

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА ЭП718, ПОЛУЧЕННЫХ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Р. В. НИКИФОРОВ¹, В. Р. ГАЛИМОВ², Э. Р. ХИСАМУТДИНОВ³,
Р. Р. КАМАЛЕТДИНОВА⁴, Р. Р. БАШАРОВ⁵

¹nikiforov_svarka@mail.ru, ²galimov.vitalij-r01@net.ugatu.su, ⁴miracle4458@gmail.com, ⁵3rash@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 28.09.2021

Аннотация. Представлены результаты механических испытаний сварных соединений сплава ХН45МВТЮБР (ЭП718), полученных роботизированной сваркой плавящимся электродом (СПЭ) с пониженным тепловложением. По результатам исследования было установлено, что статическая прочность сварных соединений ЭП718, полученных роботизированной сваркой плавящимся электродом как при нормальной, так и при повышенной температуре (650 °С), находится на уровне требований, предъявляемых к соединениям, получаемым аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом проволокой ЭП 533.

Ключевые слова: жаропрочные, никелевые сплавы; сплав ХН45МВТЮБР; роботизированная сварка; сварка плавящимся электродом с поперечными колебаниями; микроструктура; околошовная зона; механические свойства; сварные соединения.

ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные сплавы на основе никеля применяются в авиастроении и энергетике для изготовления нагруженных деталей и узлов, работающих при высоких температурах. Одним из примеров материалов данной группы является сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718), применяемый при температурах до 700 °С (кратковременно до 800 °С). Его применение для изготовления сварных конструкций осложнено склонностью к образованию горячих трещин различной природы, причем не только в металле шва, но и в околошовной зоне (ОШЗ), а также ростом зерна и разупрочнением металла в ОШЗ [1–3].

Для сварки рассматриваемого сплава в авиадвигателестроении применяются технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) и ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с присадочной проволокой (АрДС). Технология ЭЛС (благодаря высокой концентрации тепла в источнике) позволяет формировать мелкозернистое строение шва, однако ее широкое применение осложнено следующими факторами: процесс требует трудоемкой подготовки кромок; сложно применять на криволинейных траекториях сварных швов [4].

В работах [9, 10] показано, что сплав сваривается сваркой плавящимся электродом, подобраны режимы, обеспечивающие получение бездефектных соединений. Однако не была проведена оценка механических характеристик сварных соединений. Кроме того, было показано, что микроструктура ОШЗ зависит от технологии фрезерования кромок.

Целью данной работы является определение механических характеристик сварных соединений сплава ЭП718, полученных роботизированной СПЭ в импульсном режиме с пониженной погонной энергией.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Подготовка кромок под сварку. Геометрические параметры сварного соединения соответствовали типу С18 по ГОСТ 14771 (рис. 1).

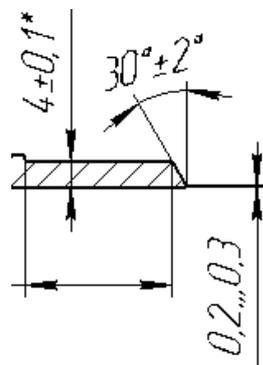


Рис. 1. Подготовка кромок соединения С18 по ГОСТ 14771 под сварку

Поскольку в работе [9] было обнаружено влияние технологии фрезерования на микроструктуру околошовной зоны сварных соединений сплава ЭП718, была принята единая технология фрезерования кромок образцов. Механическая обработка образцов производилась на многоцелевом станке с ЧПУ мод. 500 V/5. Для обработки кромок использовалась фасочная фреза VCP120L12.0A30-02S08 фирмы *Tungaloy Corporation* (Япония). Геометрические параметры фрезы представлены на рис. 2, а. Скорость резания на верхнем диаметре D (рис. 2, б) инструмента – 20 м/мин, подача – 0,015 мм/зуб.

