

# РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА РОЗРИВ

К.А. Ющенко, Б.О. Задерій, І.С. Гах, Г.В. Звягінцева, Т.О. Алексієнко

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

Визначені механічні властивості та досліджені особливості руйнування зварних з'єднань монокристалів жароміцних нікелевих сплавів при випробуванні на розтяг в інтервалі температур близьких до робочих. Встановлено дві характерні температурні області руйнування: 500...800, 800...1200 °С. У першій температурній області руйнування зварних зразків проходить по основному металу, при змішаному характері зламу – крихкий, квазікрихкий та в'язкий. У другій – руйнування проходить по металу шва, злам багатоосередковий, переважно крихкий з наявністю вторинних тріщин. Розглянуті особливості пов'язані в основному зі змінами вихідної структури монокристалу в результаті кристалізації та при охолодженні металу шва, головним чином – це формування багаторівневої субструктури, подрібнення дендритів,  $\gamma$ - та  $\gamma'$ -фаз, евтектичних утворень і карбідів при зменшенні дендритної ліквідації металу шва. Бібліогр. 23, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* монокристал, жароміцні нікелеві сплави, зварне з'єднання, шов, випробування на розрив, температурні області руйнування, особливості руйнування, мікроструктура

**Вступ.** Підвищення ефективності сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) досягається за рахунок підвищення температури газу на вході в турбіну, шов свою чергу, висуває відповідні вимоги до жароміцності матеріалів, з яких виготовляються вузли та деталі гарячого тракту [1–3]. Забезпечення їх за рахунок використання жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) та багатокомпонентного легування, оптимізації структури, в тому числі, монокристалічної практично себе вичерпало. Рішення проблеми за рахунок зміни і оптимізації геометрії окремих деталей часто перетворюється в складну технологічну і економічну проблему. Особливо це помітно при вирощуванні однієї з відповідальних і складнонавантажених деталей ГТД – монокристалічної робочої лопатки з транспіраційним та іншим охолодженням. При цьому, поряд з отриманням досконалої монокристалічної структури певної кристалографічної орієнтації, необхідно забезпечити складну геометрію як зовнішньої поверхні лопатки, так і внутрішніх каналів охолодження певного перерізу і чистоти поверхні [3, 4].

Незважаючи на успіхи технології вирощування монокристалів методом спрямованої кристалізації, все більше вдаються до створення зварних, що складаються з окремих більш технологічних елементів конструкцій [5–10].

Питанням зварювання, як і вирощування монокристалів ЖНС, присвячено достатня кількість публікацій. Однак практично відсутні відомості про механічні властивості та особливості руйнування як зварних з'єднань в цілому, так і окремо зварних швів.

Метою цієї роботи було вивчення властивостей і особливостей руйнування зварних з'єднань монокристалів ЖНС при підвищених температурах з урахуванням необхідності розробки технології зварювання конструкцій.

**Методики досліджень.** В якості вихідного матеріалу для виконання роботи був обраний ЖНС широкого промислового використання ЖС26, хімічний склад сплаву, мас. %: 4,3...5,6 Cr, 4,5...8,0 Al, 0,8...1,2 Ti, 0,8...1,4 Mo, 10,9...12,5 W, 8,0...10,0 Co, 1,4...1,8 Nb, 0,22...0,27 Mn, 0,9...1,1 Fe, 0,8...1,2 V, 0,13...0,18 C. Зварювання зразків товщиною 1,5...2,5 мм, вирізаних з плоских заготовок, отриманих методом спрямованої високоградієнтної кристалізації, здійснювалося електронним променем як найбільш прецизійним і поширеним в авіамоторобудуванні способом. Режимми і кристалографічна орієнтація зразків вибиралися з умови якісного формування швів, збереження вихідної кристалографічної орієнтації (допускалося відхилення не більше 10°), забезпечення досконалості монокристалічної структури (відсутність великокутових границь зерен) металу шва [7, 11–13]. Зразки для зварювання, випробувань, досліджень вирізалися електроіскровим методом з наступним шліфуванням. Перетин і довжина робочої частини розривних зразків становили  $\sim 4 \text{ мм}^2$  і 18 мм відповідно.

Механічні випробування виконували на установці «АЛЛО-ТОО» типу Gleeble в камері з залишковим тиском  $< 10^{-2} \text{ Па}$  при швидкості навантаження  $1,84 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Діапазон температур, при яких проводилися випробування, становив 500...1200 °С, що

Ющенко К.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>, Гах І.С. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-4234>,  
Звягінцева Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6450-4887>, Алексієнко Т.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>  
© К.А. Ющенко, Б.О. Задерій, І.С. Гах, Г.В. Звягінцева, Т.О. Алексієнко, 2022

відповідало середнім експлуатаційним параметрам робочих лопаток ГТД зі сплаву ЖС26. Контроль температури, реєстрація навантаження і подання у графічному вигляді залежностей «навантаження–переміщення» здійснювалося з використанням програмного забезпечення [14].

