

УДК 620.175.2:669.15

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.270922.28.902

## ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У РЕЗУЛЬТАТІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

КАЛІНІНА Н. Є.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
НОСОВА Т. В.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ЦОКУР Н. І.<sup>3\*</sup>, *аспір.*,  
ГЛУШКОВА Д. Б.<sup>4</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
КИРИЧЕНКО І. Г.<sup>5</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ДЕМЧЕНКО С. В.<sup>6</sup>, *інж.*

<sup>1</sup> Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com), тел. +38 (095) 550-28-00, ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

<sup>2</sup> Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [amaretanya0512@gmail.com](mailto:amaretanya0512@gmail.com), тел. +38 (096) 570-69-35, ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

<sup>3\*</sup> Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [nat.tsokur@gmail.com](mailto:nat.tsokur@gmail.com), тел. +38 (098) 071-80-08

<sup>4</sup> Кафедра технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (097) 481-15-93, ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>5</sup> Кафедра технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (097) 481-15-93, ORCID ID: 0000-0002-2128-3500

<sup>6</sup> Кафедра технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), тел. +38 (095) 465-44-78

**Анотація.** Для виготовлення деталей та вузлів турбонасосного агрегата ракетного двигуна застосовуються зварні з'єднання з корозійностійкими сталями та жароміцними сплавами, що потребують різних режимів термічної обробки для досягнення рівня механічних властивостей, зазначеного у конструкторській документації. **Постановка проблеми.** У процесі виготовлення деталей та вузлів ракетних двигунів виникли певні труднощі під час постачання матеріалів із країн ЄС, на машинобудівних підприємствах України постала потреба заміни напівфабрикатів. Необхідна заміна листового прокату з високолегованих сплавів ХН67МВТЮ та 06Х15Н6МВФБ на один сплав із високим комплексом фізико-механічних характеристик. **Матеріали та методи.** У роботі як заміну жароміцних сплавів обрано сплав Inconel 718 у зварному з'єднанні зі сталлю 316L. **Результати.** В результаті порівняльних досліджень стійкості до міжкристалітної корозії зварних з'єднань жароміцного сплаву Inconel 718 з нержавіючою сталлю після різних режимів термічної обробки рекомендовано режим низькотемпературного нагрівання при паянні за температури 950 °С. Зразки зварних з'єднань, оброблені за рекомендованим режимом, показали підвищену корозійну стійкість. **Наукова новизна.** Встановлено, що чутливість до міжкристалітної корозії проявляється внаслідок структурної неоднорідності меж зерен, виділення вторинних фаз. **Практична значимість.** На основі експериментальних досліджень рекомендовано режим термічної обробки з нагрівом до 950 ± 10 °С, охолодження до 300 °С – з піччю, далі – на повітрі, замість існуючого високотемпературного нагріву до 1 200 °С, що сприяє енергозбереженню під час зварювання сплавів.

**Ключові слова:** жароміцний сплав; корозійна стійкість; міжкристалітна корозія; зварювання; структура; паяння

## INCREASING CORROSION RESISTANCE OF WELDED JOINTS AS A RESULT OF HEAT TREATMENT

KALININA N.Ye.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
NOSOVA T.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
TSOKUR N.I.<sup>3\*</sup>, *Postgraduate Student*,  
GLUSHKOVA D.B.<sup>4</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KIRICHENKO I.G.<sup>5</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
DEMCHENKO S.V.<sup>6</sup>, *Eng.*

<sup>1</sup> Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: [kalinina.dnu@gmail.com](mailto:kalinina.dnu@gmail.com), tel. +38 (095) 550-28-00, ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

<sup>2</sup> Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: [amaretanya0512@gmail.com](mailto:amaretanya0512@gmail.com), tel. +38 (096) 570-69-35, ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

<sup>3\*</sup> Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: [nat.tsokur@gmail.com](mailto:nat.tsokur@gmail.com), tel. +38 (098) 071-80-08

