

ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОЙМЕННИХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ В ПОЛІ- ТА МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ ПОЄДНАННІ

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

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

Розглядається важливе питання, яке постає при створенні та вдосконаленні конструкції газотурбінних двигунів з метою підвищення експлуатаційних параметрів, економічних характеристик та конкурентоздатності – зварюванню різнойменних, різноструктурних жароміцних матеріалів. Виконана оцінка зварюваності за критеріями міцності та тріщиностійкості. На прикладі зварювання типових жароміцних матеріалів, які широко використовуються в авіаційному моторобудуванні сплавів ЭИ698ВД та ЖС26ВИ відповідно з полікристалічною та монокристалічною структурою розглянуто основні питання, які виникають при зварюванні жароміцних нікелевих сплавів у різнойменному поєднанні: метод зварювання, особливості формування швів, хімічного складу та структури, схильність зварних з'єднань до тріщиноутворення, механічні властивості. Встановлено шляхи управління технологічною міцністю. Визначено механічні властивості зварних з'єднань в температурному інтервалі 20...1000 °С, отриманих за різними технологічними схемами. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 7.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, зварювання різнойменних сплавів, формування швів, хімічний склад, монокристалічна та полікристалічна структура, тріщиностійкість, властивості.

Найбільш поширеними матеріалами, які використовуються для виготовлення деталей гарячого тракту сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) є багатокомпонентні складнолеговані жароміцні нікелеві сплави (ЖНС) з полі- та монокристалічною структурою [1–3]. Однак підвищення їх механічних та експлуатаційних характеристик за рахунок складного легування та формування монокристалічної структури призводить до зниження технологічності і, зокрема, зварюваності [4, 5]. Крім того, вказані матеріали відзначаються високою вартістю. Зважаючи на те, що окремі вузли та деталі гарячого тракту ГТД зазнають на всій протяжності неоднакового термосилового впливу, доцільним є відповідне їх виготовлення з різних сплавів із застосуванням зварювання. Особливо гостро постає необхідність вирішення цього питання при створенні конструкцій типу «бліск» «блінг» та складених лопаток [6, 7]. Виникає необхідність визначення зварюваності та розробки технології зварювання різнойменних та різноструктурних сплавів. Труднощі, які постають при цьому, окрім проблем зварювання таких сплавів в однорідному поєднанні, пов'язані з різницею їх теплофізичних та металургійних характеристик. Так, різниця в температурі плавлення, інтервалах кристалізації, теплопровідності, рідкоплинності, питомій щільності призводить до проблем в формуванні якісних швів та їх структури. Різниця в теплопровідності, коефіцієнтах термічного розширення, модулів пружності сприяє формуванню значних зварювальних напружень, що призводить до локальної деформації та виникнення тріщин.

Ющенко К.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>, Звягінцева Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6450-4887>

© К.А. Ющенко, Б.О. Задерій, І.С. Гах, Г.В. Звягінцева, 2021

Різниця в хімічному складі призводить до формування небажаних крихких хімічних сполук як внаслідок сумісного плавлення, так і дифузійних процесів в процесі остигання.

Вказані проблеми ще гостріше постають при отриманні різноструктурних зварних з'єднань – полікристалів з монокристалом.

Полікристалічні деформовані та порошкові ЖНС є основним матеріалом для виготовлення дисків турбіни компресора високого тиску, корпусів камер згоряння та інших деталей гарячого тракту ГТД [1, 8]. Серед промислових полікристалічних сплавів, які найбільш широко використовуються в авіаційному двигунобудуванні, сплави ЭИ698-ВД, ЭП742-ПД, ЭК79-НД, ЭК151, ЭП975, Waspaloy, Astraloy, Inconel 718.

Ливарні ЖНС з монокристалічною структурою як більш жароміцні використовуються в основному для виготовлення гранично навантажених вузлів та деталей, зокрема, статорних та роторних лопаток ТВТ ГТД. По своєму хімічному складу вони являються найбільш складними і вміщують до 15 основних легуючих елементів, не враховуючи елементів мікролегування [3, 9]. До промислових ливарних сплавів широкого застосування в авіаційному двигунобудуванні відносяться ЖС26, ЖС32, ЖС36, PWA1484, Rene'N6, CMSX-10, TMS-138, TMS-162. В той час як деформівні сплави завдяки дрібнозеренній структурі відзначаються підвищеним опором втомі, ливарні, завдяки відсутності в їх структурі висококутових границь зерен та більш високому вмісту зміцнюючої γ' -фази характеризуються вищими показниками жароміцності.

Слід підкреслити, що майже всі заходи, спрямовані на підвищення жароміцності сплавів, так чи інакше спричиняють погіршення їх зварюваності, що пов'язано зі зменшенням їх релаксаційної здатності, збільшенням рівня локалізації та темпу наростання зварювальних напружень, які в широкому температурному інтервалі можуть досягати критичних значень. Основними показниками зварюваності сплавів є схильність до утворення тріщин при зварюванні та термічній обробці, ступінь деградації структури та властивостей вихідного металу [5, 10].

Основною проблемою полікристалічних деформованих ЖНС є тріщини в зоні термічного впливу, а монокристалічних ливарних – так звані зерна випадкової орієнтації та тріщини в металі шва.