Випробовувалися зразки двох типів: з поздовжнім і поперечним розташуванням шва по відношенню до напрямку навантаження (рис. 1). Оскільки перетин шва і зразка з його поздовжнім розташуванням (рис. 1, б) збігаються, то їх випро-

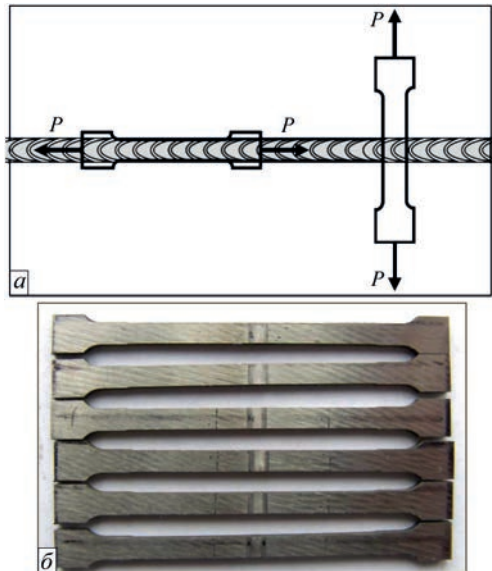


Рис. 1. Схема вирізки розривних зразків із зварних з'єднань монокристалів ЖНС і орієнтація навантаження  $P$  при випробуванні (а) та загальний вигляд розривних зразків (б)

бування дозволяє оцінити вплив структурних змін внаслідок електронно-променевого переплаву та кристалізації при зварюванні монокристалу. Випробування зразків з поперечним розташуванням шва дає уявлення про поведінку під час випробування зварного з'єднання в цілому, що складається з поєднання різних структурних ділянок – основний метал, зона термічного впливу, метал шва.

Кристалографічна орієнтація вихідних зразків, зварних з'єднань і елементів структури оцінювалася із залученням методики рентгенівської дифрактометрії шляхом аналізу розподілу інтенсивності відображення на полюсних фігурах,  $\theta$ -2 $\theta$  рентгенограмах ( $Iq_{\parallel}$ ) і в площині, перпендикулярній дифракційному вектору  $q$ - $Iq_{\perp}$  [15–17]. Структурний стан зварних з'єднань і характер зламів вивчали методами оптичної мікроскопії («МІМ-7», «Неофот-32»), електронної скануючої мікроскопії (Самскан-4, СЕМ-515 PHILIPS), розподіл хімічних елементів в окремих складових зламу та структури – за допомогою аналізу ЕДХ на мікроскопі JEOL с приставкою JNCO.

**Результати та обговорення.** *Структура зварних з'єднань.* Зварюваний сплав (основний метал) у вихідному стані характеризується розвинутою комірково-дендритною структурою, що включає дрібнодисперсну зміцнюючу  $\gamma'$ -фазу ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ), рівномірно розподілену у  $\gamma$ -твердому розчині нікелевої матриці (рис. 2, а) з окремими включеннями  $\gamma$ - $\gamma'$  евтектичних утворень і виділень карбідів складного складу та топографії. Евтектичні утворення та карбіди переважно розташовуються

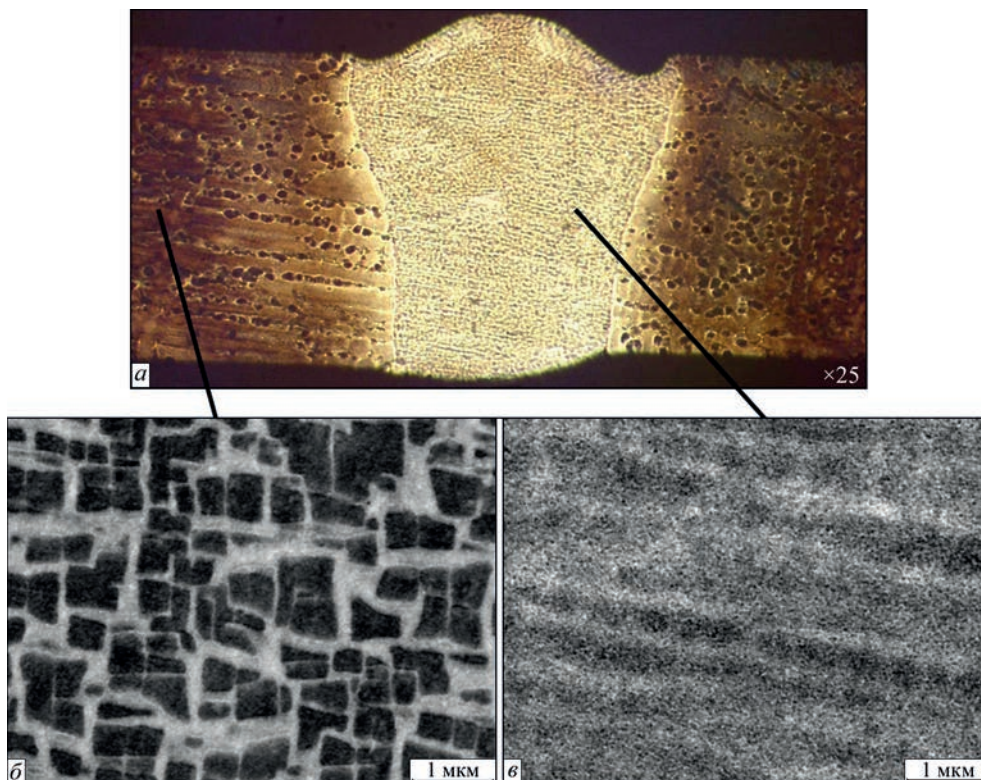


Рис. 2. Макроструктура зварного з'єднання (а), мікроструктура ( $\gamma/\gamma'$ ) вихідного металу (б) і шва (в) монокристалу ЖНС

в міждендритних, міжфазних проміжках. Вміст  $\gamma'$ -фази в сплаві становить ~61 %.