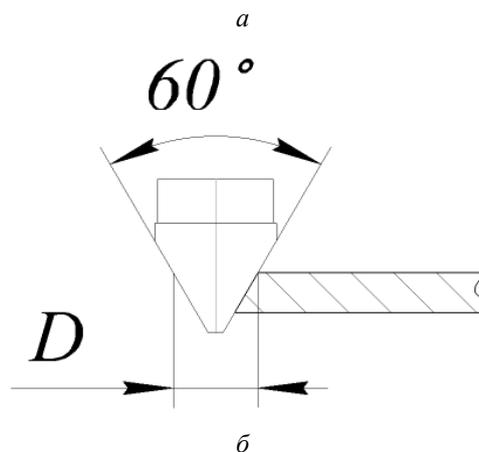
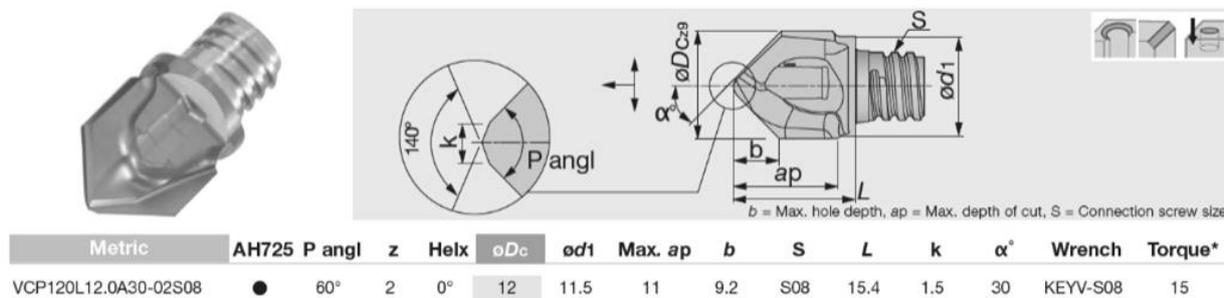


Рис. 2. Параметры фрезы и схема фрезерования

Программа для обработки кромок разработана в САМ системе *PowerMill* с использованием 3D-моделей деталей. Траектория представляет собой движение фрезы по 3D кривой (рис. 3).

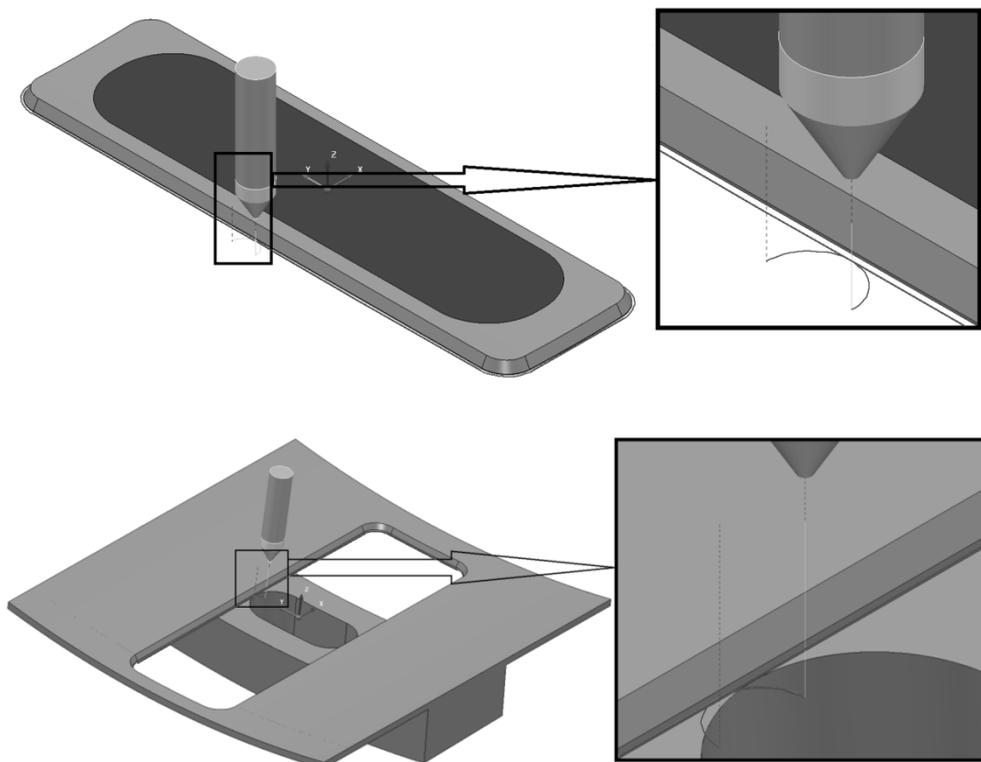


Рис. 3. Траектория фрезы

На рис. 4 показана микроструктура кромки образца, полученной при принятой технологии фрезерования перед сваркой, и основного металла перед сваркой.

