієнтації від напрямку високої симетрії. Слід зауважити, що вони не були виявлені металографічним методом.

При невідповідності кристалографічної орієнтації зварного з'єднання високій симетрії (рис. 5) кількість зерен орієнтації [111] в ЗТВ зростає до 20 % при вираженій тенденції до їх концентрації.

Зона лінії сплавлення являє собою перехідну ділянку від ЗТВ до зони епітаксіального росту металу шва. Її структура характеризується наявністю частково оплавлених дендритів та міждендритних проміжків [17]. Частково оплавлені дендрити приймають форму чарунок, зміна кристалографічної орієнтації при цьому малопомітна. При невідповідності кристалографічної орієнтації зварного з'єднання високій симетрії (рис. 5) зона характеризується дрібнозеренною структурою (5...40 мкм) з превалюванням кристалографічної орієнтації, яка відповідає вихідній та орієнтації зерен деформаційного типу.

Зона епітаксіального росту з самого початку досліджень визначалась як ділянка, яка в металографічному уявленні складається з паралельно

розміщених ортогонально ліній сплавлення дрібних дендритів [17]. У випадку кристалографічно симетричного зварного з'єднання структура її вказує на збереження вихідної кристалографічної орієнтації та наявність поодиноких дрібних (5...40 мкм) зерен орієнтації [111] (рис. 4, а) чи [101] (рис. 4, б). При невідповідності кристалографічній орієнтації зварного з'єднання чи ділянки шва високій симетрії (рис. 5, а) зона характеризується дрібнозеренною структурою (40...70 мкм).

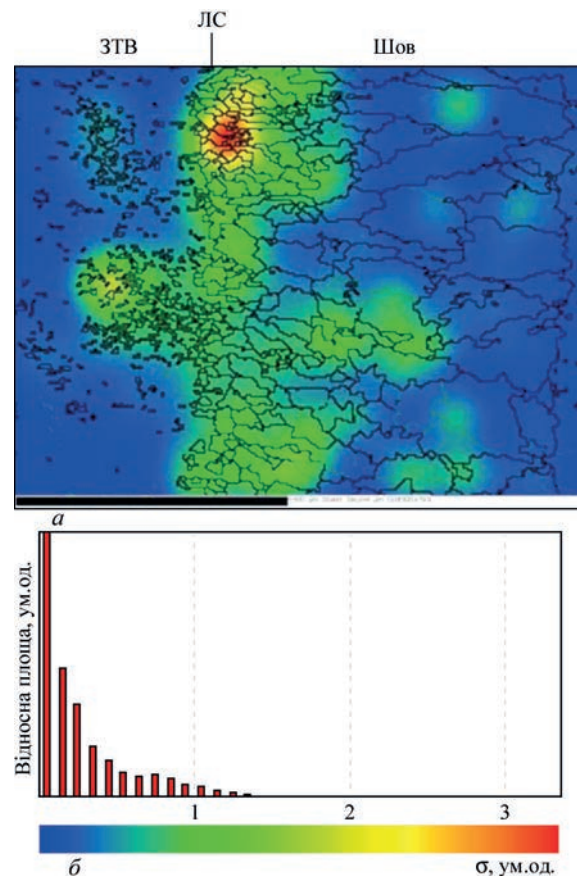


Рис. 7. Карта мікронапружень (а) зони сплавлення зварного шва ЖНС зразка з поверхнею близькою до (101) та частотна гістограма (б) при невідповідності ділянки шва кристалографічним умовам спрямованої кристалізації. ЗТВ – зона термічного впливу, ЛС – лінія сплавлення

В структурі металу шва для зразків із сприятливою кристалографічною орієнтацією, по мірі наближення до осі, можливе деяке збільшення розміру поодиноких зерен (рис. 4, *a, б*) зі збереженням орієнтації основного металу.