Структура зварного з'єднання відрізняється від структури основного металу помітно меншими розмірами структурних складових. Так, якщо міждендритна відстань ( $\lambda$ ) основного металу становить 200...300 мкм, то в шві вона зменшується до 30...50 мкм у вісі шва і до 3...12 мкм у лінії сплавлення (рис. 2, б). Розмір частинок  $\gamma'$ -фази ( $d_{\gamma'}$ ) у вихідному металі – 0,3...0,6 мкм, в зварному шві на порядок менше – 0,04...0,08 мкм, в зоні термічного впливу – 0,3...0,02 мкм. У зв'язку зі зменшенням розмірів структурних складових помітно знижується хімічна неоднорідність металу шва (таблиця).

Обрані режими та схема зварювання дозволили обмежити відхилення кристалографічної орієнтації зварного з'єднання від вихідної величиною не більше 7° (рис. 3). Розорієнтація структури металу шва в результаті впливу термодформаційного циклу зварювання більш наочно оцінюється за розподілом  $Iq_{\perp}$  (рис. 3). Розподіл  $Iq_{\perp}$  і його фрагментація згідно [15–19] відповідає формуванню субструктури з багаторівневою спрямованою розорієнтацією металу, що не перевищує 2° дислокаційними межами. Формування багаторівневої структури дозволяє зробити висновок про існування залишкових напружень в зварному шві. Встановлене зміщення піку розподілу  $Iq_{\parallel}$  на « $\theta$ -2 $\theta$ » рентгенограмах (рис. 4)\* в сторону мен-

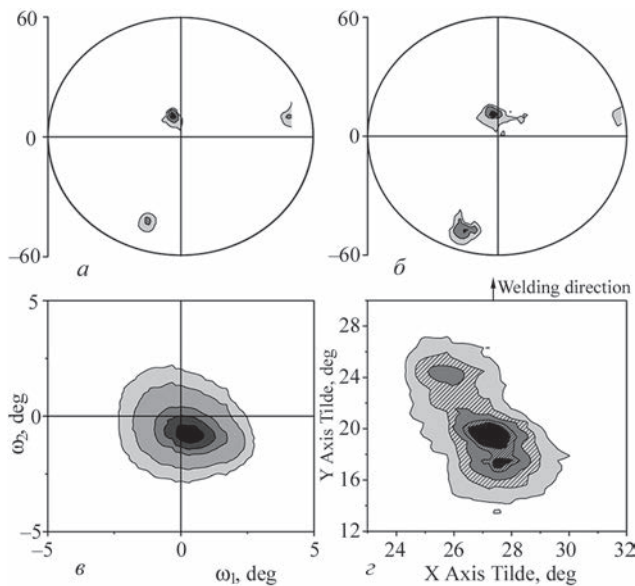


Рис. 3. Полюсні фігури {220} (а, б) і типовий 2D розподіл  $Iq_{\perp}$  {220} відображень (в, г) у вихідному ростовому ЖНС монокристалі (а, в) і в зварному шві (б, г). x, y – кутові приладові координати;  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – кутові координати зворотного простору

Дендритна ліквіація  $k_d = C_d / C_{m,d}$  основних хімічних компонентів вихідного сплаву ЖС26 та металу шва ( $k_d$  – коефіцієнт ліквіації,  $C_d$  – концентрація у вісі дендриту,  $C_{m,d}$  – концентрація у міждендритному просторі)

Ділянка	Al	Ti	V	Cr	Co	Nb	Mo	W
Вихідний метал	0,7	0,55	1,28	1,98	1,2	0,6	1,6	1,89
Метал шва	0,94	0,7	1,2	1,04	1,02	0,9	1,08	1,24

\* В роботі приймала участь О.П. Карасевська (Інститут металофізики ім. Курдюмова НАНУ)

шого кута відображення 2 $\theta$  вказує на наявність напруг, що розтягують поздовж шва [15–17]. Виконаний з використанням закону Гука та урахуванням зміщення піку  $Iq_{\parallel}$  розрахунок показав, що для зварних швів орієнтації (110) вони можуть досягати 397 МПа, а для (111) – 520 МПа.

Особливості руйнування зразків з поперечним розташуванням швів (зварних з'єднань). В узагальненому вигляді результати випробувань зварних зразків на розрив представлені на рис. 5 у вигляді залежності  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  від температури. Умовно їх можна розділити на дві області. Перша область – температура випробування  $T_{\text{випр.}} \leq 800$  °С – характеризується меншою залежністю  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  від температури, більш помітним впливом кристалографічної орієнтації і руйнуванням зразка по основному металу. У другій області –  $T_{\text{випр.}} > 800$  °С – спостерігається інтенсивне зниження значень  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$ , нівелювання впливу вихідної кристалографічної орієнтації, руйнування зразка відбувається по зварному шву.