При зварюванні ЖНС з монокристалічною структурою зазначені вище проблеми, не дивлячись на відсутність в структурі сплавів границь зерен, постають не з меншою гостротою, що пов'язано з більш складним і насиченим легуванням [11]. Крім того, не менш важливою проблемою є необхідність збереження вихідної кристалографічної орієнтації при мінімальній дезорієнтації елементів структури та попередження утворення зерен іншої орієнтації та тріщин в металі шва [12].

При зварюванні вказаних сплавів між собою крім зазначених вище проблем необхідно вирішувати питання, викликані різномірністю як самих сплавів, так і третьою складовою зварного з'єднання – зварного шва іншого хімічного складу та структури. Вочевидь, що при зварюванні ЖНС в різномірному, різноструктурному сполученні ще більше загостриться проблема одержання якісних працездатних зварних з'єднань.

Метою роботи було встановлення можливостей та шляхів отримання бездефектних різноструктурних зварних з'єднань ЖНС, деформівних (полікристалічних) з ливарними (монокристалами).

Методики та матеріали досліджень. Для виконання досліджень, пов'язаних з можливістю та технологією одержання зварних з'єднань в різномірному поєднанні необхідне, перш за все, оперативне

прецизійне управління формуванням швів, його хімічним складом та термодформаційним впливом. Як показує проведений аналіз [6, 13], для виконання подібних операцій використовують лінійне зварювання тертям (ЛЗТ), але даний метод потребує коштовного спеціалізованого оснащення, яке відсутнє на вітчизняних підприємствах авіакосмічної галузі. Крім того, зварні з'єднання ЖНС, отримані методом ЛЗТ, характеризуються значною структурною неоднорідністю, наявністю ланцюжків пор та грубих карбідних виділень по границям зерен та ін. дефектів, що сприяє тріщиноутворенню та зниженню механічних характеристик [13].

Як показує досвід зі зварювання ЖНС [14], зважаючи на високу питому потужність, прецизійність, мобільність джерела нагріву, можливість управління в широкому діапазоні тепловкладення та технологічність для виконання подібних операцій більш всього підходить метод електронно-променевого зварювання (ЕПЗ). При формуванні з'єднання у вакуумі забезпечується надійний захист металу шва від окислення, забруднень домішками, які викликають зміну хімічного складу, структурної і фізичної однорідності та погіршення основних властивостей ЖНС. Слід зазначити, що обладнання для ЕПЗ виготовляється і широко застосовується на підприємствах України.

Експерименти по зварюванню та дослідження проводили на типових сплавах, які використовуються в промисловості при створенні роторних конструкцій ГТД – деформівний з полікристалічною структурою сплав ЭИ698ВД (диски ротора) та ливарний ЖС26ВИ (лопатки) з монокристалічною та спрямованою структурою. Для вивчення механічних властивостей в з'єднаннях використовувався сплав ЖС26ВИ з монокристалічною структурою, виготовлений на ДП «Мотор-Січ». Хімічний склад та теплофізичні характеристики досліджуваних сплавів наведені в табл. 1, 2. Зварювались зразки розміром 50×25×2...3 мм, товщиною, близькою до розмірів реальних вузлів ГТД.

Режими зварювання вибирали виходячи з необхідності наскрізного проплавлення зразка з форму-

Таблиця 1. Номінальний хімічний склад зварюваних ЖНС, мас. %

Сплав	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb
ЖС26ВИ	0,13...0,18	4,3...5,3	8,0...10	10,9...12,5	0,8...1,4	0,8...1,2	5,5...6,2	1,4...1,8
ЭИ698ВД	0,03...0,07	13,0...16,0	–	–	2,8...3,2	2,35...2,75	1,45...1,8	1,9...2,2

Сплав	V	Fe	Si	Mn	B
ЖС26ВИ	0,8...1,2	≤1,0	≤0,25	≤0,25	0,015
ЭИ698ВД	–	≤2,0	≤0,5	≤0,4	0,05

Таблиця 2. Теплофізичні характеристики ЖНС

Сплав	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·°C), при T, °C											T _L , °C
	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
ЖС26ВИ	7,95	–	10,7	12,1	13,6	14,6	16,3	18,0	20,0	22,6	24,7	1383
ЭИ698ВД	–	11,7	13,4	14,6	15,9	17,6	19,7	21,3	23,0	24,7	–	1440

ванням кореневого валика та коефіцієнтом форми шва близьким до одиниці. При цьому досягаються менший перегрів та деформації зварюваного металу, зниження вірогідності утворення тріщин.

Особливість зварювання плавленням різномірних металів полягає в тому, що обидва зварювані метали утворюють спільну зварювальну ванну. Хімічним складом сплаву, що при цьому формується, в значній мірі визначається характер кристалізації та структура металу шва, властивості зварного з'єднання. В свою чергу хімічний склад шва визначається часткою кожного із зварюваних сплавів в металі шва, тобто співвідношенням ступеню їх оплавлення. Для отримання швів з різним хімічним складом використовували наступні схеми зварювання:

- фіксоване зміщення від осі стику зварювального променя на один із зварюваних зразків;
- асиметричне сканування променя в поперечному напрямку;
- введення в стик технологічної вставки різної товщини із сплаву одного із зварюваних зразків чи сплаву іншого складу.

