

# СТРУКТУРА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Nb–Cr–Ti–Al–Zr, ОДЕРЖАНИХ ЛАЗЕРНИМ ЗВАРЮВАННЯМ\*

В.Д. Шелягін<sup>1</sup>, А.В. Бернацький<sup>1</sup>, О.В. Сіора<sup>1</sup>, В.І. Бондарєва<sup>1</sup>, М.П. Бродніковський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3

В роботі авторами досліджено проблеми одержання способом лазерного зварювання з'єднань з високоентропійного сплаву системи Nb–Cr–Ti–Al–Zr. Представлені результати диференціального термічного аналізу вихідного матеріалу. Проаналізовано результати рентгенофазового аналізу сплаву. Зроблено висновок про існування в сплаві ОЦК твердого розчину на основі ніобію та твердого розчину на основі інтерметаліду  $ZrCr_2$ , а також існування в сплаві двох твердих розчинів на основі ніобію з різним хімічним складом. Проведено аналіз впливу швидкості кристалізації сплаву на його мікроструктуру. Показано, що співвідношення кількості дендритів і евтектики може змінюватися в залежності від швидкості охолодження. Отримані результати досліджень по формуванню дендритної структури були в подальшому використані при відпрацюванні режимів зварювання лазерним випромінюванням. В даній роботі авторами досліджено вплив на формування мікроструктури швів таких параметрів, як потужність випромінювання та швидкість лазерного зварювання. Досліджено механічні властивості стикових з'єднань на одновісний статичний розтяг. Встановлено, що на ослаблення матеріалу, що призводить до руйнування, впливає особливість розподілу залишкових термічних напружень, що визначається режимом підведення і відведення тепла в процесі зварювання. Показано, що утворення більшості дефектів пов'язано з особливістю нерівноважної кристалізації багатокомпонентних високоентропійних жароміцних сплавів. Для запобігання їх утворення доцільними є заходи з оптимізації технологічних параметрів, спрямовані на збільшення швидкості охолодження розплаву, з метою одержання більш рівноважної структури. Бібліогр. 15, рис. 5.

*Ключові слова:* багатокомпонентний високоентропійний сплав, лазерне зварювання, стикові з'єднання, структура, механічні властивості, дефекти

Багато дослідників стверджують, що можливості традиційних підходів до створення нових сплавів та технологій багато в чому вичерпані і вже не призводять до суттєвого підвищення властивостей [1–3]. Так, розробка металевих матеріалів полягає в підборі легуючих елементів для отримання необхідних характеристик сплаву, заснованого на одному компоненті. Однак варіативність підбору легуючих елементів вже практично обмежена. У той же час технології виготовлення виробів багато в чому не враховують особливості утворення фаз в ході обробки, багаторівневий характер структури, масштаб і розподіл структурних елементів, що часто не дозволяє досягти високих значень механічних і технологічних властивостей сплавів і їх оптимального балансу.

В даній час значну увагу з боку матеріалознавців усього світу привертають так звані високоентропійні сплави [4–6]. Цей інтерес обумовлюється декількома факторами. По-перше, концепція високоентропійних сплавів відкриває величезні можливості для створення нових сплавів зі структурами і властивостями, відмінними від таких для

«традиційних» сплавів. По-друге, деякі з уже досліджених сплавів продемонстрували вкрай привабливі механічні властивості: поєднання високої пластичності і міцності при кімнатній температурі, рекордні значення ударної в'язкості і в'язкості руйнування при кімнатній і криогенній температурах, високу питому міцність при підвищених температурах та ін. [7–9]. При такому підході до пошуку нових композицій виявляється ще один напрямок досліджень, внаслідок величезного числа можливих варіантів складів сплавів.

Багатокомпонентні жароміцні сплави з ніобієм також належать до новітніх перспективних матеріалів. На даний час вони знаходять все ширше використання при виготовленні окремих частин експериментальних та дослідних виробів та макетів для ракетно-космічної техніки та енергетики [10–12]. Відсутність надійних технологій з'єднання багатокомпонентних жароміцних сплавів з ніобієм стримує впровадження цих сплавів у промислового секторі економіки. Зварювання багатокомпонентних жароміцних сплавів з ніобієм ускладнено у зв'язку з утворенням під час ости-

\* Друкується за матеріалами доповіді на міжнародній конференції «Сучасні технології з'єднання матеріалів», ІЕЗ ім. С.О. Патона, Київ, 31 травня – 02 червня 2021 р.