Зазначені особливості руйнування зварних з'єднань можуть бути пояснені, виходячи з наступного. Зварні з'єднання представляють собою композит, що складається з ділянок з різною структурою – основний метал, зона термічного впливу, шов. Метал шва завдяки більш ніж на порядок високій дисперсності структурних складових відповідно до закону Холла-Петча [19–21] знаходиться в більш зміцненому стані. Зміцнення також пов'язано зі спостережуваним збільшенням в металі шва щільності незакріплених хаотичних дислокацій (див. рис. 4).

При підвищенні температури випробування до 800 °С і більше руйнування переміщується в зону

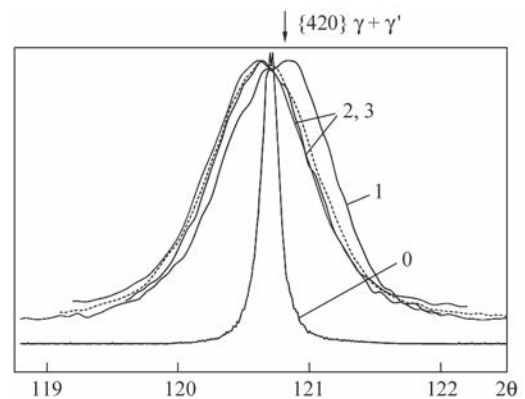


Рис. 4. « $\theta$ -2 $\theta$ » розподіл  $Iq_{\parallel}$  відображень {420} у еталоні (0), у вихідному (1) і по вісі зварного шва (2, 3) металу монокристалічного ЖС26



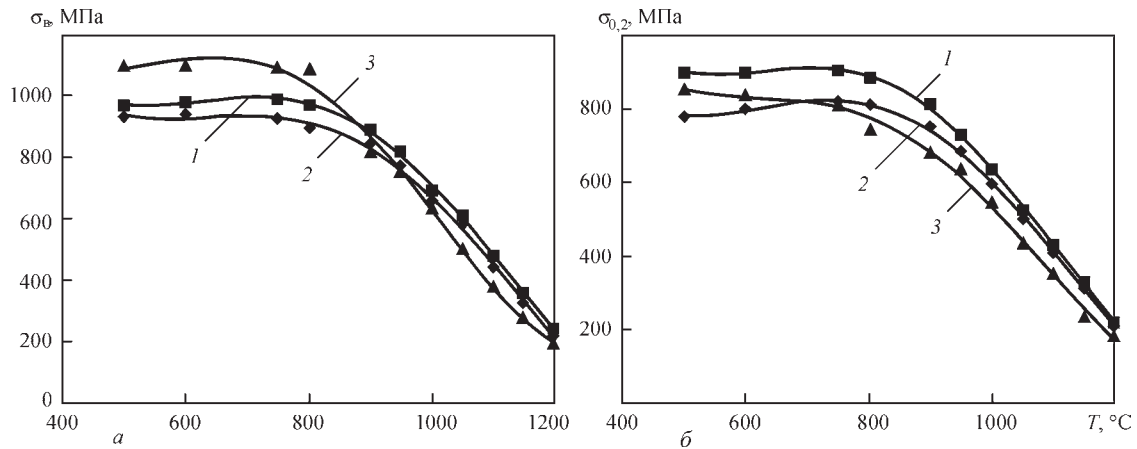


Рис. 5. Залежність межі міцності  $\sigma_B$  (а) і плинності  $\sigma_{0,2}$  (б) від температури випробування зварних зразків монокристалів сплаву ЖС26 при поперечному (1, 2) та поздовжньому (3) розміщенні швів. Орієнтація навантаження:  $\sim\langle 100 \rangle$  (1, 3) та  $\sim\langle 110 \rangle$  (2)

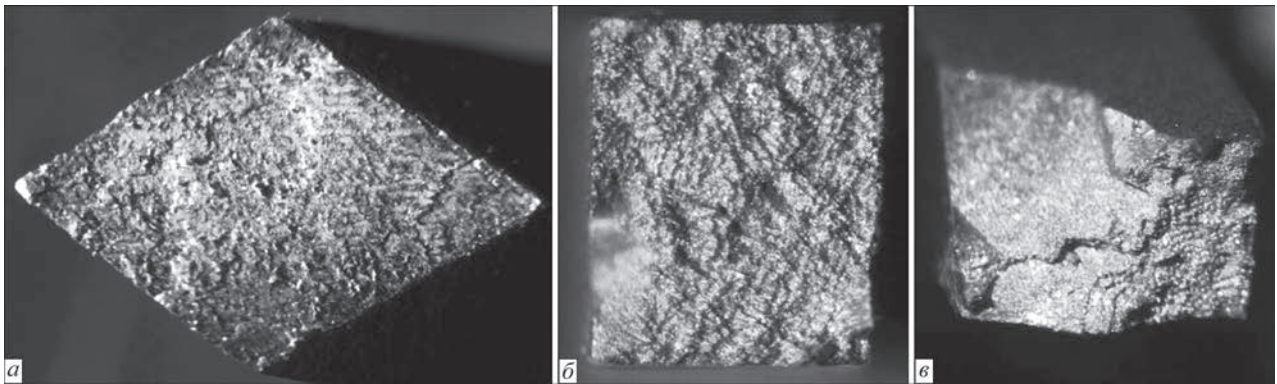


Рис. 6. Зовнішній вигляд зламів зварного з'єднання монокристала сплаву ЖС26 орієнтації близької до  $[011]$ , після випробувань на одновісне розтягування при температурі: а – 600 °С; б – 1050; в – 900