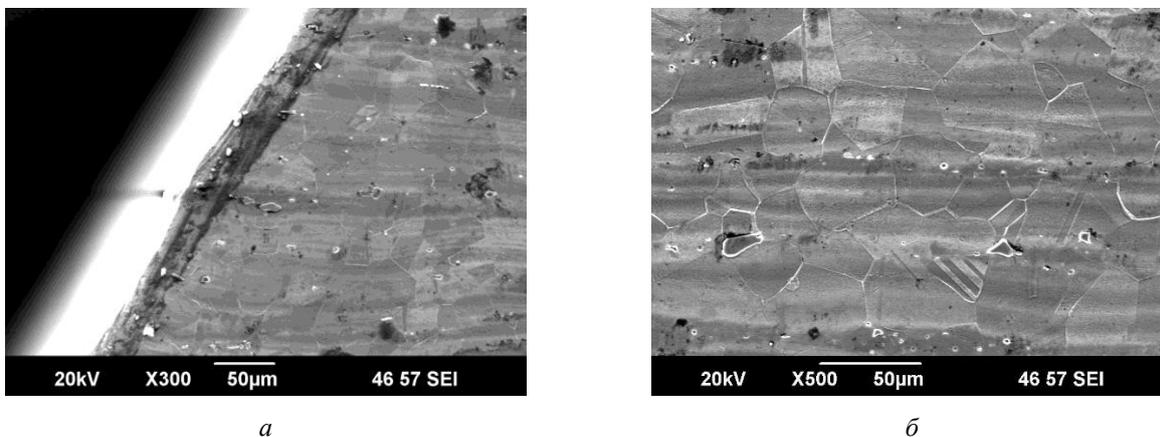


Рис. 4. Морфология микроструктуры фрезерованной кромки (а) и основного металла (б)

СПЭ с поперечными колебаниями электрода проводили в импульсном режиме сварочного тока на роботизированном технологическом комплексе (РТК), включающем робот *ABB IRB 1600* с блоком управления *IRC 5*, источник питания *EVOSPARK EVOMIG 350* с синергическим управлением, приспособление для сварки листовых заготовок с защитой корня шва аргоном. Сварка осуществлялась с применением электродной проволоки ЭП533 диаметром 1,2 мм в среде аргона высшего сорта.

Образцы устанавливались на медную подкладку, зажимались клавишными прижимами, обезжиривались и просушивались. На рис. 5 показана сварочная оснастка с медной подкладкой и клавишными прижимами. К торцам пластинам устанавливались выводные планки.



Рис. 5. Сварочная оснастка с медной подкладкой и клавишными прижимами

Термообработка сваренных образцов. Закалку проводили при температуре 1070 °С в течение 15 минут с последующим охлаждением на воздухе. Старение осуществлялось при 780 °С в течение 5 ч 15 мин с последующим охлаждением на воздухе.

Подготовка шлифов. После механической шлифовки образцы подвергались травлению. Реактив для травления имел следующий состав: вода (H_2O) – 20 см³, медный купорос ($CuSO_4$) – 4 г, соляная кислота (HCl) – 20 см³. Время травления – 3–10 секунд.

Макроструктуру шлифов исследовали с помощью оптического микроскопа *Olympus GX51*. Структуру микрошлифов – на электронном растровом микроскопе *JSM-6490LV*.

Измерение микротвердости по Виккерсу (*HV*) проводили на Микрометре-5101 с пирамидальным алмазным индентором под нагрузкой 1 Н (100 г) в течение 10 секунд.

Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре на образцах типа XII по ГОСТ 6996-66 в состаренном состоянии на электромеханической измерительной системе для проведения статических испытаний *Instron 5982*.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Распределения микротвердости по сечению сварного шва в состоянии после сварки и после старения показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

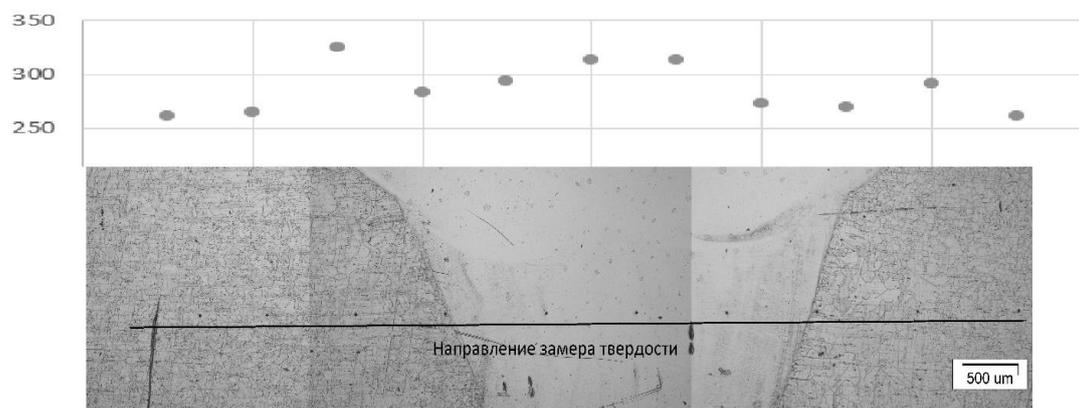


Рис. 6. Распределение микротвердости по сечению сварного соединения в закаленном состоянии