Шелягін В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8153-6533>, Бернацький А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>, Сіора О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>, Бондарєва В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-4745-0995>

© В.Д. Шелягін, А.В. Бернацький, О.В. Сіора, В.І. Бондарєва, М.П. Бродніковський, 2021

гання металу шва інтерметалідів, а також можливим утворенням гідридів, нітридів та оксидів, що окрихчують метал шва та околшовної зони [13–15]. Дані щодо одержання нероз’ємних зварних з’єднань з високоентропійних жароміцних сплавів з ніобієм на даний момент мають обмежений характер. Ґрунтовних досліджень, які систематично пов’язують з одного боку, склад, структуру, механізми деформації і зміцнення, індуковані фазові перетворення, а з іншого, механічні та технологічні властивості, в залежності від режимів зварювання, явно недостатньо. Таким чином, проведення таких досліджень є, безумовно, актуальним завданням для матеріалознавства металевих матеріалів і розвитку технологій виготовлення виробів перспективної техніки.

Метою даної роботи є визначення закономірностей формування структури стикових зварних з’єднань багатокомпонентного високоентропійного сплаву на основі системи Nb–Cr–Ti–Al–Zr в залежності від режимів лазерного зварювання.

**Методи та обладнання.** Вплив швидкості охолодження на особливості кристалізації багатокомпонентного високоентропійного сплаву 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al вивчали за допомогою плавлення лазерним випромінюванням. Потужність випромінювання, швидкість його руху і товщина пластин сплаву дозволяли варіювати швидкості підведення і відведення тепла при плавленні матеріалу. З цією метою виконували провари у пластинах товщиною 0,6...2,0 мм з багатокомпонентного високоентропійного сплаву 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al. Використовували Nd:YAG твердотільний лазер «DY044» і волоконний лазер «YLR-400-AC». Потужність лазерного випромінювання змінювалася в межах 200...1000 Вт. На обраних режимах виконували лазерне зварювання стикових зварних з’єднань з пластин  $L \times B \times H$  30×10×1,8 мм. Швидкість зварювання змінювалася від 50 до 1000 мм/хв. Мікροструктуру вивчали на поперечних шліфах і зламах за допомогою світлової мікроскопії (використовували оптичний мікроскоп «МІМ-9» з цифровою приставкою для реєстрації зображень) та растрової електронної мікроскопії (використовували електронний мікроскоп «Superprob 733»). Порівняльний рентгеноструктурний аналіз сплавів виконано на дифрактометрі «ДРОН-3М». Зйомки здійснювали в  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінюванні. Аналіз рентгенограм по Рітвелду проведено за допомогою програмного забезпечення PowderCell 2.4. Особливості плавлення сплаву вивчалися за допомогою методу диференціального термічного аналізу. Механічні випробування на статичне одновісне розтягнення проводили в вакуумі  $10^{-3}$  Па при температурі 1000 °С на установці типу 1246 ви-

робництва Науково-дослідного і конструкторського інституту випробувальних машин, приладів і засобів вимірювання мас.

**Результати та обговорення.** Результат дослідження теплових ефектів при нагріві та охолодженні сплаву за допомогою диференціального термічного аналізу (ДТА) представлено на рис. 1. При постійній швидкості нагріву печі (20 °С/хв) в області температури 1400 °С спостерігається різке зниження температури сплаву у порівнянні з температурою печі, а при остиганні – різке зростання у вузькому інтервалі температур. Вузький температурний інтервал та високе значення теплового ефекту, його характерний відносний зсув по температурі при нагріві та охолодженні властивий для плавлення і плавлення евтектики.

Рентгенівський фазовий аналіз (рис. 2) свідчить про існування в сплаві ОЦК твердого розчину на основі ніобію та твердого розчину на основі інтерметаліду  $\text{ZrCr}_2$ . Про створення твердих розчинів свідчить зсув ліній, які відповідають кристалічним решіткам чистих ніобію та  $\text{ZrCr}_2$ . Роздвоєння ліній ОЦК твердого розчину, яке легко фіксується при збільшенні масштабу, свідчить про існування в сплаві двох твердих розчинів на основі ніобію з різним хімічним складом.