термічного впливу та шов, внаслідок зменшення зміцнюючого ефекту дрібнодисперсної структури, а також внаслідок підвищення рухливості дефектів [21, 22] на малокутових межах металу шва.

Злами зразків, випробуваних при помірних ( $\leq 600$  °С) температурах характеризуються квазіскольною топографією в поєднанні з наявністю ділянок дрібночарункового відриву зі слабопомітною видовженістю (рис. 6, 7). При підвищенні температури випробування до 800 °С злами набувають змішаного характеру руйнування – поєднання крихкого (30...35 %), квазікрихкого (20...25 %) і в'язкого (45...50 %). Відповідно мікрорельєф поверхні руйнування представлений майданчиками малопластичного зсуву і фасетками квазісколу розміром 50...60 мкм, сходинок 1...20×20...100 мкм з крихким смуговим видом, неглибоких дисперсних ямок (0,5...1,5 мкм) в'язкого руйнування (рис. 7). По мірі наближення до температури 800 °С частка в'язкого руйнування зростає до 50...60 %, злам набуває ямочно-в'язкого характеру, елементи крихкого руйнування поступово замінюються рельєфними ямками, облямованими гребенями відриву. Дослідження бічних поверхонь зразків, зруйнованих в цьому температурному інтервалі (рис. 8), виявили наявність смуг ковзання, рельєфних зсувних ділянок і мікротріщин, що проходять під невеликим

кутом до площини зламу, що ілюструє зсувний характер руйнування по найбільш навантаженим системам ковзання [18, 19, 23].

Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 900...1200 °С проходить по шву, відрізняється багатоосередковістю (рис. 9). Злами представлені такими елементами: скольні – розміром  $\sim 10$ ...20 мкм і квазіскольні  $\sim 8$ ...15 мкм

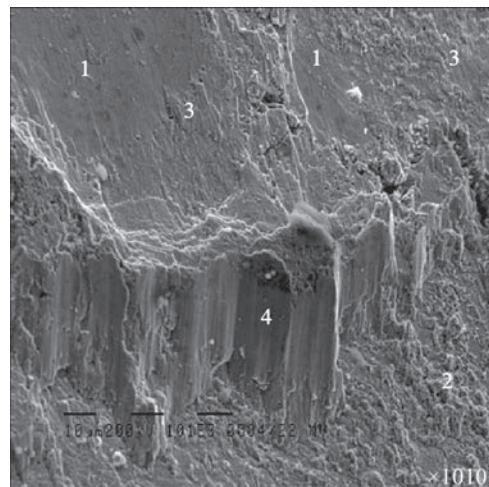


Рис. 7. Фрагмент поверхні руйнування зварного з'єднання. Температура випробування 600 °С (1 – сходинки з крихким смуговим рельєфом; 2 – дисперсні ямки в'язкого руйнування; 3 – фасетки зрушення, ділянки квазікрихкого руйнування; 4 – полосовий рельєф, крихкий характер руйнування, ширина смуг  $\Delta_n = 10$ ...20 мкм)

Ступінчастий рельєф поверхні руйнування (1)

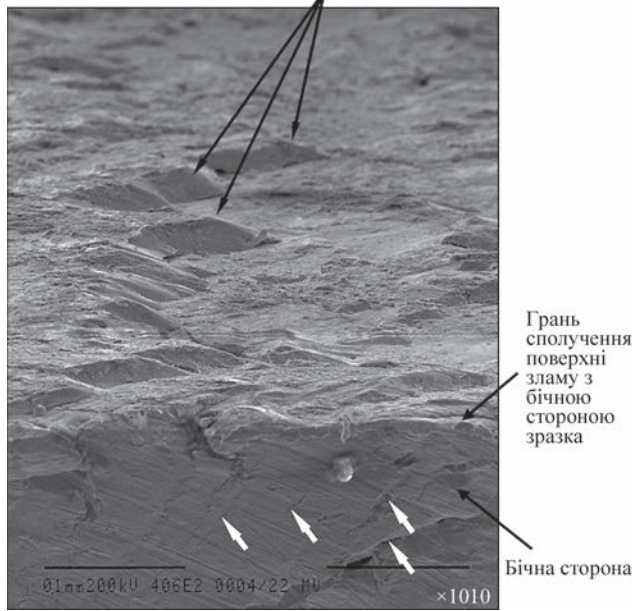


Рис. 8. Сполучення бічної сторони зламу і поверхні руйнування. Світлими стрілками позначені мікротріщини на бічній стороні зразка, утворені за механізмом пластичного зрушення по площинам легкого ковзання  $\{111\} \langle 110 \rangle$ . Температура випробування 600 °C (1 – сходинок з крихким смуговим рельєфом)