Подальший аналіз хімічного складу та структури отриманих швів показав, що при зварюванні різномірних ЖНС з використанням технологічної вставки досягається найбільш ефективно керування хімічним складом швів.

Певні труднощі мали місце при виявленні структури зварних з'єднань. Це пов'язано не тільки з різним хімічним складом окремих ділянок зварного з'єднання, а й з різним їх структурним станом і фазовим складом, зокрема, з різним вмістом та дисперсністю основної зміцнюючої γ' -фази. Причому метал шва являє собою поєднання ділянок сплаву з різною перехідною між полікристалічною ЭИ698 та монокристалічною ЖС26 структурою. Тому була відпрацьована ступінчата методика послідовного виявлення структури окремих ділянок. Зокрема, зеренна структура виявлялась хімічним травленням, а дендритна та γ' -фаза – іонним травленням на установці ВУП-4. Крім того, для виявлення структури кожної ділянки зварного з'єднання вибирався свій час травлення.

Всі зразки для експериментів та досліджень вирізались із заготовок електроіскровим способом з послідовним шліфуванням. Шліфи для металографічних досліджень готували на шліфувально-полірувальному верстаті Abramin фірми Strues. Структуру та хімічний склад аналізували з використанням оптичного мікроскопу «Neophot-32» та електронного мікроскопу «CamScan», оснащеного енергодисперсійною системою локального аналізу Energy-200. Якість і геометрія швів оцінювалась по зовнішньому вигляду поверхні і кореня, а також – по мікро- та макрошліфах.

Механічні характеристики зварних з'єднань визначались шляхом випробування нестандартних плоских зразків на розрив, вирізаних в поперечному до осі шва напрямку. Переріз робочої частини зразка складав $\sim 5 \text{ мм}^2$, довжина 28 мм. Випробування проводились в інтервалі температур від кімнатної до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, зважаючи, що робоча температура сплавів ЭИ698 та ЖС26 відповідно складає – 650 та $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Випробування виконували на установці MTS 810 при швидкості навантаження $0,02 \text{ мм/с}$.

Результати досліджень. Одним із питань, які постають при зварюванні плавленням різномірних металів, є формування швів. Основна увага приділялась встановленню впливу параметрів режимів при вказаних схемах зварювання на геометрію і якість швів. Відомо, що на якість шва із енергетичних параметрів ЕПЗ найбільш суттєво впливає потужність променя, місцезнаходження його мінімального перерізу (фокусу) відносно поверхні зварюваного металу, швидкість зварювання. Оптимальні значення швидкості зварювання визначаються з одного боку мінімальним рівнем гідродинамічних збурень, тобто якістю формування шва, а з іншої – умовами отримання мінімальної ширини шва для зниження деформацій, підвищення тріщиностійкості, збереження вмісту легковипаровуючих легуючих складових в металі шва. Виконання першої умови потребує зменшення швидкості зварювання, а другої – її підвищення. Експерименти по зварюванню виконувались при швидкості зварювання в межах $10 \dots 120 \text{ м/г}$. При швидкостях менших 10 м/г формуються асиметричні шви значної ширини складної (чаркоподібної) геометрії при частих пропалах зварювального металу та підрізах (до $0,2 \text{ мм}$) з боку сплаву ЖС26. Зварювання на швидкості $\sim 120 \text{ м/г}$, при невеликій ширині шва призводить до значних підрізів, просідань шва, нестабільності формування та ослаблень металу з'єднання в цілому. Причому, для кожної швидкості та схеми зварювання, товщини металу, оптимальні величини сили струму та фокусування променя мають різні значення. Попередній підігрів в діапазоні $300 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$ несуттєво впливає на геометрію швів – дещо зростає стабільність формування та зменшується вірогідність утворення тріщин. Основна ж увага при підготовці досліджень була зосереджена на встановленні режимів та схем зварювання, які забезпечують наскрізне проплавлення та стабільне формування швів симетричної геометрії.

Задовільне формування було досягнуто при швидкості $v_{зв} = 50 \dots 60 \text{ м/г}$, фокусуванні променя $\Delta I_{\phi} = +25 \text{ мА}$, запасі потужності $I_{пр} = 1,5 \dots 2,0 I_{ном}$, де $I_{ном}$ – значення сили струму, при якому настає

наскрізне проплавлення; ΔI_{ϕ} – значення сили струму в фокусуєчій лінзі. При зварюванні на таких режимах практично невілюється вплив різниці теплофізичних характеристик (рис. 1).