<sup>4</sup> Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Road University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (0970) 481-15-93, ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>5</sup> Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Road University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (097) 481-15-93, ORCID ID: 0000-0002-2128-3500

<sup>6</sup> Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Road University, 25, Yaroslava Mudroho St., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), tel. +38 (095) 465-44-78

**Abstract.** Welded joints with corrosion-resistant steels and heat-resistant alloys, which require different modes of heat treatment to achieve the level of mechanical properties specified in the design documentation, are used for the manufacture parts and assemblies of the rocket engine turbopump unit. **Problem statement.** In the production of rocket engine parts and components, due to difficulties in supplying materials from EU countries, Ukrainian machine-building enterprises have to substitute semi-finished products. It is necessary to replace sheet metal from high-alloy alloys with one alloy with a high complex of physical and mechanical characteristics. **Materials and methodology.** Inconel 718 alloy is selected as a substitute for heat-resistant alloys in welded joints with 316L steel. **Results.** As a result of comparative studies for resistance to intergranular corrosion of welded joints of heat-resistant alloy Inconel 718 with stainless steel after different modes of heat treatment the regime of low-temperature heating during soldering at 950 °C is recommended. Samples of welded joints treated according to the recommended mode showed increased corrosion resistance. **Scientific novelty.** The sensitivity to intergranular corrosion was found to result from the structural heterogeneity of the grain boundaries and the separation of secondary phases. **Practical value.** On the basis of experimental researches the mode of heat treatment with heating to 950 ± 10 °C, cooling to 300 °C – with the furnace, further – in air, instead of existing high-temperature heating to 1 200 °C is recommended, that promotes energy saving at welding of alloys.

**Keywords:** heat resistant alloy; corrosion resistance; intergranular corrosion; welding; structure; soldering

## Вступ

Основні експлуатаційні властивості деталей та вузлів турбонасосного двигуна (ТНА) – це жароміцність, тривала міцність та корозійна стійкість [1; 3]. Ці вимоги досягаються підбором матеріалів, технології їх отримання та подальшої обробки. Термічні дії у процесі зварювання та термічної обробки впливають на структуру сплавів, змінюючи експлуатаційні властивості [6]. Тому в роботі досліджено термічний вплив на корозійну стійкість зварних з'єднань основних поєднань матеріалів, що застосовуються під час виготовлення ракетноносіїв. Оскільки більшість деталей і вузлів ТНА піддаються паянню та зварюванню в різних послідовностях, у роботі розглянуто проведення паяння жароміцного сплаву стрічковим припоєм після зварювання з корозійностійкою сталлю. У роботі вивчено різні термічні впливи при паянні на зварний

шов для імітації умов виготовлення реальних вузлів [4].

## Матеріали та методи

Матеріалами дослідження обрано жароміцний сплав аустенітного класу Inconel 718 системи Fe–Cr–Ni та корозійностійкі сталі 12X18H10T та SLS 316L. Сплав Inconel 718 є жароміцним нікелевим сплавом системи Fe–Cr–Ni та використовується у ракетній техніці для виготовлення сорочок камер згорання ракетних двигунів, деталей турбонасосних агрегатів та інших виробів відповідального призначення [8]. Сплав застосовується в діапазоні температур від –252,8 °C до +704,4 °C, у хімічно активних газових середовищах стійкий до температури +980 °C [5].

Сталь 316L – конструкційна криогенна сталь аустенітного класу. Вона стійка до корозії в агресивних середовищах, а також до більшості зовнішніх впливів, має

властивість зберігати цілісність структури у разі підвищення та зниження температур [2]. Досліджувані зразки із сталі 316L отримані методом адитивних технологій із порошкової сировини [9].