Важливим для відпрацювання методики зварювання сплаву 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al є не тільки описані вище закономірності створення фазового складу при його кристалізації, але й встановлений факт немонотонної залежності розміру дендритної структури, що формується, в залежності від швидкості кристалізації розплаву (рис. 3).

Найповільніше сплав охолоджувався при виплавці в аргонодуговій печі. Хоча злиток лежить на мідній падині, яка охолоджується водою, швидкість кристалізації зменшується спеціальним ре-

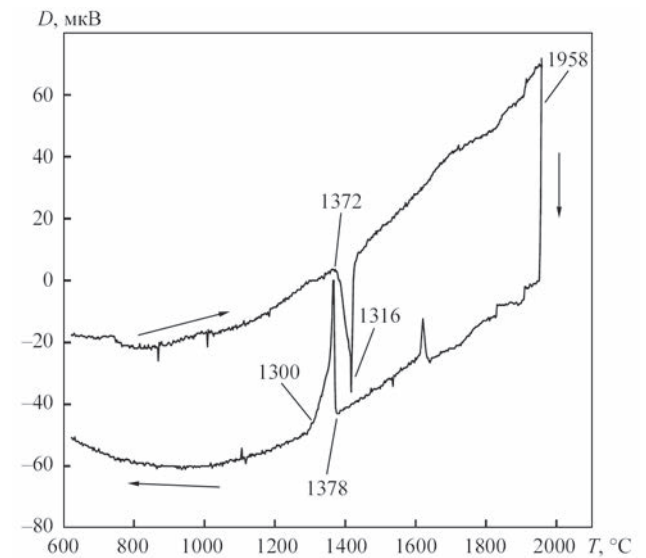


Рис. 1. Криві ДТА при нагріві та охолодженні для сплаву 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al. Напрямок зміни температури вказано стрілкою

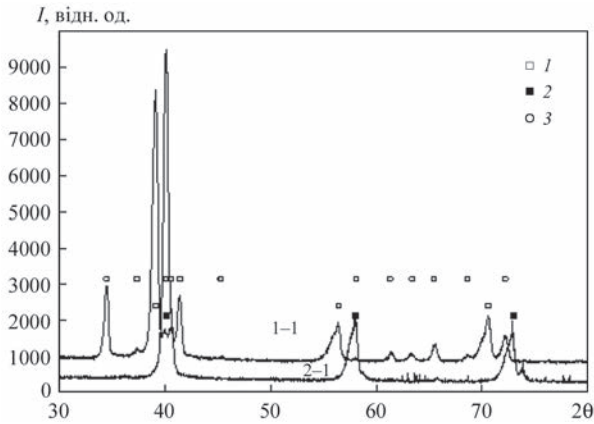


Рис. 2. Рентгенограми сплавів: 1-1 – 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al, 2-1 – Nb: 1 – ОЦК фаза у сплаві 1-1; 2 – ОЦК фаза, ніобій; 3 – твердий розчин на основі  $ZrCr_2$

жимом підігріву злитку дугою для зменшення поруватості литва та підвищення однорідності хімічного складу. Структура сплаву формується внаслідок кристалізації дендритів, які є твердим розчином на основі ніобію з підвищеним вмістом тугоплавких компонент, що змінює склад рідкої фази. На рис. 3, а первинні дендрити – це великі зерна світлої фази. Перетин сплаву площиною шліфа показує, що дендрити мають вид стрижнів з довжиною 120...150 мкм та діаметром 20...30 мкм. Обидва розміри стрижнів чітко виявляються у перерізі сплаву площиною шліфа (рис. 3, а). Між дендритами розташована суміш дрібних зерен двох фаз. Це евтектика. Світлі дрібні зерна між дендритами – це ОЦК твердий розчин на основі ніобію, що кристалізувалися як складова евтектики при меншій температурі, ніж первинні дендрити. Зміна температури кристалі-

зації двох ОЦК фаз на основі ніобію пов'язана із різним їх хімічним складом, що фіксується як роздвоєння ліній на рентгенограмі (рис. 2).