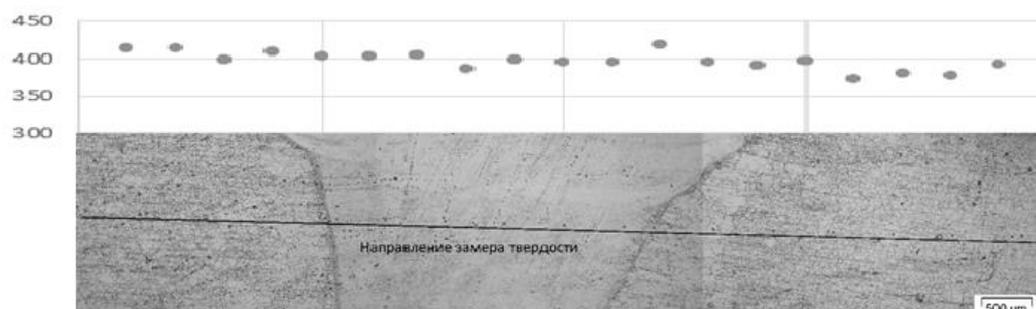


Рис. 7. Распределение микротвердости по сечению сварного соединения в состаренном состоянии

Проведение закалки практически не влияет на микротвердость основного металла, поскольку сплав ЭП718 поставляется в закаленном состоянии, а микротвердость сварного шва в результате аустенитизации увеличивается с 260...275 *HV* до более чем 300 *HV*.

Старение приводит к росту твердости, как в основном металле до средних значений 433 *HV*, так и в сварном шве до среднего значения 417 *HV*, что свидетельствует о выделении упрочняющей фазы во всех зонах сварного соединения.

Оптическая металлография. На рис. 8 и 9 представлена микроструктура сварного соединения в состоянии после сварки. Как видно на снимках, рост зерна происходит в двух локальных областях. Первая располагается на расстоянии около 0,2 мм от лицевой поверхности, и на расстоянии около 0,3 мм от границы сплавления с облицовочным проходом в области А (рис. 8), вторая располагается вдоль границы сплавления с корневым проходом в области Б (рис. 9), причем на границе корневого и облицовочного проходов зона роста зерна начинается непосредственно от границы сплавления, а ее ширина достигает максимальных значений.

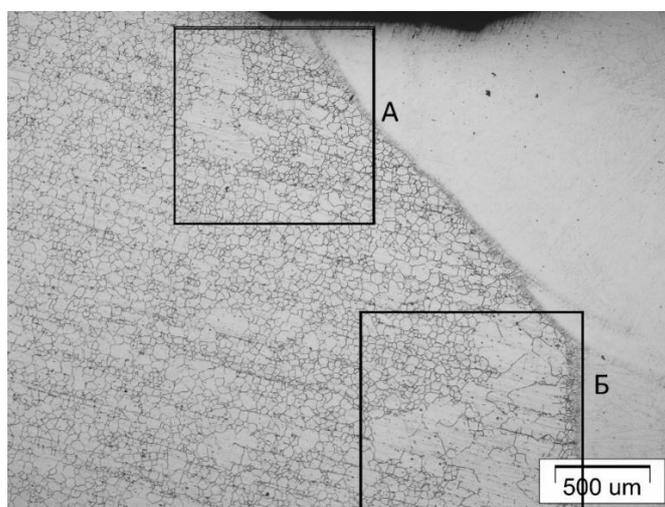


Рис. 8. Микроструктура сварного соединения после закалки и старения

Образование локальных участков роста зерна на образцах, прошедших термическую обработку, объясняется гомогенизацией структуры вследствие термообработки.