Причому, при вказаному «запасі потужності» формування шва, його геометрія менш чутливі як до зміни швидкості, так і (в меншій мірі) – до фокусування променя. Вихід за межі вказаних значень параметрів режимів $v_{зв} \geq 88$ м/г, $15\text{mA} \leq \Delta I_{\phi} \leq 35$ мА, $I_{пр} \leq 1,5 I_{ном}$ призводить до помітної зміни геометрії швів. При зменшенні запасу потужності особливо помітний вплив ΔI_{ϕ} . Враховуючи викладене, зразки для досліджень зварювали на підвищених (~53 м/г) швидкостях при значному запасі потужності променю, що дозволило дещо розширити розбіг параметрів режимів оптимального формування швів. Ще більше розширення має місце при зварюванні з скануванням промене-

ню (рис. 2, 3). При цьому полегшується формування швів симетричної геометрії з поверхнями сплавлення близькими до паралельних (рис. 2, 3), їх стабільність та повторюваність, що полегшує можливість більш точного регулювання хімічного складу швів. При зварюванні з використанням технологічних вставок сканування дозволяє більш рівномірно оплавляти кромки зварюваних зразків та підвищити однорідність швів. Крім того, використання технологічних вставок значно покращує якість та геометрію швів (рис. 3). Позитивний ефект при цьому досягається за рахунок створення стабільного наскрізного каналу, більш ламінарного переносу розплаву зварювальної ванни у хвостову частину, відсутності збурення і рівномірного оплавлення кромки. При цьому зменшується перегрів зони термічного впливу, забезпечується симетричне перенесення розплавленого металу в зварювальній ванні та стабільність і якість формування шва.

Аналіз результатів досліджень показує, що на хімічний склад швів в більшості впливає сплав ЖС26 ніж ЭИ698 (табл. 2, 3), що, вочевидь, пов'язано з більшим його оплавленням внаслідок менших температур плавлення, теплоємністю та теплопровідністю. Завдяки вибраному способу та режимам зварювання метал зварювальної ванни інтенсивно перемішується, тому хімічний склад як поперек так і повздовж шва практично не змінюється. В усіх розглянутих варіантах метал шва являє собою високолегований сплав, хімічний склад якого відрізняється від кожного зі зварюваних сплавів (табл. 3). У випадку, коли компоненти сплаву ЭИ698 складають більшу частку металу шва, спостерігається значне збільшення, в порівнянні з вихідним ЭИ698, вмісту алюмінію, кобальту, вольфраму при деякому зменшенні вмісту ніобію, хрому, молібдену, титану. При максимальній долі сплаву ЖС26 зміна хімічного складу менша – дещо зростає, в порівнянні з вихідним ЖС26, вміст хрому, молібдену, титану, заліза та має місце незначне зменшення вольфраму,

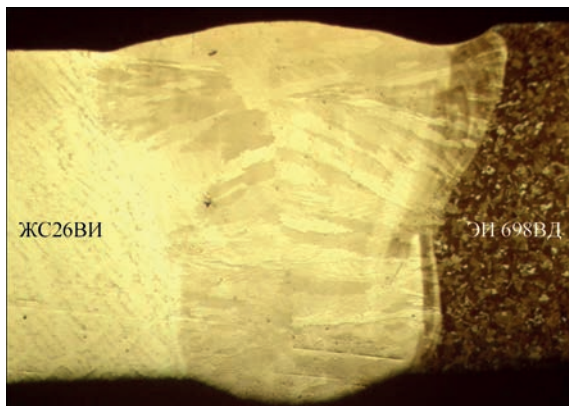


Рис. 1. Форма шва зразків товщиною 2,5 мм, отриманого при швидкості 53 м/год ($\times 25$)

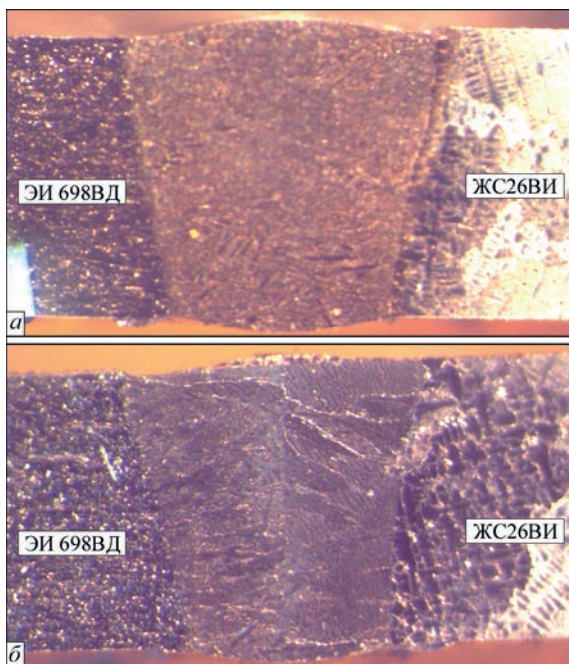


Рис. 2. Макрошліфи зварних з'єднань сплаву ЖС26 з ЭИ698, виконаних при однакових значеннях параметрів режиму ЕПЗ з асиметричним скануванням променя: а – на сплав ЖС26; б – на сплав ЭИ 698 ($\times 25$)