Збільшення швидкості охолодження при кристалізації призводить до зменшення розміру первинних дендритів. Діаметр стрижнів дендритів дорівнює ~2 мкм (рис. 3, б). Міждендритні проміжки виглядають як темна фаза в результаті розсіювання світла на суміші дуже дрібних кристалів евтектики внаслідок шорсткості поверхні, яку вони створюють. При подальшому збільшенні швидкості кристалізації розмір дендритів починає збільшуватися. Спостерігається ефект часткового гартування розплаву вихідного складу (рис. 3, в). Однак частково дендрити з підвищеним вмістом тугоплавких компонент створюються (про що свідчить форма деяких кристалів світлої фази та створення евтектики внаслідок місцевої зміни хімічного залишкового складу) після випадіння первинних дендритів розплаву (рис. 3, в). Швидкість охолодження висока і дрібнокристалічна евтектика виглядає як темна фаза.

Результати дослідження формування мікроструктури зварного з'єднання при відпрацюванні режимів зварювання лазерним випромінюванням представлено на рис. 4.

При малій потужності лазерного випромінювання (200...400 Вт) плавлення відбувається тільки на частині глибини стику (рис. 4, а). З'єднання стику відбувається на глибину плавлення. Швидкість кристалізації розплаву висока і неоднорідна по глибині розплавленої ванни. При зварюванні лазерним випромінюванням на режимі, що відповідає структурі на рис. 4, а (потужність лазерно-

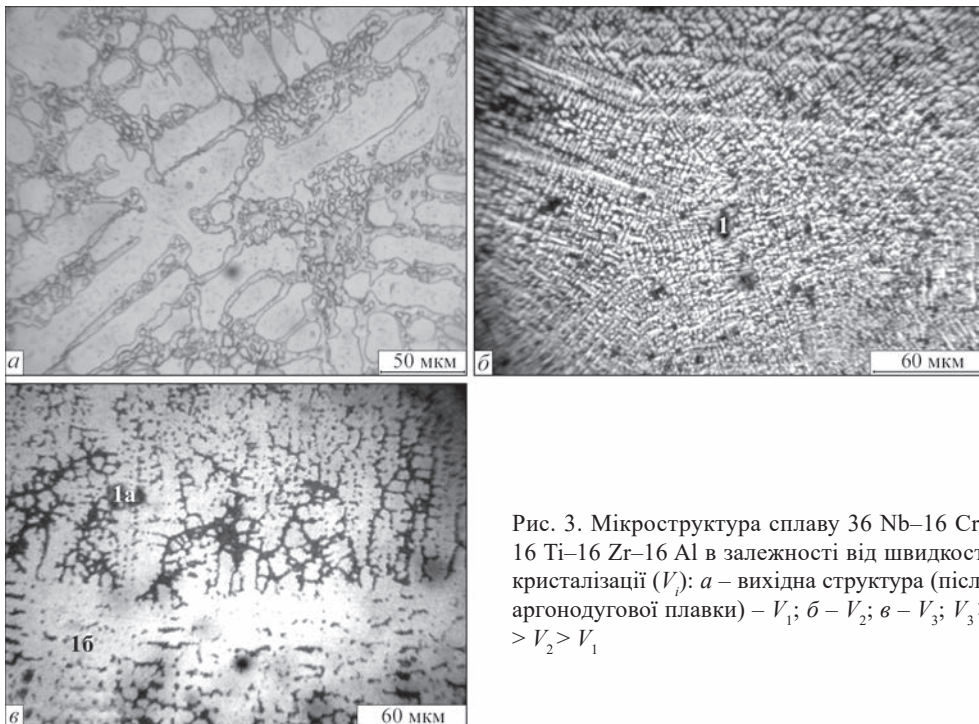


Рис. 3. Мікроструктура сплаву 36 Nb–16 Cr–16 Ti–16 Zr–16 Al в залежності від швидкості кристалізації ( $V$ ): а – вихідна структура (після аргонодугової плавки) –  $V_1$ ; б –  $V_2$ ; в –  $V_3$ ;  $V_3 > V_2 > V_1$

го випромінювання 400 Вт, швидкість зварювання 0,833 мм/с (50 мм/хв)), на поверхні ванни утворюється дрібнокристалітна структура (рис. 4, а, зона 1), яка відповідає кристалізації при швидкості  $V_2$  на рис. 3, б. На дні розплавленої ванни тепловідвід, і відповідно, швидкість охолодження, збільшується і у перехідній зоні у лінії сплавлення формується структура (рис. 4, а, зона 1-1), яка відповідає структурі, отриманій на рис. 3, в при швидкості охолодження  $V_3$ .