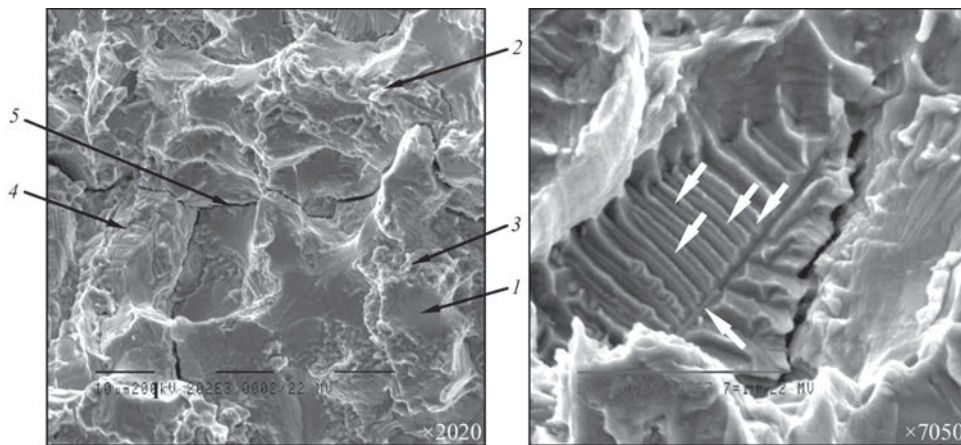
фасетки, фазові виділення карбідного типу (0,3...0,4×3,0...7,0 мкм) на фасетках відколу, вторинні мікротріщини (20...100 мкм), грубі розшарування (100...350 мкм). Окремі локальні ділянки в'язкої складової (5...7 %) дозволяють судити про

те, що руйнування відбувається з деякою часткою пластичної деформації. Загальний характер руйнування – крихкий (~90...93 %).

*Особливості руйнування зразків з поздовжнім розташуванням швів.* Руйнування зварних швів при випробуванні з поздовжнім навантаженням в температурному інтервалі 500...600 °C має в'язкий характер з розміром ямок на зламі ~2...9 мкм (рис. 10). При збільшенні температури випробування до 800 °C характер руйнування змінюється на змішаний, в зламі поряд з ямками спостерігаються ділянки квазікрихкого руйнування розміром ~3,0...9,5 мкм. При подальшому підвищенні температури до 1200 °C змішане руйнування характеризується збільшенням частки квазікрихкої складової, спостерігаються вторинні тріщини (рис. 10), розмір елементів руйнування на поверхні зламу становить 3,5...10,0 мкм (1050 °C) і 4,5...10,5 мкм (1200 °C), злами успадковують дендритну морфологію мікроструктури зварного шва, структурних дефектів формування, що виникли при кристалізації.

Певна різниця морфології зламів, як і властивостей швів, випробуваних в поздовжньому і поперечному напрямку, пов'язане швидше за все, з різною орієнтацією дендритної структури металу шва по відношенню до напрямку прикладеного навантаження.

Звертає на себе увагу складність і багатоплановість зламів, неоднорідність рельєфу, що відображає різнохарактерність структури і кристалографічної орієнтації окремих ділянок зварних з'єднань.



Елементи	1 Крихке	2 Квазікрихке	3 В'язке	4 ФВ
Al	2,64	2,86	1,92	3,01
Ti	1,66	1,22	1,58	3,77
V	0,35	0,34	0,41	0,45
Cr	4,45	5,63	5,75	4,7
Co	9,31	9,47	9,61	6,92
Ni	69,86	62,72	68,58	50,75
Nb	1,47	1,78	1,75	12,05
Mo	1,67	2,66	2,06	5,3
W	8,6	13,32	8,35	13,05

Рис. 9. Фрагменти поверхні руйнування різних ділянок металу шва при випробуванні зварного з'єднання на однісіне розтягування та вміст хімічних елементів в зламі (мас. %). Температура випробування 1050 °C. Орієнтація зварного з'єднання [100]. 1 – крихке руйнування: розмір фасеток сколу  $d_f = 10...20$  мкм; 2 – квазікрихке руйнування; 3 – локальні ділянки в'язкого руйнування: дисперсні ямки розміром  $d_y = 1...2$  мкм; 4 – фазові виділення (ФВ); 5 – вторинні тріщини  $l_{тр} \sim 20...100$  мкм (світлі стрілки – ФВ)