Для зразка з невідповідною кристалографічною орієнтацією зварного з'єднання високої симетрії, по мірі наближення до осі як в металографічному, так і в поданні EBSD-аналізу структура зерен набуває крупнозеренного, різномірного (до 300 мкм) переважно орієнтованого ортогонально фронту кристалізації зварювальної ванни. Окрім зростання розміру зерен явно виражене порушення монокристалічності. На прямих полюсних фігурах спостерігається поява нових рефлексів, зміщення та розмиття основних; на зворотніх – зменшення інтенсивності та акцентів рефлексів (рис. 5). Максимальне зростання розміру та дефектності структури, відхилення орієнтації від вихідної спостерігається в районі осі шва (рис. 5), де внаслідок локальної зміни кривизни макрофронту кристалізації зварювальної ванни має місце порушення основної умови спрямованої кристалізації – співвідношення напрямку росту кристалу з орієнтацією [001]. Саме на цій ділянці частіше всього спостерігається утворення гарячих тріщин

та руйнування з'єднання при високотемпературних випробуваннях [7, 10, 11, 16]. Подібна картина спостерігалась також в місцях локальних змін геометрії швів (рис. 6) внаслідок різних технологічних збурень, флуктуацій зварювальної ванни навіть при кристалографічно-симетричному зварному з'єднанні (рис. 4, *a, б*).

Слід зазначити, що навколо формувань поздовжніх кристалізаційних зерен спостерігається утворення високої концентрації дрібнодисперсних зерен деформаційної природи орієнтації [111] для вихідної [101] (рис. 4, *a*).

Скупчення дрібнозернистих зерен різної кристалографічної орієнтації, яке частіше спостерігається в зоні лінії сплавлення, призводить до концентрації мікронапружень (рис. 7), що негативно впливає на працездатність з'єднання в цілому.

Зіставлення результатів EBSD-аналізу та металографічних досліджень [9, 14, 17] свідчить про природу зерен іншої орієнтації, які можуть утворюватись при зварюванні монокристалів ЖНС – кристалізаційну та деформаційну. Границі кристалізаційних зерен виникають в процесі кристалізації металу при стикуванні різної орієнтації блоків дендритів шва, деформацій-