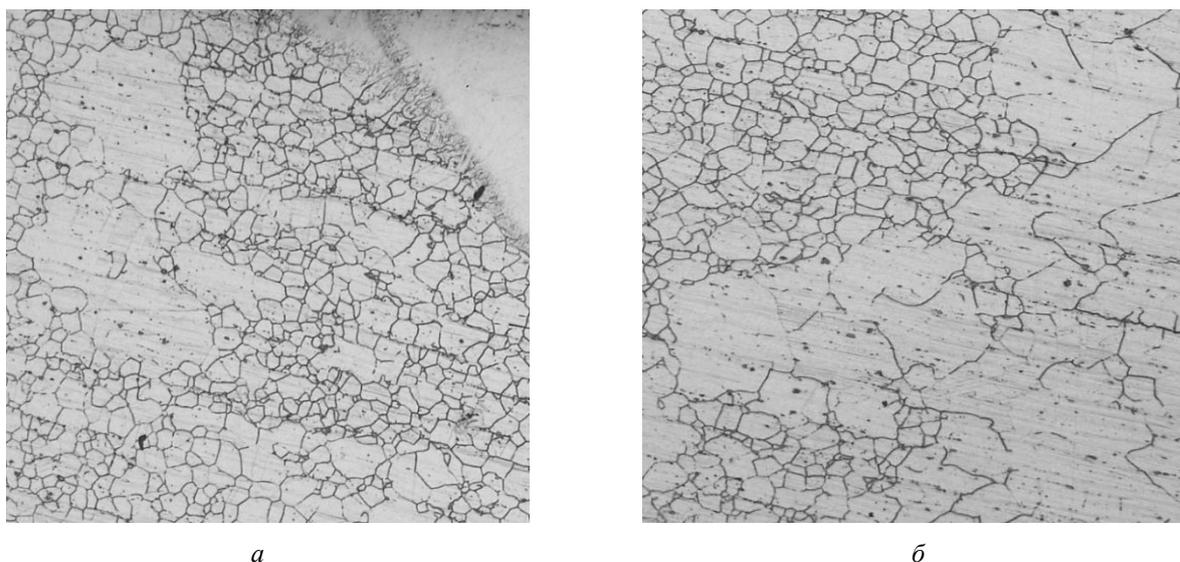


Рис. 9. Микроструктура сварного соединения:
а – зона роста (А); б – зона (Б)

Испытания на растяжение при комнатной температуре проводились на образцах типа XII по ГОСТ 6996-66 в состаренном состоянии на электромеханической измерительной системе для проведения испытаний Instron 5982. Образец № 1 после механических испытаний и диаграмма растяжения показаны на рис. 10, а, б.

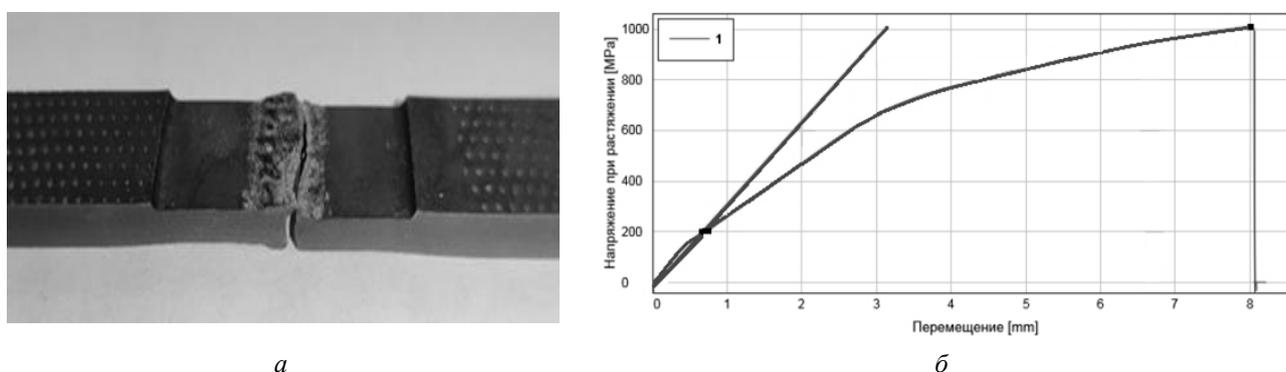


Рис. 10. Образец № 1 (а) и результаты механических испытаний образца № 1 ЭП718 при комнатной температуре на измерительной системе Instron 5982 (б)

Образцы № 2 и 3 после испытаний представлены на рис. 11, а, б соответственно, результаты механических испытаний и диаграмма растяжения – на рис. 12.

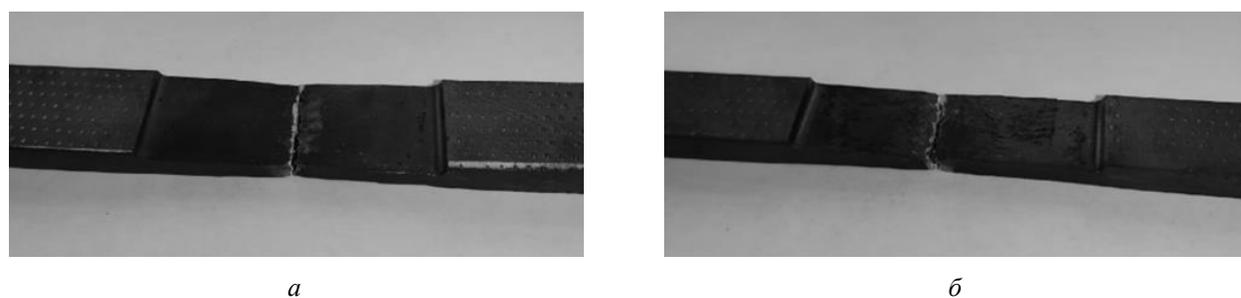


Рис. 11. Образец № 2 (а) и образец № 3 (б)