Випробування та дослідження виконані на устаткуванні машинобудівного підприємства. Випробування на МКК проводили методом «АМ», ГОСТ 6032-89 [6]: зварні зразки кип'ятили 24 години у розчині сірчаної кислоти з додаванням мідного купоросу та мідної стружки, потім зразки вигинали на  $90^{\circ}$  та контролювали місце вигину зовнішнім оглядом, металографічним методом на мікроскопах МБС та Neophot-2 при збільшенні до 200 разів. Зразки розміром  $5 \times 10$  мм для виготовлення металографічних шліфів вирізали із ділянок вигину зразків на МКК. Термообробку виконували в термічній силітовій печі СП-1300, імітацію паяння припоєм Г70НХ проводили з проходженням повного режиму паяння за типовим технологічним процесом, зварювання – зварювальним апаратом САНЕ-2М.

### Результати та їх обговорення

*Підготовка під зварювання.* Кожна заготовка перед зварюванням проходила візуальний контроль на наявність окисних плівок, вибоїн, контроль геометрії та перевірку магнітом. Відповідно до ГОСТ 92-1152-75, безпосередньо перед зварюванням кожну зварну кромку зачищали від окисних плівок після термічної обробки та знежирювали розчинником типу «нефрас».

*Технологія зварювання.* Заготовки зварювали ручним аргонодуговим зварюванням за режимом, рекомендованим компанією-виробником Nicrofer:  $I = 140$  А, витрата аргону: на захист 15 л/хв, на піддув 5л/хв. Для зварювання в атмосфері захисних газів застосовували аргон 1-го сорту (об'ємна частка аргону – 99,90 %, кисню – 0,005 %, азоту – 0,10 %, парів води при 760 мм рт. ст.  $0,03$  г/м<sup>3</sup>) [4].

*Обробка зварюваного шва.* Для видалення окисної плівки та кольорів втечі поверхню зварного шва та навколошовної зони обробляли до параметра шорсткості

Rz 40, всі зварні з'єднання пройшли рентгеноконтроль на наявність дефектів зварювання. Після зварювання зразки-заготовки з технологічного процесу виготовлення направляли на паяння стрічковим припоєм Г70НХ (припій містить 70 % Mg, а також додаткові компоненти – нікель, хром).

Паяння проводили за двома режимами:

– нагрівання до  $950 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , витримка 30 хвилин з моменту завантаження в піч, охолодження до  $300^{\circ}\text{C}$  – з піччю, далі – на повітрі.

– нагрівання до  $1\ 200 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , витримка 20 хвилин із моменту завантаження в піч, охолодження до  $300^{\circ}\text{C}$  – з піччю, далі – повітря.

*Визначення стійкості до МКК.* Для визначення стійкості до МКК випробуванню піддаються зварні зразки або зразки після спеціальної термічної обробки, що провокує виникнення МКК. Режим провокуючої обробки залежить від структурного класу сталі та для стандартних методів випробувань та стандартних сталей, зазначений ГОСТ 6032-89 [1]. Для нових стандартизованих сталей метод контролю МКК вибирається з урахуванням середовища, на яку призначена сталь.

Дослідження зварних зразків сплав Inconel 718 – нержавіючі сталі на стійкість до МКК вироблялося з боку сталі. Поверхню сталі 316L у зоні зварного шва досліджували у стані поставки, без зачистки поверхні. Результати дослідження наведені в таблиці.

Склад реактиву травлення: вода –  $1\ 000$  см<sup>3</sup>, сірчаноокисла мідь 130,0 г, сірчана кислота 120,0 г. Відповідно до вимог ГОСТ зразок вважається стійким, якщо глибина МКК не перевищує 0,03 мм. Підвищена травність бракувальною ознакою не є, але вказує на схильність матеріалу до корозії (табл.). У разі виявлення МКК з підтравленням шліфу слід пам'ятати, що межі зерен термодинамічно активніші і травляться сильніше, ніж решта поверхні зерна, тому перетравлені межі зерен може бути прийняті за МКК.