У зоні термічного впливу (ЗТВ) (рис. 4, а, зона 2), спостерігається збільшення розмірів дендритів. Зона 3 відповідає вихідній структурі матеріалу (рис. 4, а).

Зміна режиму зварювання, спрямована на підвищення значень параметрів (потужність лазерного випромінювання 1000 Вт, швидкість зварювання 16,67 мм/с (1000 мм/хв)), дозволяє проплавити стик пластин товщиною 1,8 мм на всю глибину (рис. 4, б) і здійснити зварювання по всьому стику. У цьому випадку зона 1 повного розплавлення має однорідну структуру. На дні ванни немає нерозплавленого металу, який пришвидшує відвід тепла, збільшує швидкість кристалізації і змінює структуру, що створюється. По всій товщині зварного стику у зоні 2 – ЗТВ (рис. 4, б) виявлено збільшення відстані між дендритами, яке сприймається як поява шару з підвищеним вмістом темної фази при переході від зони 1 – повного плавлення до зони 3 – вихідного матеріалу (рис. 4, б).

Підтвердженням часткового плавлення, тільки евтектики у ЗТВ, є ріст в процесі кристалізації розплаву дендритних гілок другого та третього порядку при охолодженні на нерозплавлених великих дендритах як центрах кристалізації (рис. 4, в). Швидкість кристалізації розплавленої евтектики вище, ніж у сплаві при аргонодуговій плавці. Про це свідчать більш дрібні зерна, які не розділяються у переплавленій евтектиці в зоні 2 як у вихідній зоні 3 на рис. 4, г. Вони створюють шорстку поверхню, розсіюють світло і сприймаються як суцільна темна фаза.

Отримані факти показують, що, з одного боку, зважаючи на особливості плавлення, сплав 36Nb–16Cr–16Ti–16Zr–16Al близький до евтектичних. Але з іншого боку, в ньому можуть при кристалізації випадати дендрити. Причому співвідношення кількості дендритів і евтектики може змінюватися в залежності від швидкості охолодження.

Пояснити таке поєднання властивостей можна наступним чином. У багатокомпонентних сплавах з високою ентропією змішення сповільнюються дифузійні процеси. Очевидно, це ускладнює досягнення рівноваги в процесі кристалізації. Відбувається виділення дендритів у вигляді нерівновісного, збагаченого ніобієм ОЦК твердого розчину. Зміна хімічного складу розплаву, відповідно, призводить до зміни хімічного складу фаз, що утворюють евтектику нового складу. За даними рентгенофазового аналізу можна зробити висновок, що евтектику утворює