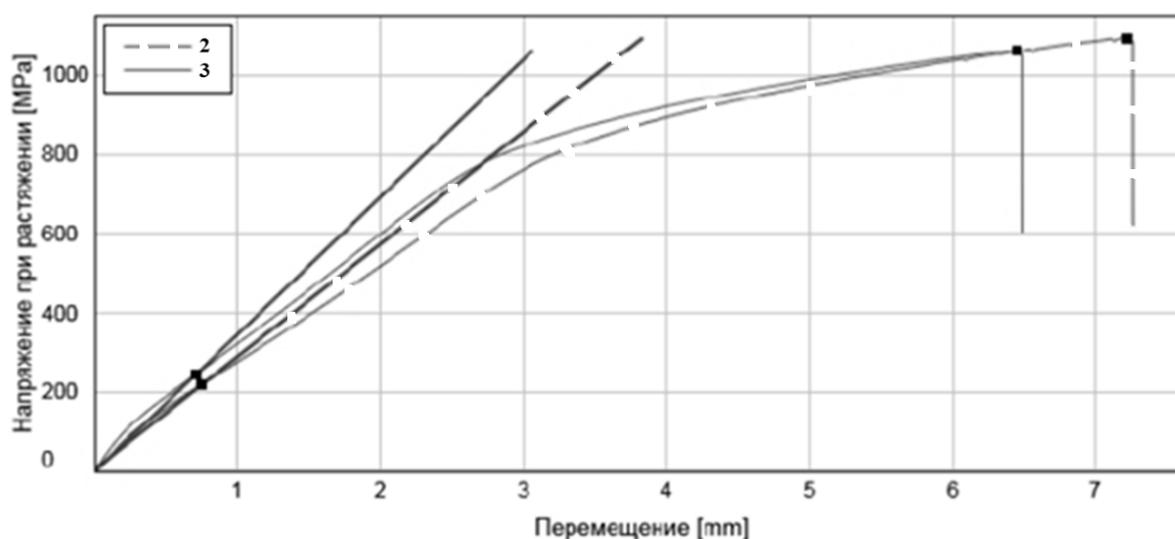


Рис. 12. Результаты механических испытаний сварных образцов ЭП718 при комнатной температуре на измерительной системе Instron 5982

Среднее арифметическое значение предела прочности при комнатной температуре составило 1056 МПа, что соответствует требованиям к сварным швам сплава ЭП 718, выполненным проволокой ЭП 533.

Испытания на растяжение при повышенной температуре проводились на образцах типа XII по ГОСТ 9651-84 в состаренном состоянии на электромеханической измерительной системе для проведения испытаний Instron 5982. Образцы № 1, 2 и 3 после механических испытаний показаны на рис. 13, *а*, *б* и *в*.

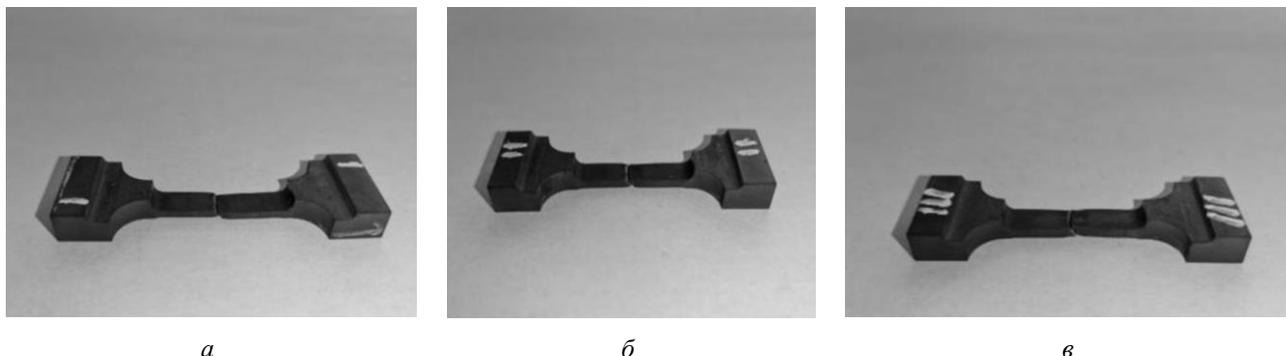


Рис. 13. Образец № 1 (*а*), образец № 2 (*б*) и образец № 3 (*в*)

Все образцы порвались по сварному шву. Результаты механических испытаний представлены на рис. 14. Среднее арифметическое значение предела прочности при 650 °С составило 950 МПа, что соответствует требованиям к сварным швам сплава ЭП718, выполненным проволокой ЭП533.