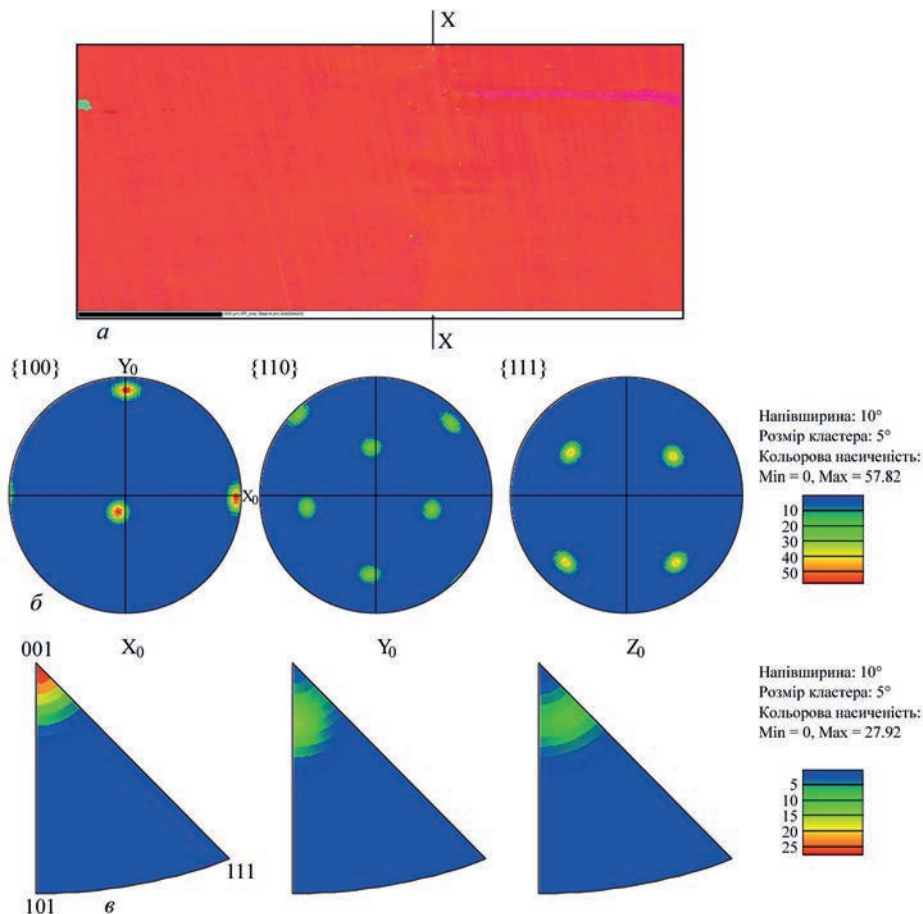


Рис. 8. Карти орієнтувань (*a*) центральної частини зварного шва монокристалічного ЖНС з поверхнею зразка (001), прямі (*б*) та зворотні (*в*) полюсні фігури при відповідності умовам спрямованої кристалізації. КГО-легенда до карти орієнтувань (див. рис. 4, *в*), X-X' – вісь шва

них – в результаті релаксації напружень при його остиганні по механізму, скоріш всього, полігонізації та динамічної рекристалізації. Границі деформаційних зерен можуть проходити як по міждендритним проміжкам, так і по тілу дендриту в залежності від взаємної орієнтації діючих напружень та дендритів. Причому розміри, морфологія та орієнтація деформаційних зерен корегують з відповідними параметрами кристалізаційних зерен та дендритів.

З огляду на різну природу розглянутих зерен, не дивлячись на деяку подібність їх параметрів, технологічні шляхи попередження утворення вказаних зерен будуть різні, однак, геометрія фронту кристалізації зварювальної ванни та кристалографічна орієнтація лінії з'єднання має превалююче значення.

Також слід відзначити, що при однакових температурних умовах виконання зварних з'єднань кількісні та розмірно-орієнтаційні параметри деформаційної структури металу зони термічного впливу мають певну кореляцію з аналогічними параметрами елементів структури шва. Встановлені залежності можуть свідчити про вплив кристалізаційної структури металу шва на характер розподілу деформації, в тому числі і в ЗТВ, на стадії охолодження зварного з'єднання.

Слід наголосити, що при сприятливих вихідних кристалографічних умовах завдяки формуванню відповідної геометрії зварювальної ванни та технологічного забезпечення величини температурно-часових параметрів [8, 16, 18] на фронті твердіння умовам спрямованої кристалізації, можливе отримання зварних швів задовільної досконалості монокристалічної структури (рис. 3, 8).

По результатам виконаних досліджень з застосуванням EBSD-аналізу при вивченні еволюції структури зварних з'єднань монокристалів ЖНС, очевидна необхідність проведення робіт щодо регламентації розмірів, морфології, розорієнтації, кількості та характеру розподілу структурних складових і розширення технологічних методів управління.

Висновки

1. Одним із основних факторів, які визначають особливості формування структури при зварюванні монокристалів ЖНС, є не тільки вихідна кристалографічна орієнтація зварного з'єднання, а і її зміна по фронті твердіння зварювальної ванни.

2. Методами EBSD-аналізу та оптичної мікроскопії показано, що відхилення вихідної кристалографічної орієнтації зварних з'єднань монокристалічних ЖНС завтовшки 2,0 мм більше ніж на 5° та фронту твердіння зварювальної ванни – понад 15° від напрямку переважного росту кри-

сталу $\langle 001 \rangle$ призводить до порушення епітаксіального наслідування вихідної орієнтації металом шва та формування зерен іншої орієнтації.

3. Для отримання регламентної досконалості монокристалічної структури зварних з'єднань необхідно, окрім дотримання основних умов спрямованої кристалізації (температурно-часових, кристалографічно-орієнтаційних) забезпечити обмеження локальних змін геометрії зварювальної ванни, яке визначається конструкцією з'єднання, умовами експлуатації, режимами та схемою зварювання.