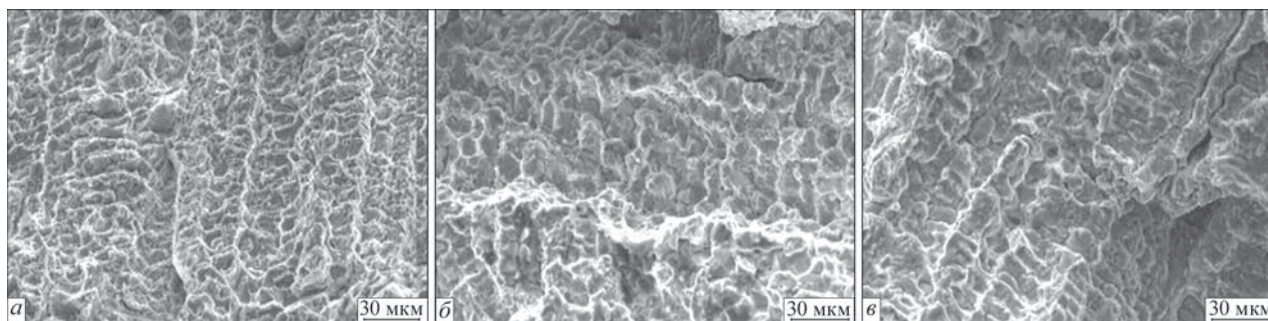


Рис. 10. Фрагменти поверхні руйнування зварного шва монокристалу сплаву ЖС26. Випробування на однісіне розтягування в поздовжньому напрямі при температурах: 600 °С (а), 1050 (б), 1200 (в)

Виходячи з аналізу результатів наведених вище досліджень, особливостей руйнування, механічних властивостей та структури, можна зробити висновок, що встановлена різниця у властивостях і характері деформації та руйнуванні зварних з'єднань монокристалів ЖС26 у високо- та низькотемпературній області в значній мірі визначається характером структурних змін, які відбуваються в результаті зварювання.

### Висновки

1. При оцінці особливостей руйнування і властивостей зварних з'єднань нікелевих сплавів слід розглядати їх як композит, що складається з ділянок з різною структурою.

2. В результаті випробування зварних з'єднань на однісісовий розтяг в температурному інтервалі 500...1200 °С встановлені дві області руйнування: 500...800 °С – по основному металу та 800...1200 °С – по металу шва.

2. Характер і вид руйнування, властивості зварних з'єднань монокристалів ЖНС, що представляють композицію структурних ділянок, визначаються крім вихідної кристалографічної орієнтації, особливостями структури цих ділянок.

3. Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 500...800 °С, зважаючи на більшу міцність шва, які відрізняються більш високою дисперсністю структури, проходить по основному металу. Злам змішаний – крихкий, квазікрихкий, в'язкий. При підвищенні температури випробувань частка елементів крихкого руйнування (по основному металу) зменшується зі збільшенням кількості ямок в'язкого руйнування.

4. Руйнування зварних з'єднань в температурному інтервалі 800...1200 °С в зв'язку зі зменшенням зміцнюючого ефекту дрібнодисперсної структури, розчинення  $\gamma'$ -фази, активації дифузійних процесів і розблокування дислокацій, проходить по зварному шву. Злами відрізняються багатоосередковістю і носять переважно крихкий характер з наявністю локальних вторинних мікротріщин і розшарувань.

5. Вид руйнування зварних швів, випробуваних в поздовжньому напрямку в температурному інтервалі 500...800 °С, характеризується превалюванням в'язкої складової з локальними ділянками квазі-

крихкого руйнування, при 800...1200 °С – руйнування змішане зі збільшенням у міру зростання температури об'ємної частки квазікрихкої складової, наявністю на поверхні зламу вторинних тріщин. Зварні шви на відміну від зварних з'єднань в поперечному напрямку характеризуються більш однорідною структурою по їх довжині.

6. Аналіз властивостей і особливостей руйнування зварних з'єднань дозволяє зробити висновок, що при розробці технології виготовлення зварних конструкцій з монокристалічних ЖНС поряд з урахуванням фізичних і технологічних умов збереження монокристалічної структури слід виходити з необхідності забезпечення однорідності структури і властивостей окремих ділянок з'єднання.

### Список літератури

- Hurada, H. (2003) High temperature materials for gas turbines. The present and future. *Proceeding of the International gas turbine congress-2003, Tokyo, November 2-7*.
- Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. (2007) Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД. *Технология легких сплавов*, 2, 6-16.
- Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. (2011) Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей. *Вестник МГУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 38-52.
- (2006) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)*. Каблова Е.Н. (ред.). 2-е изд. Москва, Наука.
- Копелев С.З., Галкин М.Н., Харин А.А., Шевченко И.В. (1993) *Тепловые и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин*. Москва, Машиностроение.
- Fitzpatrick, G.A., Broughton, T. (1986) «Rolls-Royce Wide Chord Fan Blade» *International Conference on Titanium Products and Applications. San Francisco, California, USA, October 1986*.
- Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2018) Перспективы создания сварных монокристаллических конструкций из жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 11-12, 93-102.
- Wang, N., Mokadem, S., Rappaz, M., Kurr, W. (2004) Solidification cracking of superalloy single – and bi-crystals. *Acta materialia*, 52, 3137-3182.
- Park, J.W., Vitec, J.M., Bobu, 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.
- Anderson, T.D., DuPont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-base superalloy CMSX-4. *Welding Journal*, 2, 27-31.
- Ющенко К.А., Задерий Б.А., Полищук Е.П. и др. (2008) Склонность к образованию трещин и структурные изменения при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, 2, 10-19.
- Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2013) О природе зерен случайной ориентации в сварных швах моно-

- кристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*, 35, 10, 1347–1357.
13. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 46–51.
  14. Звягинцева А.В. (2007) *Структурные и фазовые превращения в жаропрочных никелевых сплавах и их роль в образовании трещин в сварных соединениях*: Дис. ... канд. техн. наук. 05.16.01. Киев.
  15. (1961) *Рентгенография в физическом материаловедении*. Багрянский Ю.А. (ред.). Москва, Металлургиздат.
  16. Кривоглаз М.А. (1983) *Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неправильных кристаллах*. Киев, Наукова думка.
  17. Карасевская О.П. (1999) Ориентационный рентгеновский экспериментальный метод фазового анализа. *Металлофизика и новейшие технологии*, 21, 8.
  18. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. (2006) Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода. *Физическая мезомеханика*, 9, 3, 9–22.
  19. Рыбин В.В. (2002) Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой пластической деформации. *Вопросы материаловедения*, 1(29), 11–33.
  20. Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B.*, 64, 747–753.
  21. Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel.*, 174, 25–28.
  22. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. (1975) *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев, Наукова думка.
  23. Jin-lai, Liu et al. (2011) Influence of temperature on tensile behavior and deformation mechanism of Re-containing single crystal superalloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 1518–1523.
  7. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2018) Prospects of development of welded single-crystal structures of heat-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, 11-12, 83-90.
  8. Wang, N., Mokadem, S., Rappaz, M., Kurr, W. (2004) Solidification cracking of superalloy single- and bi-crystals. *Acta Materialia*, 52, 3137–3182.
  9. Park, J.W., Vitek, J.M., Bobu, S.S., David, S.A. (2004) Stray grain formation, thermomechanical stress and solidification cracking single crystal nickel base superalloy welds. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, 9(6), 472–482.
  10. Anderson, T.D., DuPont, J.N. (2011) Stray grain formation and solidification cracking susceptibility of single crystal Ni-base superalloy CMSX-4. *Welding J.*, 2, 27–31.
  11. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Zvyagintseva, A.V. et al. (2008) Sensitivity to cracking and structural changes in EBW of single crystals of heat-resistant nickel alloys. *The Paton Welding J.*, 2, 6-13.
  12. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2013) On nature of random orientation of grains in welds of single crystals of high-temperature nickel superalloys. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, 35(10), 1347–1357 [in Russian].
  13. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2013) Influence of weld pool geometry on structural changes in EBW on high-temperature nickel alloy single crystals. *The Paton Welding J.*, 5, 45-50.
  14. Zvyagintseva, A.V. (2007) *Structural and phase transformations in high-temperature nickel alloys and their role in formation of cracks in welded joints*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tekh. Sci. Degree. Kiev [in Russian].
  15. (1961) *Radiography in physical materials science*. Ed. by Yu.A. Bagryansky. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
  16. Krivoglaz, M.A. (1983) *Diffraction of X-ray beams and neutrons in abnormal crystals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
  17. Karasevskaya, O.P. (1999) Orientation X-ray experimental method of phase analysis. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, 21, 8 [in Russian].
  18. Panin, V.E., Egorushkin, V.E., Panin, A.V. (2006) Physical mesomechanics of deformable solid body as the multilevel system. I: Basic physics of multilevel approach. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 9(3), 9–22 [in Russian].
  19. Rybin, V.V. (2002) Fundamentals of formation of mesostructures during developed plastic deformation. *Voprosy Materialovedeniya*, 1(29), 11–33 [in Russian].
  20. Hall, E.O. (1951) The deformation and ageing of mild steel. III: Discussion of results. *Proc. Phys. Soc. B.*, 64, 747–753.
  21. Petch, N.J. (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel.*, 174, 25–28.
  22. Trefilov, V.I., Milman, Yu.V., Firstov, S.A. (1975) *Basic physics of strength of refractory metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
  23. Jin-lai, Liu et al. (2011) Influence of temperature on tensile behavior and deformation mechanism of Re-containing single crystal superalloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 1518–1523.

## References

## DESTRUCTION OF WELDED JOINTS OF SINGLE-CRYSTAL HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOYS

K.A. Yushchenko, B.O. Zaderyi, I.S. Gakh, G.V. Zviagintseva, T.O. Aleksijenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Mechanical properties were determined and features of destruction of welded joints on single-crystals of high-temperature nickel alloys at tensile testing in the range of temperatures close to working temperatures were studied. Two characteristic temperature ranges of destruction were found: 500...800, 800...1200 °C. In the first temperature range welded sample destruction occurs in the base metal at mixed fracture mode: brittle, quasibrittle and ductile. In the second range destruction runs in the weld metal, fracture is multicenter, predominantly brittle with presence of secondary cracks. The considered features are related, mainly, to changes of the initial structure of the single-crystal, as a result of solidification and at cooling of the weld metal, These mainly are formation of a multilevel substructure, refinement of dendrites,  $\gamma$ - and  $\gamma'$ -phases, eutectic formations and carbides at reduction of dendrite liquation of the weld metal. 23 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

**Keywords:** single-crystal, high-temperature nickel alloys, welded joint, weld, tensile testing, temperature ranges of destruction, destruction features, microstructure

Надійшла до редакції 02.12.2021