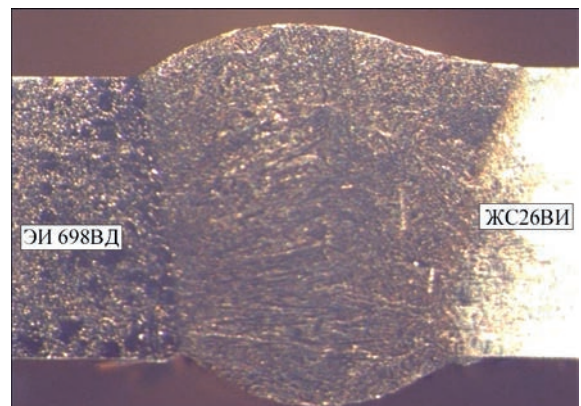


Рис. 3. Макрошліф зварних з'єднань сплаву ЖС26 з ЭИ 698, виконаних ЕПЗ з технологічною вставкою сплаву ЭИ 698 ($\times 25$)

Таблиця 3. Розподіл основних легуючих елементів в зварних з'єднаннях ЭИ698ВД з ЖС26ВИ (ЕДХ аналіз), мас. %

Місце аналізу		Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb
Основний метал	ЖС26	4,92	9,06	12,47	1,01	1,07	4,99	1,29
	ЭИ698	14,77	0,32	0,72	3,02	2,68	1,34	2,2
Метал шва	ЖС26	6,955	7,0	988,	1,535	1,45	4,46	1,425
	Стик	8,32	6,08	8,06	1,94	1,6	3,75	1,66
	ЭИ698	11,53	3,04	4,705	2,45	2,045	2,675	1,875

кобальту, титану, алюмінію. При однаковій частці зварюваних сплавів в металі шва вміст легуючих не є зовсім середньоарифметичним. Більш помітне зростання вмісту вольфраму, кобальту, алюмінію при зниженні титану, молібдену, ніобію.

Хімічна мікронеоднорідність металу швів, яка спостерігається, відображає притаманну сплавам з дендритною кристалізацією ліквіацію, коли легуючі W, Re, Cr, Co концентруються по осях дендритів, Al, Ta, Nb – по міждендритним проміжкам.

Вказані зміни хімічного складу чинять суттєвий вплив як на мікроструктуру, так і фазовий склад металу шва (рис. 4). У всіх розглянутих варіантах метал шва має дрібнодендритну спрямовану структуру γ -матриці з дисперсними виділеннями γ' -фази та карбідів різної морфології та складу. Кількість γ' -фази, оцінена по алюмінієвому коефіцієнту, змінюється від 60...61 % – для швів з максимальним вмістом сплаву ЖС26 та 45...46 % – для складу ~50/50 і до 22...25 % – для швів з максимальним вмістом сплаву ЭИ698.

Незважаючи на те, що метал шва по своєму хімічному складу відрізнявся від вихідного сплаву, при симетричній кристалографічній орієнтації зразка сплаву ЖС26 біля лінії сплавлення, має місце її чітке наслідування (рис. 4). Тільки в місцях зміни геометрії контуру сплавлення або ж при наявності хімічної неоднорідності основного металу формуються блоки дендритів або зерна іншої відмінної від вихідної кристалографічної орієнтації. Біля лінії сплавлення з ЭИ698 формується зорієнтована по напрямку максимального тепловідводу зеренна структура з дрібнодендритним наповненням (рис. 5). Мікроструктура металу швів

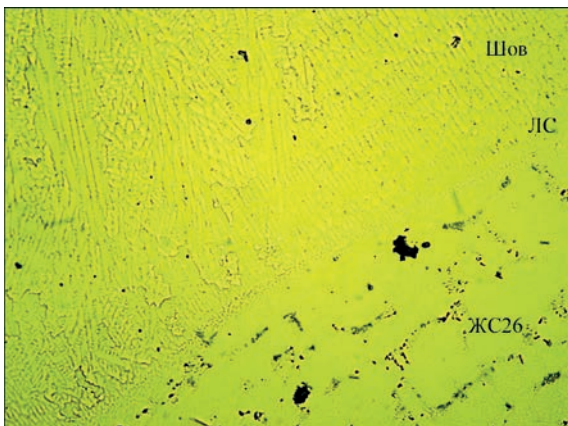


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 200$) перехідної зони ділянки металу зварного з'єднання сплаву ЖС26 з ЭИ698 в області сплавлення з ЖС26

відповідає хімічному складу високолегованих нікелевих сплавів (рис. 6), де блоки дендритів однієї кристалографічної орієнтації окреслені вторинними границями зерен. У всіх розглянутих варіантах структура металу шва в поперечному напрямку відрізняється помітною неоднорідністю. Зі сторони сплаву ЭИ698 структура характеризується наявністю кристалів, які формуються по окремих зернах чи сукупності зерен близької орієнтації основного металу (див. рис. 5), а з боку сплаву ЖС26 – спершу спостерігається ділянка шириною від 0,2 до 1,0 мм, яка епітаксіально наслідує вихідну кристалографічну орієнтацію монокристалу (рис. 4) і тільки на деякій відстані формуються зерна. Біля осі шва, де стикаються фронти кристалізації від сплаву ЖС26 та ЭИ698 не формується звичайна, так звана прямолінійна лінія слабкості, тому що завдяки непрямолінійності окреслень дендритів, зерна мов би входять в зачеплення одне