4. Невиконання кристалографічно-орієнтаційних та температурно-часових умов формування досконалої монокристалічної структури металу шва призводить до утворення зеренної структури кристалізаційного та деформаційного походження (природи), різної морфології та розмірів. Слідом за вузькою зоною, завширшки 100...150 мкм, дрібно розмірних рівновісних зерен (до 40...70 мкм) біля лінії сплавлення має місце, по мірі наближення до осі шва трансформація структури в спрямовану крупнозеренну (40...300 мкм), що пов'язано зі зміною температурно-часових та кристалографічно-орієнтаційних умов кристалізації по перерізу з'єднання. Спостерігається кореляція параметрів вторинної (кінцевої) та кристалізаційної (первинної) структури. Скупчення дрібно розмірних зерен, особливо в зоні лінії сплавлення, сприяє до концентрації мікронапружень.

5. Показано, що при однакових температурних параметрах виконання зварних з'єднань в ЗТВ має місце формування зерен деформаційного типу. В залежності від орієнтаційних умов: до 10 % – при сприятливих, до 20 % – при несприятливих, що може бути пояснено різною схильністю до локалізації деформації металу.

6. Критичними вважаються наступні елементи структури:

– поперечні витягнуті зерна різної кристалографічної орієнтації в центральній частині шва, границі яких слугують осередком утворення тріщини в процесі зварювання;

– концентрація дрібнодисперсних різноорієнтованих зерен, особливо біля лінії сплавлення, по яких проходить локалізація напружень і деформацій, що підвищує схильність до руйнування при високотемпературних механічних навантаженнях, зниженню працездатності зварної конструкції.

7. Результати проведених досліджень дають більш чітке уявлення про формування структури і її еволюцію в залежності від технологічних факторів процесу зварювання та вказують на можливість створення промислових зварних конструкцій із монокристалів ЖНС.

Список літератури/References

1. Логунов А.В., Буров М.Н., Данилов Д.В. (2016) *Двигатель*, 1, 10.
Logunov, A.V., Burov, M.N., Danilov, D.V. (2016) Development of power and marine engine construction in the world (Review). *Dvigatel*, 1, 10-13 [in Russian].
2. Tsukagoshi, K., Muyama, A., Masada, J. et al. (2007) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, 44(4), 1.
2. Tsukagoshi K., Muyama A., Masada J. et al. (2007) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. *Technical Review*, 44, 4, 1.
3. XF9-1, the World's Best Standards Fighter Engine, Has Been Completed – Japan's Military Technology, Interview with the Developer, *BLOGOS*, Part 1/2 (2019) (in Japanese).
4. Hino, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y. et al. (2000) Superalloys (Eds. T.M. Pollock, R.D. Kissinger, R.R. Bowman, K.A. Green, M. McLean, S. Olson, and J.J. Schirm) (TMS: 2000).
5. Koizumi, Y., Kobayashi, T., Yokokawa, T. et al. (1998) *Cost Conf. Liege*, part 2: 1089.
6. Langston, L.S. (2014) *Global Gas Turbine News*, 9, 76.
7. Park, J.W., Vitec, J.M., Babu, S.S., David, S.A. (2004) Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking single crystal nickel base superalloy welds. *Science and technology of welding and Joining*, 9 (6), 472–482. DOI: 10.1179/136217104252021841
8. Ющенко К.А., Гах И.С. Задерий Б.А. и др. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 46–51.
Yushchenko, K.A., Gakh, I.S., Zaderiy, B.A. et al. (2013) Influence of weld pool geometry on structure of metal of welds on high-temperature nickel alloy single crystals. *The Paton Welding J.*, 5, 45-50.
9. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Карасевская О.П. и др. (2009) О возможности наследования монокристаллической структуры сложнелегированных никелевых сплавов в неравновесных условиях сварки плавлением. *Металлофизика и новейшие технологии*, 31, 4, 473–485.
Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Karasevskaya, O.P. et al. (2009) On possibility of inheritance of single crystal structure of complex nickel alloys in nonequilibrium conditions of fusion welding. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, 31(4), 473–485 [in Russian].
10. Anderson, T.D., Du Pont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni base superalloy CMSX-4. *Welding Journal*, 2, 27–31.
11. Карасевська О.П., Ющенко К.А., Задерий Б.О. та ін. (2021) Деформація та руйнування монокристалів жароміцних нікелевих стопів зі зварними з'єднаннями під час випробувань на розтяг. *Металофізика. Новітні технол.*, 43, 7, 939–957.
Karasevska, O.P., Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.O. et al. (2021) Deformation and fracture of single crystals of high-strength nickel alloys with welded joints during tensile testing. *Metalofizyka. Novitni Tekhnol.*, 43(7), 939–957 [in Ukrainian].
12. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Епшин А.И. (2005) Влияние кристаллографической ориентации на прочностные характеристики монокристаллов никелевого жаропрочного сплава. *Научные труды МАТИ*. Вып. 8 (80). Москва, ИЦМАТИ, с. 22–27.
Golubovsky, E.P., Svetlov, I.L., Epishin, A.I. (2005) Influence of crystal-lattice orientation on strength characteristics of single crystals of high-temperature nickel alloy. *Nauchnye Trudy MATI*, Issue 8 (80). Moscow, ITsMATI, 22-27 [in Russian].
13. Шварц А., Кумар М., Адамс Б. и др. (2004) Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении. Москва, Техносфера.
Shvarts, A., Kumar, M., Adams, B. et al. (2004) Diffraction method of reflected electrons. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
14. Варюхин В.Н., Пашинская Е.Г., Завдовеев А.В. и др. (2014) Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для анализа структуры деформированных материалов. Київ, Наукова думка, 2014.
Varyukhin, V.N., Pashinskaya, E.G., Zavdoveev, A.V. et al. (2014) Possibilities of diffraction method of back scattered electrons for analysis of structure of wrought materials. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
15. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. (1997) Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. Москва, Машиностроение.
Shalin, R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. et al. (1997) *Single crystals of high-temperature nickel alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
16. Гах И.С. (2011) Фізико-технологічні особливості електронно-променевого зварювання високонікелевих жароміцних сплавів з монокристалічною структурою: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ.
Gakh, I.S. (2011) *Physical-technological features of electron beam welding of high-nickel high-strength alloys with single crystal structure*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
17. Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Gakh I.S. et al. (2021) Features of the Microstructure of Welded Joints of Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, 9, 1175–1193.
18. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2016) Формирование структуры металла шва при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 8, 21–28.
Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Gakh I.S. et al. (2016) Formation of weld metal structure in electron beam welding of single crystals of high-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, 8, 15-22.