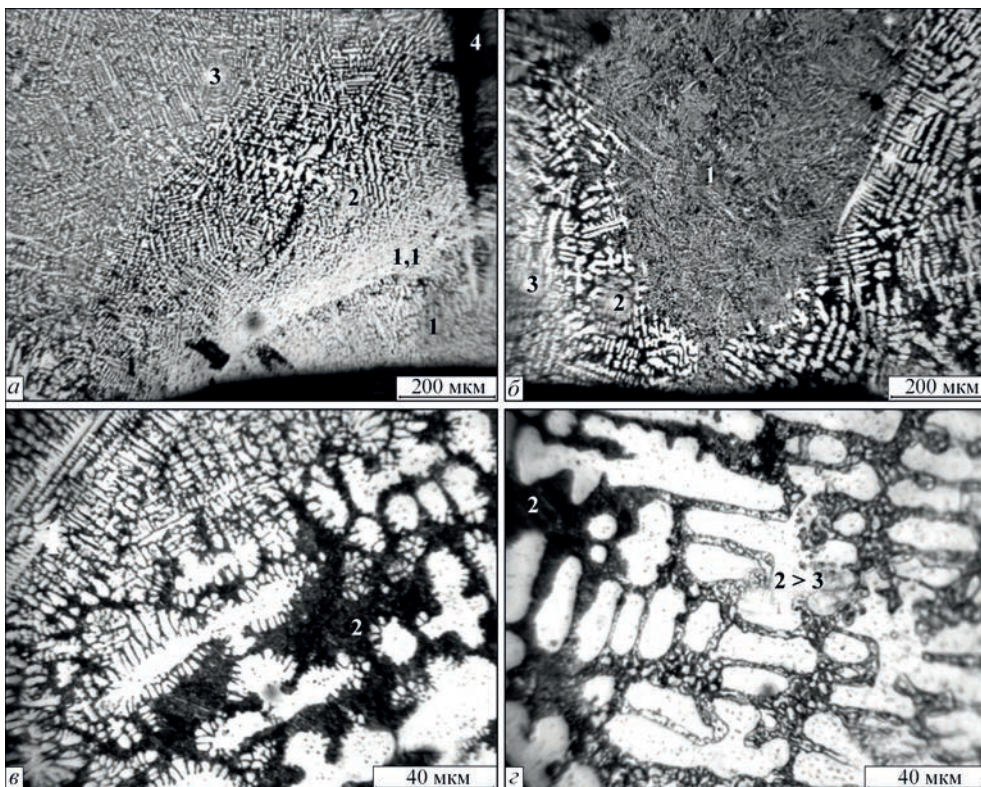


Рис. 4. Мікроструктура сплаву в зоні зварювання лазерним випромінюванням: а – потужність лазерного випромінювання 400 Вт, швидкість його руху 0,833 мм/с (50 мм/хв) при товщині зварюваних пластин 1,8 мм; б–г – потужність лазерного випромінювання 1000 Вт, швидкість його руху 16,67 мм/с (1000 мм/хв) при товщині зварюваних пластин 1,8 мм

ОЦК твердий розчин, збіднений по ніобію, і твердий розчин на основі фази Лавеса  $ZrCr_2$ . Зміна хімічного складу цих компонент може змінювати склад і властивості евтектики, що випадає. Таким чином, кінетика дифузійних процесів може приводити як до виділення дендритів в сплаві первинно евтектичного складу, так і до зміни співвідношення кількості дендритів і евтектики при його нерівноважній кристалізації в реальних умовах.

В результаті проведення механічних випробувань на одновісній статичний розтяг стикових з'єднань зразків зі сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$  встановлено, що місце руйнування щодо розташування шва змінюється зі зміною параметрів технологічних режимів лазерного зварювання. Місце руйнування виявилось неможливим спрогнозувати, спираючись тільки на особливості формування структури в області шва. Виникнення тріщини не було однозначно пов'язане з будь-якої встановленою структурною зоною (зони 1, 2, 3 на рис. 3 та 4). На ослаблення матеріалу, що призводить до руйнування, впливає особливість розподілу залишкових термічних напружень, що визначається режимом підведення і відведення тепла в процесі зварювання. На практиці необхідно або практично встановити вплив потужності лазерного випромінювання, швидкості зварювання і умов відведення тепла на зварювання конкретних деталей, або виконати моделювання температурного поля і термічних напружень, що виникають.

За результатами аналізу одержаних даних встановлено, що в залежності від значень параметрів режимів, можливими характерними видами дефектів лазерного зварювання для багатокомпонентного високоентропійного сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$  є: наявність тріщин (рис. 5) та мікротріщин у литій зоні шва та у ЗТВ; наявність сегрегації тугоплавких елементів по границям кристалітів; наявність усадочних раковин та раковин в кратері; наявність пор, ланцюгів пор; неспалення; непровари; підрізи; наявність перевищення випуклості.

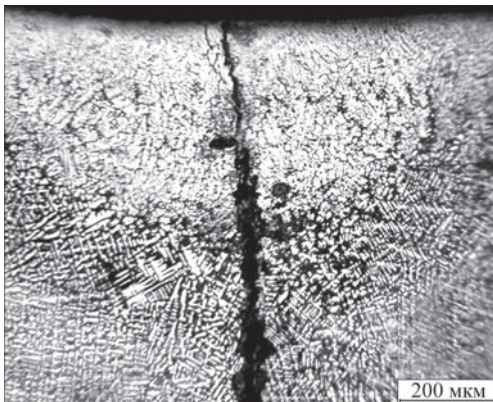


Рис. 5. Дефекти у вигляді тріщини та пор в зварному з'єднанні багатокомпонентного високоентропійного сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$  товщиною 1,8 мм, одержаного лазерним зварюванням при потужності лазерного випромінювання 400 Вт та швидкості зварювання 0,833 мм/с (50 мм/хв)

вин та раковин в кратері; наявність пор, ланцюгів пор; неспалення; непровари; підрізи; наявність перевищення випуклості.