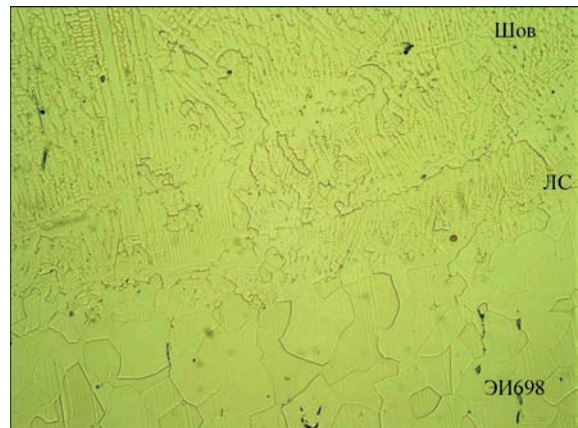


Рис. 5. Мікроструктура ($\times 200$) металу зварного з'єднання ЖС26 з ЭИ698 в області зони сплавлення з ЭИ698



Рис. 6. Мікроструктура ($\times 200$) осьової зони металу шва зварного з'єднання сплаву ЖС26ВИ з ЭИ698ВД

з іншим (див. рис. 6). Вочевидь, тому ні в одному з експериментів не спостерігалось утворення вісьових тріщин.

Добре відомо, що основним недоліком високолегованих ЖНС, який стримує їх подальші розвиток та широке впровадження в промислового виробництві, є підвищена схильність до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням. Особливо ця схильність проявляється в сплавах з підвищеною жароміцністю, яка досягається головним чином за рахунок збільшення та ускладнення легування сплавів. Більшість авторів [4, 10, 15] пов'язують цю схильність з наявністю двох температурних інтервалів крихкості (провалу пластичності), в яких і формуються тріщини. Найбільш критичними є поперечні гарячі тріщини, які формуються в інтервалі крихкості $(0,6 \dots 0,8 T_s)$, в якому метал шва характеризується невеликим запасом пластичності при високих $\sim (0,8 \dots 0,9)\sigma_{0,2}$ зварювальних напруженнях. Сплави ЭИ698 та ЖС26 в однорідному сполученні при зварюванні плавленням також відзначаються схильністю до утворення тріщин в металі шва. В зварних з'єднаннях сплаву ЭИ698 інколи, в зоні термічного впливу, спостерігаються так звані підваликові тріщини. Сплав ЖС26 більш схильний до утворення в швах поперечних тріщин. Причому виникнення останніх пов'язують, в основному, з виникненням великокутових границь зерен.

Вочевидь, що ці фактори проявляють себе і при зварюванні вказаних сплавів в різноименному сполученні.

При розгляді зварних з'єднань сплаву ЭИ698 з ЖС26, виконаних на рекомендованих режимах, тріщини в зоні термічного впливу ЭИ698 не були виявлені (рис. 7). Позитивну роль при цьому відіграють геометрія та невеликий об'єм металу шва. Поперечні тріщини були виявлені тільки в швах з максимальним вмістом компонентів сплаву ЖС26. Тріщини мають міждендритний характер, точніше проходять по міждендритним границям зерен. Їх формування можна пояснити наближенням хімічного складу шва майже впритул до сплаву ЖС26, наявністю великокутових границь зерен, особливо останнє проявляється при кристалографічній орієнтації з'єднуючого монокристалу, далекій від високої симетрії. Та все ж такі з'єднання мають меншу в порівнянні з однорідним з'єднанням сплаву ЖС26 схильність до утворення тріщин. Вочевидь, метал шва має кращу пластичність завдяки більшій чистоті, по домішкам впровадження сплаву ЭИ698 та меншим вмістом γ' -утворюючих елементів.

Руйнування зварних з'єднань при випробуванні зразків на розтяг в температурному інтервалі $20 \dots 500$ °C (табл. 4, 5) проходило по основному металу сплаву ЖС26. При підвищенні темпера-

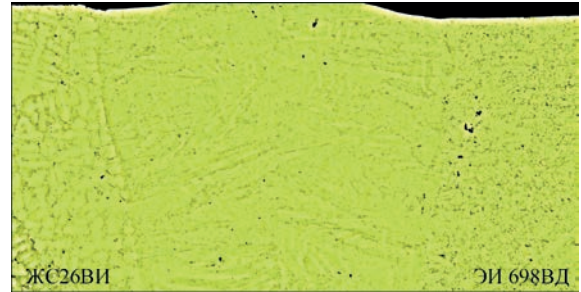


Рис. 7. Зварне з'єднання сплаву ЖС26ВИ з ЭИ698ВД (максимальний вміст компонентів сплаву ЭИ698) ($\times 50$)

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з'єднань ЭИ698ВД з ЖС26ВИ (орієнтації [001])

$T_{\text{вип}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\Psi, \%$	Місце руйнування
20	980	860	10	ЖС26 ОМ*
500	1100	840	16	ЖС26 ОМ
650	1020	720	16	ЭИ698 ОМ
750	890	680	18	ЭИ698 ОМ
1000	269	200	18	ЭИ698 ЗС**

* – основний метал; ** – зона сплавлення.

Таблиця 5. Механічні властивості зварних з'єднань різноименних ЖНС ЭИ698ВД з ЖС26ВИ (орієнтації [011])

$T_{\text{вип}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\Psi, \%$	Місце руйнування
20	900	800	6	ЖС26 ОМ*
500	950	810	8	ЖС26 ОМ
650	980	830	10	ЖС26 ОМ
750	890	680	18	ЭИ698 ОМ
1000	260	200	18	ЭИ698 ЗС**

* – основний метал; ** – зона сплавлення.