Результати випробувань на міжкристалітну корозію

Ум. № зр.	Матеріал	Режим Т/О	Глибина МКК, мм	Висновок
132	STS 316L – Inconel 718	Імітація паяння 950 °С+ старіння	МКК відсутня (підвищена травність на глибину до 0,33 мм)	Стійкий
133		Імітація паяння 1 200 °С + старіння		
151	12Х18Н10Т – Inconel 718	після зварювання: імітація паяння 1 210 °С + старіння	0,24	Нестійкий
141		імітація паяння 950 °С + старіння	0,17, (підвищена травність на глибину до 0,23 мм)	
2		імітація паяння 950 °С + старіння	0,07, (підвищена травність на глибину до 0,14 мм)	

Проводили зовнішній огляд, а також металографічне дослідження зі збільшенням до 200 разів поверхні зварних зразків із боку сталі 316L до випробувань на схильність до МКК. Установлено, що поверхня зразків з вихідного боку шорстка з наявністю заглиблень і виступів довгастої та округлої форми, інший бік після механічного зачищення гладкий, злегка шорсткий.

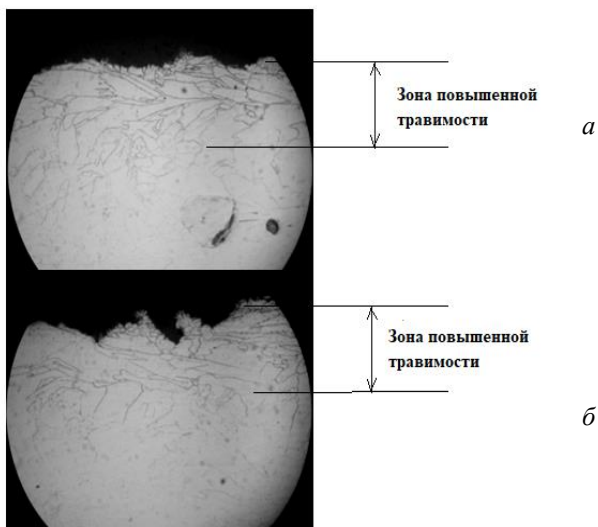


Рис. Підвищена травність кордонів зерен поверхні зразка з боку сталі 316L,  $\times 200$

Під час мікродослідження у перерізах досліджених зразків №№ 132, 133 міжкристалітної корозії не виявлено. З поверхні на глибину до 0,33 мм спостерігалася підвищена травність меж зерен за рахунок випадання по них різних оксидних включень. Виявлено при зовнішньому огляді з боку вихідної поверхні зразків № 132 (рис. а) та № 133 (рис. б) заглиблення в перерізах до 0,08 мм (рис.).

Підвищена травність меж зерен сталі 316L вказує на схильність сплаву до міжкристалітної корозії, але не є його визначенням. У разі виявлення підвищеної травності меж зерен щодо структури сталі, слід відмічати її глибину. Підвищена травність меж зерен поблизу кромки зразка також виникає при електролітичному травленні через більш високу щільність струму біля кромки.

Чутливість до міжкристалітної корозії проявляється внаслідок структурної неоднорідності меж зерен, виділення вторинних фаз, збіднення або збагачення прилеглих ділянок  $\alpha$ -твердого матричного розчину легуючих елементів, утворення субмікро- та мікропорожнин через стік та коагуляцію вакансій.

### Висновки

1. Проведено порівняльне дослідження схильності до МКК зварних з'єднань сплаву Inconel 718 з нержавіючими сталями за різних температур паяння.

2. Дослідження зварних зразків жароміцного сплаву з нержавіючою сталлю на стійкість до МКК показало, що зварні з'єднання сплаву Inconel 718 зі сталлю 12Х18Н10Т і зі сталлю 316L після високотемпературних нагрівань за 1 200 °С при паянні в агресивних середовищах застосовувати небажано.

3. Рекомендований режим термообробки зварних зразків: нагрівання до  $950 \pm 10$  °С, витримка 30 хвилин, охолодження до 300 °С – з піччю, далі – на повітрі.

4. Зварні зразки сплаву Inconel 718 зі сталлю 316L, оброблені за рекомендованим режимом термообробки, показали високу стійкість до МКК.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое издание. Материалы и технологии. Т. 2, кн. 1. Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. Киев : Наукова думка, 2008. 854 с.
2. Bolshakov V. I., Dvorkin L. L. Structure and Properties of Building Materials. Switzerland : TTP, 2016. 220 p.
3. Кузнецов В. П., Лесников В. П., Попов Н. А. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов : учеб. пособ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 160 с.
4. Логунов А. В., Шмотин Ю. Н., Лещенко И. А., Старков Б. Ю. Моделирование и разработка новых жаропрочных сплавов. Ч. 1. 2013. № 5 (89). С. 24–27.
5. Меркулова Г. А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов : учеб. пособ. Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.
6. Легирование сплавов на никелевой основе. URL: <http://mitalolom.ru/2012/04/13/2-legirovanie-splavov-na-nikelevoj-osnove>
7. ДСТУ EN 10002–1:2006. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 40 с.
8. Paul C. P., Ganesh P., Mishra S. K., Bhargav P., Negi J., Nath A. K. Laser Technol. 2007. Opt. 39. Pp. 800–805.
9. Ram G. D. J., Reddy A. V., Rao K. P., Reddy G. M., Sundar J. K. S. Process Technol. 2005. Mater 167. Pp. 73–82.

### REFERENCES

1. *Neorganicheskoye materialovedeniye. Entsiklopedicheskoye izdaniye. Materialy i tekhnologii* [Inorganic materials science. Encyclopedic edition. Materials and technologies]. Vol. 2, iss. 1. Edited by Gnesina G.G. and Skorokhoda V.V. Kyiv : Scientific Opinion, 2008, 854 p. (in Russian).
2. Bolshakov V.I. and Dvorkin L.L. Structure and Properties of Building Materials. Switzerland : TTP, 2016, 220 p.
3. Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P. and Popov N.A. *Struktura i svoystva monokristallicheskiykh zharoprochnykh nikelovykh splyavov : uchebnoye posobiye* [Structure and properties of single-crystal heat-resistant nickel alloys : textbook]. Yekaterinburh : Ural. Un-ter Publ., 2016, 160 p. (in Russian).
4. Logunov A.V., Shmotin Y.N., Leshchenko I.A. and Starkov B.Y. *Modelirovaniye i razrabotka novykh zharoprochnykh splyavov* [Modeling and development of new heat-resistant alloys]. 2013, part 1, no. 5 (89), pp. 24–27. (in Russian).
5. Merkulova G.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh splyavov : uchebnoye posobiye* [Metal science and heat treatment of non-ferrous alloys : textbook]. Krasnoyarsk : Sib. Feder. Un-ter Publ., 2008, 312 p. (in Russian).
6. *Legirovaniye splyavov na nikelovoy osnove* [Alloying nickel-based alloys]. URL: <http://mitalolom.ru/2012/04/13/2-legirovanie-splavov-na-nikelevoj-osnove> (in Russian).
7. *DSTU EN 10002–1:2006. Materialy metalevi. Vyprobuvannya na roztyah* [DSTU EN 10002–1: 2006. Metal materials. Tensile tests]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukraine, 2006, 40 p. (in Ukrainian).
8. Paul C.P., Ganesh P., Mishra S.K., Bhargav P., Negi J. and Nath A.K. Laser Technol. 2007, Opt. 39, pp. 800–805.
9. Ram G.D.J., Reddy A.V., Rao K.P., Reddy G.M. and Sundar J.K.S. Process Technol. 2005, Mater 167, pp. 73–82.

Надійшла до редакції: 25.08.2022.