Утворення більшості з вище перелічених дефектів пов'язано з особливістю нерівноважної кристалізації багатокомпонентних високоентропійних жароміцних сплавів. Для запобігання їх утворення доцільними є заходи з оптимізації технологічних параметрів, спрямовані на збільшення швидкості охолодження розплаву, з метою одержання більш рівноважної структури.

У разі неможливості вирішення проблеми утворення дефектів шляхом оптимізації параметрів процесу лазерного зварювання, необхідно вживати заходи щодо усунення цих дефектів:

- для усунення дефектів у вигляді пор, ланцюгу пор, неспалення, заниження шва, непроварів – переварювання шва, з додаванням присаджувального матеріалу (за необхідністю);

- для запобігання утворенню усадочних раковин та раковин в кратері – використання вивідних планок, а також програмного управління плавного наростання потужності лазерного випромінювання на початку зварювання та плавного спадання в кінці;

- для усунення підрізів, перевищення випуклості – виконання додаткового переплавлення розфокусованим випромінюванням.

## Висновки

Склад багатокомпонентного високоентропійного сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$  близький до евтектичних. Особливістю евтектичних багатокомпонентних сплавів є схильність до нерівноважної кристалізації з утворенням дендритів, збагачених тугоплавкими компонентами. Співвідношення кількості дендритів і евтектики може змінюватися в залежності від швидкості охолодження. За даними рентгенофазового аналізу, евтектику утворює ОЦК твердий розчин, збіднений по ніобію, і твердий розчин на основі фази Лавеса  $ZrCr_2$ . Полегшує нерівномірне виділення дендритів, очевидно, уповільнення дифузії в високоентропійних сплавах. Зі збільшенням швидкості охолодження розплаву сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$  схильний гартуватися з утворенням однофазної структури.

Утворення більшості дефектів у стикових з'єднаннях сплаву  $36Nb-16Cr-16Ti-16Zr-16Al$ , одержаних лазерним зварюванням, пов'язано з особливістю нерівноважної кристалізації багатокомпонентних високоентропійних жароміцних сплавів. Для запобігання їх утворення доцільними є заходи з оптимізації технологічних параметрів, спрямовані на збільшення швидкості охолодження розплаву, з метою одержання більш рівноважної структури.