тури до 1000 °C місце руйнування зміщується від основного металу ЖС26 до ЭИ698. Така особливість може бути пояснена різним вмістом γ' -фази в компонентах зварного з'єднання – в ЖС26 ~ 61 %, в шві \sim від 60 до 25 % в залежності від схеми зварювання, в ЭИ698 $\sim 22 \dots 20$ %. Виходячи з отриманих результатів та зважаючи на необхідність зменшення хімічної неоднорідності зварного з'єднання, зварювання слід виконувати з переважним оплавленням сплаву ЭИ698 або з застосуванням технологічних вставок. Місце руйнування зварного з'єднання в певній мірі залежить також від кристалографічної орієнтації сплаву ЖС26, що пов'язано з анізотропією властивостей монокристалів.

Таким чином, виконані дослідження показують можливість і шляхи отримання бездефектних зварних з'єднань різноименних ЖНС з механічними властивостями на рівні одного зі зварюваних матеріалів.

Висновки

1. Показана можливість отримання бездефектних зварних з'єднань ЖНС в різноименному сполученні, в тому числі монокристалічних сплавів з полікристалічними стосовно актуальної задачі створення суцільнозварних роторних конструкцій та складених комбінованих зварних лопаток ГТД та ГТУ.

2. Розроблені та відпрацьовані схеми, режими електронно-променевого зварювання різнойменних ЖНС, які дозволили отримати зварні з'єднання без тріщин з механічними властивостями на рівні основного металу. При випробуванні на розтяг в інтервалі температур 20...650 °С руйнування зварних з'єднань сплаву ЭИ698 з ЖС26 проходить по основному металу сплаву ЖС26, а в інтервалі температур 700...1000 °С – по сплаву ЭИ698, або по зоні сплавлення шва з ЭИ698.

3. При зварюванні сплаву ЭИ698 з ЖС26 електронним променем зменшується схильність до утворення тріщин в порівнянні зі швами, виконаними у однойменному сполученні, внаслідок підвищення релаксаційної здатності металу шва та з'єднання в цілому за рахунок керованого зменшення вмісту γ' -утворюючих елементів (Al, Ti).

4. Підвищення якості та властивостей різнойменних різноструктурних з'єднань ЖНС досягається при зварюванні:

- електронно-променевим способом з регульованим асиметричним скануванням променю;
- з використанням технологічної вставки;
- з керованим зменшенням вмісту γ' -утворюючих елементів.

Асиметричність та амплітуда сканування променю, як і розміри вставки, визначаються в основному конструкцією з'єднання та необхідністю забезпечення певного хімічного складу шва та його геометрії.

5. Зварні шви сплаву ЭИ698 з ЖС26 характеризуються дрібнодендритною спрямованою структурою з дисперсними виділеннями γ' -фази, карбідів і карбоборидів різної морфології та хімічного складу. Управління хімічним складом та вмістом γ' -фази швів дозволяє за рахунок технологічної схеми та параметрів процесу електронно-променевого зварювання отримувати шви з вмістом зміцнюючої фази від 60...62 до 22...25 %.

6. Отримані результати дослідження зварювання різнойменних та різноструктурних жароміцних деформованих та ливарних монокристалічних сплавів можуть слугувати основою при розробці промислової технології створення суцільнозварних роторних та статорних вузлів та окремих деталей гарячого тракту ГТД та ГТУ.

Список літератури

1. Братухин А.Г. (2001) *Современные авиационные материалы, технологические и функциональные особенности*. Москва, АвиаТехИнформ XXI век.
2. Симс Ч., Столлов Н., Хагель В. (1995) *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*. Р.Е. Шалин (ред.). Москва, Металлургия.
3. Строганов Г.Б., Чепкин В.М. (2000) *Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин*. Москва, ОНТИ МАТИ.
4. Морочко В.П., Сорокин Л.И., Зыбко Н.Ю. (1980) Классификация жаропрочных никелевых сплавов по свариваемости при ЭЛС. *Автоматическая сварка*, 12, 42–44.

5. Сорокин Л.И. (2003) Оценка сопротивления образованию трещин при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов (Обзор). *Сварочное производство*, 7, 11–18.
6. XF9-1, the world's best standards fighter engine, has been completed. *Japan's Military Technology*, Interview with the Developer (Part 1/2). BLOGOS (in Japanese). Retrieved 31 August 2019.
7. Копелев С.З., Галкин М.Н., Харин А.А., Шевченко И.В. (1993) *Тепловые и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин*. Москва, Машиностроение.
8. Базилева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.О. (2012) Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы. В сб. *Авиационные материалы и технологии*. Москва, ВИАМ, сс. 57–60.
9. Каблов Е.Н. (2001) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)*. Москва, МИСИС.
10. Сорокин Л.И. (1999) Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное производство*, 2, 11–17.
11. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Карасевская О.П. и др. (2008) Склонность к образованию трещин и структурные изменения при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, 2, 10–19.
12. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Карасевская О.П. и др. (2006) Структурные изменения в процессе сварки монокристаллов никелевых суперсплавов при кристаллографически асимметричном расположении сварочной ванны. *Металлофизика. Новейшие технологии*, 28, 11, 1509–1527.
13. Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю. и др. (2012) Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением. *Вестник УГАТУ*, 16, 7, 52, 112–116.
14. Wiednig C. (2014) Dissimilar Electron Beam Welding of Nickel base Alloy 625 and 9 % Cr Steel. *Procedia Engineering*, 86, 184–194. <https://core.ac.uk/download/pdf/82415005.pdf>
15. Lippold, J.C., Cotecki, D.J. (2005) *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley interscience A J Wiley@sons inc. Publication.