CRYSTALLOGRAPHIC AND DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURE ELEMENTS IN WELDS OF HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY SINGLE CRYSTALS

I.S. Gakh, B.O. Zaderiy, G.V. Zviagintseva, A.V. Zavdoveyev, Yu.V. Oliinyk

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

E-mail: gakh@paton.kiev.ua

Crystallographic-orientational and dimensional-morphological features of microstructure in welded joints of high-temperature nickel alloy single crystals are considered, depending on the initial crystallographic orientation and its change over the weld solidification macrofront. EBSD analysis and optical metallography methods were used to study the structural features of individual zones of welded joints of high-temperature nickel alloy single crystals. Their dependence on the initial crystallographic orientation of the welded joint and its change over the weld pool solidification macrofront is established. It is shown that alongside the predominant inheritance of base metal crystallographic orientation by the weld metal, formation of a grain structure of different crystallographic orientation, morphology, dimensions and nature, namely solidification and deformation-induced, can be in place. The mechanisms of formation of grains of the specified nature are considered. Boundaries of solidification type grains are the junction of dendrite blocks with different crystallographic orientation. Deformation type grains are the result of relaxation of microstresses at the stage of welded joint cooling, and they form in areas where the direction of acting stresses is the closest to the crystallographic orientation of easy slip. It was also found that deformation type grains can form both in the weld metal, and in the HAZ. At the same temperature conditions of making the welded joints, the quantitative and dimensional-orientational parameters of deformation structure of the HAZ metal correlate with similar parameters of weld structure elements. The possibility to produce welds without cracks with perfect single crystal structure is indicated. 18 Ref., 8 Fig.

Keywords: single crystals, high-temperature nickel alloys, welded joints, EBSD-analysis, crystallographic orientation, structure parameters, grain nature, weld pool, solidification macrofront

Надійшла до редакції 14.06.2023