Список літератури/References

- Boyer, R.R., Cotton, J.D., Mohaghegh, M., Schafrik, R.E. (2015). Materials considerations for aerospace applications. *MRS Bulletin*, 40, 12, 1055–1066. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.278>
- Sanin, V.N., Ikornikov, D.M., Andreev, D.E. et al. (2017). Synthesis of Cast High Entropy Alloys with a Low Specific Gravity by Centrifugal Metallothermic SHS-Methods. *Advanced Materials and Technologies*, 3, 24–33. DOI: <https://doi.org/10.17277/amt.2017.03.pp.024-033>
- Küpper, D., Heising, W., Corman, G. et al. (2017). *Get ready for industrialized additive manufacturing*. DigitalBCG, Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2017/lean-manufacturing-industry-4.0-get-ready-for-industrialized-additive-manufacturing>
- George, E.P., Raabe, D., Ritchie, R.O. (2019). High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 4, 8, 515–534. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>
- Senkov, O.N., Miracle, D.B., Chaput, K.J., Couzinie, J.P. (2018). Development and exploration of refractory high entropy alloys – A review. *Journal of materials research*, 33, 19, 3092–3128. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.153>
- Zhang, W., Liaw, P. K., Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 61, 1, 2–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- Chang, X., Zeng, M., Liu, K., Fu, L. (2020). Phase Engineering of High-Entropy Alloys. *Advanced Materials*, 32, 14, 1907226. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201907226>
- Yan, X., Zhang, Y. (2020). Functional properties and promising applications of high entropy alloys. *Scripta Materialia*, 187, 188–193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.06.017>
- George, E.P., Curtin, W.A., Tasan, C.C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*, 188, 435–474. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Senkov, O.N., Wilks, G.B., Scott, J.M., Miracle, D.B. (2011). Mechanical properties of Nb<sub>25</sub>Mo<sub>25</sub>Ta<sub>25</sub>W<sub>25</sub> and V<sub>20</sub>Nb<sub>20</sub>Mo<sub>20</sub>Ta<sub>20</sub>W<sub>20</sub> refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 19, 5, 698–706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.01.004>
- Brodnikovskiy, N.P., Kulakov, A.S., Krapivka, N.A. et al. (2016). *Electron Microscopy and Strength of Materials*, 22, 20–30. <http://www.materials.kiev.ua/publications/EMMM/2016/4.pdf>
- Zhao, Y.Y., Lei, Z.F., Lu, Z.P. et al. (2019). A simplified model connecting lattice distortion with friction stress of Nb-based equiatomic high-entropy alloys. *Materials Research Letters*, 7, 8, 340–346. DOI: <https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1610105>
- Panina E., Yurchenko N., Zhrebtsov S. et al. (2019). Laser beam welding of a low density refractory high entropy alloy. *Metals*, 9, 12, 1351. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121351>
- Lopes, J.G., Oliveira, J.P. (2020). A short review on welding and joining of high entropy alloys. *Metals*, 10, 2, 212. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10020212>
- Kang, B., Lee, J., Ryu, H.J., Hong, S.H. (2018). Ultra-high strength WNbMoTaV high-entropy alloys with fine grain structure fabricated by powder metallurgical process. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 616–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.021>

STRUCTURE OF LASER WELDED JOINTS OF MULTICOMPONENT HIGH-ENTROPY ALLOY OF Nb-Cr-Ti-Al-Zr SYSTEM

V.D. Shelyagin<sup>1</sup>, A.V. Bernatskiy<sup>1</sup>, O.V. Siora<sup>1</sup>, V.I. Bondarieva<sup>1</sup>, M.P. Brodnikovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150 Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine. 3 Krzhyzhanovskiy Str., 0312, Kyiv.

In the work the authors studied the problems of laser welding of joints of high-entropy alloy of Nb–Cr–Ti–Al–Zr system. The results of differential thermal analysis of the initial material are presented. Results of X-ray phase analysis of the alloy were analyzed. A conclusion was made about existence of bcc solid solution based on niobium and solid solution based on ZrCr<sub>2</sub> intermetallics in the alloy, as well as existence of two niobium-based solid solutions with different chemical composition in the alloy. Analysis of the influence of alloy crystallization rate on its microstructure was performed. It is shown that the ratio of the quantity of dendrites and eutectic can change, depending on the cooling rate. Obtained investigation results on formation of a dendrite structure were further used at optimization of laser welding modes. In this work the authors studied the influence of such parameters as radiation power and laser welding speed on weld microstructure formation. Mechanical properties of butt joints at uniaxial static tension were studied. It was found that material softening which leads to destruction, is influenced by the feature of distribution of residual thermal stresses that is determined by the mode of heat input and removal during welding. It is shown that formation of the majority of the defects is related to a feature of nonequilibrium crystallization of multicomponent high-entropy high-temperature alloys. In order to prevent their formation, it is rational to take measures for optimizing the technology parameters, aimed at increasing the melt cooling rate, in order to produce a more equilibrium structure. 15 Ref., Fig. 5.

*Keywords: multicomponent high-entropy alloy, laser welding, butt joints, structure, mechanical properties, defects*

Надійшла до редакції 21.04.2021

Нова книга



**Электронно-лучевая сварка. Технологии. Оборудование. Материалы:** Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН Украины В.М. Нестеренкова. — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2021. — 390 с.

Сборник включает 38 статей сотрудников отдела «Физические процессы, техника и оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 2011–2020 гг. В нем обобщен опыт научно-исследовательской и инженерной деятельности отдела в области электронно-лучевой сварки. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами соединения металлов с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы электронно-лучевой сварки и родственных процессов.