References

1. Bratukhin, A.G. (2001) *Modern aviation materials, technological and functional peculiarities*. Moscow, AviaTekhInform 21st century [in Russian].
2. Sims, C., Stollov, N., Hagel, W. (1995) *Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants*. Ed. by R.E. Shalin. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Stroganov, G.B., Chepkin, V.M. (2000) *Cast heat-resistant alloys for gas turbines*. Moscow, МАТИ [in Russian].
4. Morochko, V.P., Sorokin, L.I., Zybko, N.Yu. (1980) Weldability classification of high-temperature nickel alloys in EBM. *Автоматич. Сварка*, 12, 42–44 [in Russian].
5. Sorokin, L.I. (2003) Evaluation of cracking resistance in welding and heat treatment of high-temperature nickel alloys (Review). *Сварочн. Производство*, 7, 11–18 [in Russian].
6. XF9-1, the world's best standards fighter engine, has been completed. *Japan's Military Technology*, Interview with the Developer (Pt. 1/2). BLOGOS (in Japanese). Retrieved 31 August 2019.
7. Kopelev, S.Z., Galkin, M.N., Kharin, A.A., Shevchenko, I.V. (1993) *Thermal and hydraulic characteristics of cooled gas turbine blades*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Bazileva, O.A., Arginbaeva, E.G., Turenko, E.O. (2012) Heat-resistant cast intermetallic alloys. In: *Aviation Materials and Technologies*. Moscow, VИАМ, 57-60 [in Russian].
9. Kablov, E.N. (2001) *Cast blades of gas-turbines engines (alloys, technology, coatings)*. Moscow, MISIS [in Russian].

10. Sorokin, L.I. (1999) Stresses and cracks in welding and heat treatment of high-temperature nickel alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 11–17 [in Russian].
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., Karasevskaya, O.P. (2006) Structural changes during welding process of single crystals of nickel superalloys in crystallographically asymmetric location of welding pool. *Novejshie Tekhnologii*, 28(11), 1509–1527 [in Russian].
13. Bychkov, V.M., Selivanov, A.S., Medvedev, A.Yu. et al. (2012) Investigation of weldability of high-temperature nickel alloy EP742 by linear friction method. *Vestnik UGATU*, 16(7), 52, 112–116.
14. Wiednig C. (2014) Dissimilar electron beam welding of nickel base alloy 625 and 9 % Cr steel. *Procedia Engineering*, 86, 184–194. <https://core.ac.uk/download/pdf/82415005.pdf>
15. Lippold, J.C., Cotecki, D.J. (2005) *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley interscience. A J.Wiley@sons inc. Publ.

WELDING DISSIMILAR HIGH-STRENGTH NICKEL ALLOYS IN POLY- AND SINGLE-CRYSTAL COMBINATIONS

K.A. Yushchenko, B.O. Zaderii, I.S. Gakh, G.V. Zvyagintseva

E.O. Paton Electric Welding Institute. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua.

The paper deals with an important question which arises at designing and improvement of the structures of gas turbine engines, in order to increase the operating parameters, cost characteristics and competitiveness – welding of dissimilar, multi-structural high-temperature materials. Weldability assessment by the criteria of strength and crack resistance was performed. The main questions, arising in welding high-temperature nickel alloys in dissimilar combinations: welding method, features of weld formation, chemical composition and structure, cracking susceptibility of welded joints and mechanical properties, are considered in the case of welding typical high-temperature materials widely used in aircraft engine building, namely EI698VD and ZhS26VI alloys with polycrystal and single-crystal structure, respectively. Methods to control the technological strength are established. Mechanical properties of welded joints produced in the temperature range of 20...1000 °C by different technology schemes, are determined. 15 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

Keywords: high-temperature nickel alloys, welding of dissimilar alloys, weld formation, chemical composition, single-crystal and polycrystal structure, crack resistance, properties.

Надійшла до редакції 19.04.2021

XX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ - 2021

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

16 - 19

листопада

МЕТАЛО-ОБРОБКА
 УКРАЇНІЗАЦІЯ
 ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА
 ПЛАЗМЕННИКИ
 УКРАЇНСЬКИЙ ТІКСТІЛ
 УКРАЇНСТВО
 УКРАЇНСЬКА АВТОМАТИЗАЦІЯ
 ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ
 ЛОГІСТИКА-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ
 БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА

ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер:
ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНСТРУМЕНТ

Ексклюзивний медіа партнер:
ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА

Технічний партнер:
RentMedia

IEC

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua