

УДК 621.791.722:669.245:539.424

Олександр Яровицин, к.т.н., с.д.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Юрій Никитенко, к.т.н., с.д.; Едуард Вржижевський; Іван Волосатов; Олександр Наконечний

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України

ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ НІКЕЛЕВОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ INCONEL 718, ВИКОНАНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Для умов електронно-променевого зварювання нікелевого жароміцного сплаву Inconel 718 товщиною 12 мм апробовано ресурсозберігаючу методику оцінки деформаційної здатності зварного з'єднання, що характеризує його опірність до гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking”. На базі випробувань на статичний розтяг мініатюрних плоских пропорційних зразків в діапазоні температур 20-1100°C оцінено його комплекс короточасних механічних властивостей та досліджена мікроструктура. Ключові слова: нікелевий жароміцний сплав; електронно-променеве зварювання; короточасні механічні властивості; температура

Oleksandr Yarovytsyn, PhD, Lead. Res., Mykola Chervyakov, Doct. of Techn. Sc., Lead. Res., Yuriy Nikitenko, PhD, Lead. Res., Eduard Wrzhyzhevskyi, Ivan Volosatov, Oleksandr Nakonechny

ASSESSING OF THE DEFORMATION CAPACITY OF ELECTRON BEAM WELDED JOINT OF NICKEL-BASED SUPERALLOY INCONEL 718

For the electron beam welding of nickel-based superalloy Inconel 718, a resource-saving methodology for assessing its deformation capacity joint has been tested, which characterizes its resistance to hot cracks according to the “solid state cracking” mechanism.

Keywords: nickel-based superalloy, electron-beam welding, short-term mechanical properties, temperature

Вступ. Нікелевий жароміцний сплав Inconel 718 призначений для роботи до 650-700 °C та порівняно з іншими дисперсно-зміцненими сплавами на основі нікелю має задовільну зварюваність. Відомо [1-5], що в діапазоні товщин 2-14 мм цей сплав може якісно зварюватися електронно-променевим зварюванням. Попри значну кількість опублікованих робіт причини достатньої опірності сплаву Inconel 718 до утворення гарячих тріщин при променевих способах зварювання наразі з'ясовані недостатньо. Ця робота присвячена уточненню закономірностей опірності сплаву Inconel 718 до утворення гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking” [6-7], обумовлених зниженням високотемпературної пластичності в типових зонах зварного з'єднання. Згідно сучасних уявлень [6-7] механізм “solid state cracking” поширюється на тріщини “ductility dip cracking” (термінологія ISO/TR 25901-1) та тріщини типу “strain-age cracking (SAC)” (нестандартизована термінологія), до яких стосовно умов однопрохідного електронно-променевого зварювання можна віднести тріщини типу “post weld heat treatment (PWHT) cracking”.

Методика досліджень. На пластині з нікелевого жароміцного сплаву Inconel 718 товщиною 12 мм та розмірами 50×105 мм (стан поставки, після термічної обробки: 979°C - 1,5 год.+ охолодження водою; 721°C - 8 год. + охолодження на повітрі зі швидкістю 50 °C/год. до 624 °C та подальша витримка 8 год.) виконано наскрізне проплавлення електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ), що імітувало стикове

зварне з'єднання (рис. 1-а). Параметри процесу ЕПЗ складали: $U = 60$ кВ, $I = 120$ мА, $v = 36$ м/год.; розгортка променю еліптична 3×4 мм. Після шліфування верхньої (до видалення западини шву) та нижньої поверхонь пластини на глибину до 1,5 мм виконано капілярний контроль (рис. 1-б), що показав відсутність дефектів у центральній частині зразка. Надалі пластина з ЕПЗ була розрізана навпіл та одна з її частин пройшла вакуумну термічну обробку за режимом 850°C -5 год. та додатковий капілярний контроль аналогічно показав відсутність дефектів. З обох половин пластини електроерозійною різкою на верстаті DK7732 виготовлено мініатюрні плоскі пропорційні зразки [8], розташовані в 3 шари по товщині пластини (рис. 1-в). Поверхня вирізаних зразків доопрацьовувалась чистовим шліфуванням, поліруванням та перевірялась капілярним контролем на відсутність дефектів. Випробування виготовлених зразків на одновісний статичний розтяг проводили на сервогідролінійній машині MTS 810.50 з комп'ютерним контролем при 20 - 1100°C для встановлення температурної залежності міцнісних характеристик досліджуваного зварного з'єднання у наступних структурних станах: "as welded" (термінологія ISO/TR 25901-1) для оцінки опірності стикового зварного з'єднання ЕПЗ до утворення гарячих тріщин за механізмом "solid state cracking"; після термічної обробки за режимом 850°C - 5 год. для оцінки опірності утворенню гарячих тріщин типу "strain-age cracking"/"post weld heat treatment cracking" й уточнення закономірностей технологічної спадковості.

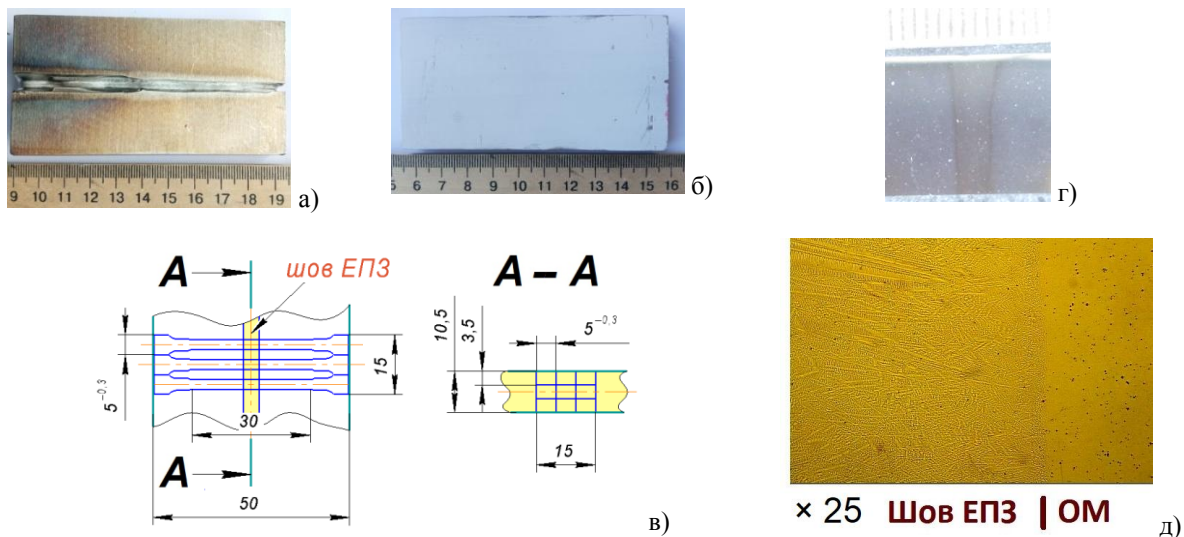


Рисунок 1. Зовнішній вид: а – пластини сплаву Inconel 718 з імітованим ЕПЗ-швом; б – при капілярному контролі (кольорова дефектоскопія) після її шліфування; в – схеми розкрою пластини на мініатюрні плоскі пропорційні зразки; г, д – макро- та мікроструктури ЕПЗ-шву

В поперечному перерізі зварного шву виконано металографічні дослідження методом оптичної та растрової електронної мікроскопії для уточнення розмірів шву, контролю відсутності мікротріщин та вивчення особливостей мікроструктури.

Результати та їх аналіз. Металографічний аналіз в поперечному перерізі ЕПЗ-шву та його зони термічного впливу (5 шліфів) мікротріщин не виявив. Експериментальні дані для основного металу (ОМ) та ЕПЗ-шву сплаву Inconel 718 представлено: на рис. 2 – показники короточасних механічних властивостей в залежності від температури 20 - 1100°C ; на рис. 3 – особливості мікроструктури.

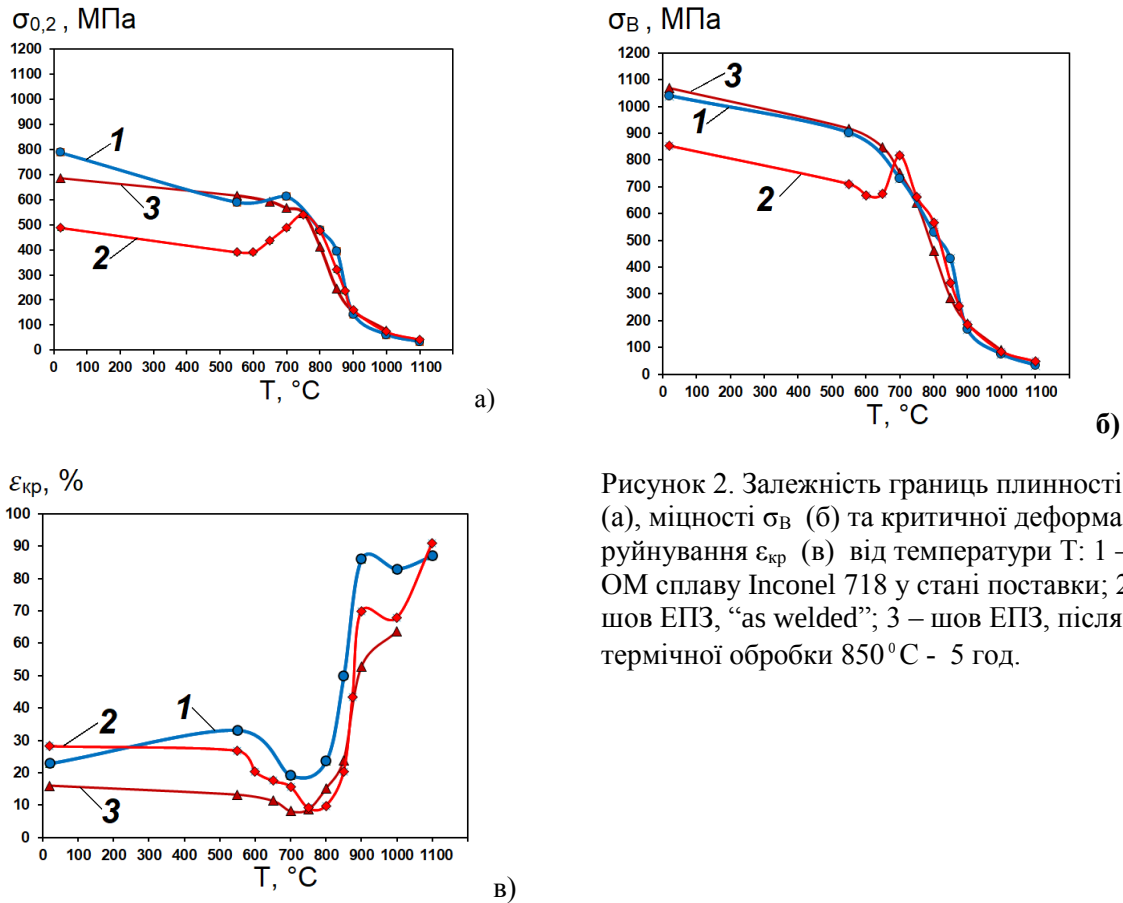


Рисунок 2. Залежність границь плинності $\sigma_{0,2}$ (а), міцності σ_b (б) та критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр}$ (в) від температури T : 1 – ОМ сплаву Inconel 718 у стані поставки; 2 – шов ЕПЗ, “as welded”; 3 – шов ЕПЗ, після термічної обробки 850 °С - 5 год.

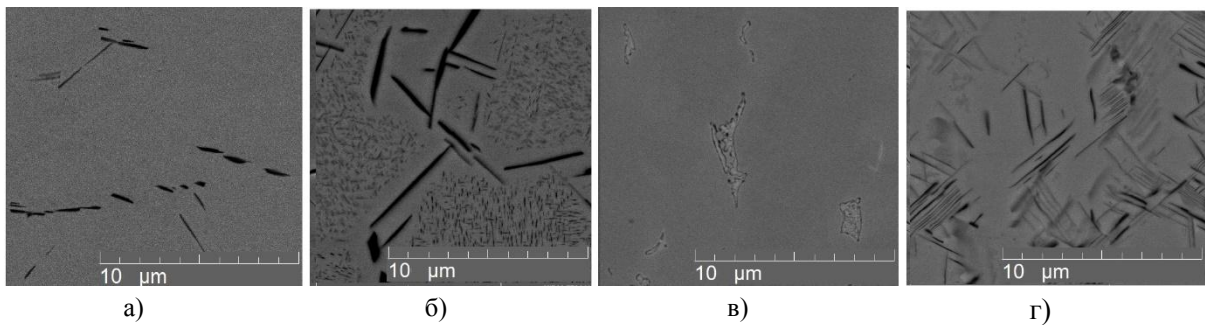


Рисунок 3. Особливості мікроструктури ОМ (а, б) та ЕПЗ-шву (в, г) при растровій електронній мікроскопії при фазовому контрасті BSE: а,в – “as welded”; б, г – після термічної обробки 850 °С - 5 год.

Встановлено, що після ЕПЗ зварне з'єднання до 700-750 °С має нижчі механічні властивості ніж ОМ сплаву Inconel 718: границя міцності $\sigma_b \approx 0,8$, а границя плинності $\sigma_{0,2} \approx 0,6-0,8$. Залежність критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр}$ від температури для ОМ та ЕПЗ-шву має три характерних ділянки: середньої пластичності з $\epsilon_{кр}$ 23-33 % до 600-650 °С; провалу пластичності при 650-800 °С, де мінімальні значення $\epsilon_{кр}$ досягають для ОМ ~ 19 % та для ЕПЗ-шву $\sim 9,5$ %; високої пластичності при понад 850 °С, де $\epsilon_{кр}$ становить 50-91 %. Висока опірність утворенню гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking” пов'язується з $\epsilon_{кр} > 9\%$. Термічна обробка 850 °С - 5 год. підвищує границі міцності та плинності ЕПЗ-шву при температурах до

650-750 °C до рівня не менше 0,87 відносно ОМ сплаву Inconel 718, але знижує $\epsilon_{кр}$ до рівня 8-16 %, що все ще забезпечує опірність тріщинам типу *strain-age cracking* / *post weld heat treatment cracking* ($\epsilon_{кр} > 8$ %). Дослідження мікроструктури растровою електронною мікроскопією показали, що в міждендритних проміжках ЕПЗ-шву у структурному стані “as welded” знаходяться поодинокі острівці фаз Лавеса та евтектик фаз Лавеса/ γ -матриця, а після термічної обробки 850 °C - 5 год. вже спостерігається інтенсивне виділення високодисперсної голчастої δ -фази, подібне до наведених в [1, 3] для ЕПЗ-шву після гомогенізації та подвійного низькотемпературного старіння. Виділення високодисперсної голчастої δ -фази відмічаються після цієї термічної обробки також і в середині зерен ОМ сплаву Inconel 718.

Висновки. Встановлено, що для ЕПЗ-шву сплаву Inconel 718 в діапазоні 600-800 °C присутній інтервал провалу пластичності з мінімальними значеннями критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр} = 8-10$ %. Він обумовлений технологічною спадковістю від ОМ. Показано, що відома достатньо висока опірність такого ЕПЗ-шву до утворення гарячих тріщин за механізмом “*solid state cracking*” співвідноситься зі значеннями $\epsilon_{кр}$ в поперечному напрямку не менше 8-9 %. Показано, що його термічна обробка за режимом високотемпературного старіння 850 °C - 5 год. підвищує значення показників границь плинності та міцності на 10-35 % до 700-750 °C та обмежує його $\epsilon_{кр}$ до 8-16 %.

Перелік посилань

- 1 Gao Peng, Zhang Kai-feng, Zhang Bing-gang, Jang Shao-song, Zhang Bao-wei. Microstructures and high temperature mechanical properties of electron beam welded Inconel 718 superalloy thick plate. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (2011). Vol. 21, P. s315-s322.
- 2 M. Aglian, T. Venkateswaran, D. Sivakumar, Bhanu Pant. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Inconel-718 EB welds. Procedia Materials Science (2014). Vol. 5, P. 656-662 <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.312>
- 3 Yoshinori Onoa, Tetsumi Yuria, Nobuo Nagashimaa, Hideshi Sumiyoshia, Toshio Ogataa, Naoki Nagaob High-cycle fatigue properties of Alloy718 base metal and electron beam welded joint. Physics Procedia (2015). Vol. 67, P. 1028 – 1035. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.196>
- 4 Sumit K. Sharma, K. Biswas, and J. Dutta Majumdar. Effect of Heat Input on Mechanical and Electrochemical Properties of Electron-Beam-Welded Inconel 718. Journal of Materials Engineering and Performance (2020). Vol. 29, P. 1706–1714. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04660-w>
- 5 Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, and Wayne Hunga. Electron beam welding of Inconel 718. Procedia Manufacturing (2020). Vol. 48, P. 428–435 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
- 6 J. F. S. Markanday. Applications of alloy design to cracking resistance of additively manufactured Ni-based alloys. Materials science and technology (2022). Vol. 38, Is. 16, P. 1300-1314, <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2068759>
- 7 DuPont J.N., Lippold J.C., Kiser S.D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys (2009). John Wiley & Sons, 440 p.