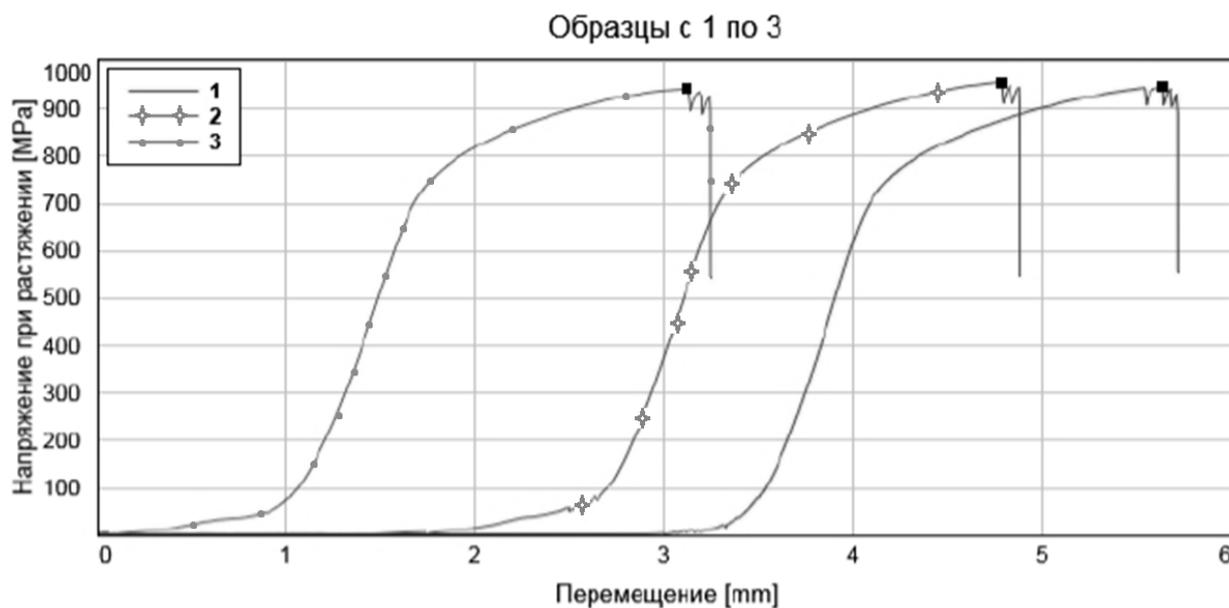


Рис. 14. Результаты механических испытаний на растяжение сварных образцов ЭП718 при температуре 650 °С на измерительной системе Instron 5982

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования структуры шлифов установлено, что сварные швы имеют разориентированную измельченную микроструктуру и не содержат внутренних дефектов.

В ОШЗ имеются локальные участки роста зерна. На всем протяжении зоны сплавления шва с основным материалом размер зерна не изменяется.

Проведение термической обработки, включающей в себя закалку и старение, приводит к росту твердости, как в основном металле, так и в сварном шве, что свидетельствует о выделении упрочняющей фазы во всех зонах сварного соединения и соответствуют уровню результатов работ [5–8].

Результаты испытаний на растяжение свидетельствуют о том, что сварные соединения обеспечивают прочность как при нормальной, так и при повышенной температуре (650 °С) на уровне требований к сварным швам сплава ЭП 718, выполненным аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом проволокой ЭП 533.

Научный коллектив благодарит за помощь в проведении металлографических исследований коллективы ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УГАТУ и кафедры современных методов сварки и контроля конструкций на базе ООО «Аттестационный Центр СваркаТехСервис» за предоставленное оборудование и консультационные услуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокин Л. И.** Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. № 4. С. 4–11. [L. I. Sorokin, "Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines", (in Russian), in *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 4-11, 1997.]
2. **Сорокин Л. И.** Электронно-лучевая сварка жаропрочных сплавов // Сварочное производство. 1998. № 5. С. 9–15. [L. I. Sorokin, "Electron beam welding of heat-resistant alloys", (in Russian), in *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 5, pp. 9-15, 1998.]
3. **Сорокин Л. И.** Напряжения и трещины, образующиеся при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 1999. № 12. С. 11–16. [L. I. Sorokin, "Stresses and cracks during welding and heat treatment of heat-resistant nickel alloys", (in Russian), in *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 11-16, 1999.]
4. **Сорокин Л. И.** Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Часть 1 // Сварочное производство. 2003. № 4. С. 22–29. [L. I. Sorokin, "Filler materials for welding heat-resistant nickel alloys (review). Part 1", (in Russian), in *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 22-29, 2003.]
5. **Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф.** Теория свариваемости сталей и сплавов: монография / под ред. Э. Л. Макарова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 487 с.: ил. [E. L. Makarov, B. F. Yakushin, *Theory of weldability of steels and alloys: monograph*, (in Russian). E. L. Makarova (ed.). Moscow: MG TU im. N. E. Bauman, 2014.]
6. **Исаев Л. С.** Исследование сварного соединения жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД при электронно-лучевой сварке // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2016. № 4 (52). С. 123–129. [S. L. Isaev, "Study of welded joints of high-temperature alloys CR15NI45MO5W1TI2AL1NB3P made by electron-beam welding", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: tehnikeskie nauki*, no. 4 (52), pp. 123-129, 2016.]
7. **Паршуков Л. И., Гильмутдинов Ф. З.** Электронно-лучевая сварка и локальная термообработка сварных швов из жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2017. № 5 (53). С. 23–32. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-3-3. [L. I. Parshukov, F. Z. Gilmutdinov, "Electron beam bonding and local heat treatment welded seams from hot strength alloys", (in Russian), in *Trudy VIAM*, no. 5 (53), pp. 23-32, 2017.]
8. **Труханов К. Ю.** Разработка расчетно-экспериментального метода оценки склонности сварных соединений к образованию горячих трещин при сварке тонколистовых металлических конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05. 02. 10. Москва, 2017. 157 с. [K. Yu. Trukhanov, *Development of a computational-experimental method for assessing the tendency of welded joints to form hot cracks when welding thin-sheet metal structures: Cand. Diss. Abstr.*, (in Russian). Moscow, 2017.]
9. **Разработка** технологии роботизированной сварки плавящимся электродом соединений сплава ЭП718 / В. В. Атрощенко [и др.] // Сварка и диагностика. 2020. № 4. С. 46–49. [V. V. Atroshchenko, "Development of technology for robotic consumable electrode welding of EP718 alloy joints", (in Russian), in *Svarka i diagnostika*, no. 4, pp. 46-49, 2020.]
10. **Никифоров Р. В.** Совершенствование технологии автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом стыковых соединений из тонколистовых коррозионно-стойких сталей с учетом термомеханических процессов в изделии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10. Москва, 2014. 16 с. [R. V. Nikiforov, *Improvement of the technology of automatic non-consumable electrode argon-arc welding of butt joints made of thin-sheet corrosion-resistant steels, taking into account thermal deformation processes in the product: D.E.S. diss. Abstr.*, (in Russian). Moscow, 2014.]

ОБ АВТОРАХ

НИКИФОРОВ Роман Валентинович, доц. каф. СЛАТ. Дипл. инженер по специальности «Оборудование и технологии сварочного производства» (УГАТУ, 2009). Канд. техн. наук по сварке, родственными процессам и технологиям (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014). Иссл. процессов плавления трудносвариваемых сплавов.

ГАЛИМОВ Виталий Рустемович, асп. каф. СЛАТ. Дипл. магистр машиностроения (УГАТУ, 2017). Готовит дис. о роботизации процессов дуговой сварки.

ХИСАМУТДИНОВ Эдуард Рустемович, дипл. магистр машиностроения (УГАТУ, 2021).

КАМАЛЕТДИНОВА Регина Рустемовна, лаборант каф. СЛАТ. Дипл. магистр машиностроения (УГАТУ, 2020).

БАШАРОВ Рашит Рамилович, доц. каф. АТП. Дипл. инженер по специальности «Мехатроника» (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (ОГУ, 2012). Иссл. в обл. механической и физико-технической обработки.

METADATA

Title: Structure and properties of welded joints of EP718 alloy produced by robotic melted electrode welding.

Authors: R. V. Nikiforov¹, V. R. Galimov², E. R. Hisamutdinov³, R. R. Kamaletdinova⁴, R. R. Basharov⁵

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹nikiforov_svarka@mail.ru, ²galimov.vitalij-r01@net.ugatu.su, ⁴miracle4458@gmail.com, ⁵3rash@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 10-18, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Presented are the results of mechanical tests of EP718 welded joints obtained by robotic melted electrode welding with reduced heat input. According to the results of the study, it has been established that the static strength of welded joints obtained by robotic consumable electrode welding at room and elevated temperatures is in line with the requirements for joints obtained by non-consumable electrode argon-arc welding.

Key words: superalloys; INCONEL 718; robotic MIG welding with transverse vibrations; microstructure of welds; heat-resistant nickel alloys; heat-affected zone microstructure.

About authors:

NIKIFOROV, Roman Valentinovich, Assoc. Prof., Dept. of Welding, Cast and Additive Technologies. Dipl. engineer specializing in "Equipment and technologies of welding production". Cand. of Tech. Sci. in Technology (Bauman Moscow State Technical Univ., 2014).

GALIMOV, Vitaly Rustemovich, postgraduate student 1 year. Master of Engineering (USATU, 2021),

HISAMUTDINOV, Eduard Rustemovich, master of Engineering (USATU, 2021).

KAMALETDINOVA, Regina Rustemovna, master of Engineering (USATU, 2020).

BASHAROV, Rashit Ramilovich, Assoc. Prof., Dept. of Automation of technological processes. Dipl. engineer specializing in "Mechanics". Cand. of Tech. Sci. in Technology (OSU, 2012).