

УДК 669.24; 620.196.5; 621.791.669

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

Научная статья

Research article



Структура и свойства сварных швов при электронно-лучевой сварке железохромоникелевого сплава ЭП718

С.Л. Исаев¹, Д.А. Баранов¹, Е.Ю. Щедрин¹, В.С. Муратов², К.В. Никитин², С.С. Жаткин²

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов»

Россия, 443022, г. Самара, Заводское шоссе, 29

² Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

✉ Константин Владимирович Никитин (kvn-6411@mail.ru)

Аннотация: Приведены результаты исследований особенностей формирования структуры и свойств сварных соединений сплава ЭП718 толщиной 13 мм (с учетом технологической подкладки 3 мм) за счет варьирования параметров электронно-лучевой сварки (тока луча и скорости его перемещения по поверхности образца) и определения оптимального режима сварки для данного сплава, используемого при изготовлении статора высокого давления авиационного двигателя. Деталь является ответственным крупногабаритным изделием сложной профильной формы и работает в условиях малоциклических нагрузок при высоком уровне напряжений. Минимальный предел прочности 1160 МПа имеют образцы, сваренные при скорости перемещения луча по поверхности образца $v = 0,0042$ м/с и токе луча 85 мА. Для образцов, сваренных при $v = 0,006$ м/с и $i = 65$ мА, характерен максимальный предел прочности, равный 1270 МПа. При определении временного сопротивления у образцов, сваренных при $v = 0,006$ м/с, $i = 120$ и 75 мА, разрушение произошло по сварному шву, а у образцов, сваренных при $v = 0,006$ м/с, $i = 65$ мА и $v = 0,0042$ м/с, $i = 85$ мА, — по зоне термического влияния на расстоянии 0,5–3,0 мм от сварного шва. При микроисследовании структуры образцов, сваренных при $v = 0,006$ и 0,0042 м/с и $i = 120, 75$ и 85 мА соответственно, выявлены расширенные границы зерен в зоне термического влияния. Таким образом, оптимальным является режим сварки при скорости перемещения луча по поверхности образца 0,006 м/с и токе луча 65 мА. На данном режиме утолщенных границ зерен не обнаружено и достигается максимальный предел прочности 1270 МПа.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, жаропрочные никелевые сплавы, зона термического влияния, структура, свойства.

Для цитирования: Исаев С.Л., Баранов Д.А., Щедрин Е.Ю., Муратов В.С., Никитин К.В., Жаткин С.С. Структура и свойства сварных швов при электронно-лучевой сварке железохромоникелевого сплава ЭП718. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(6):44–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

Structure and properties of welds in electron beam welding of iron-chromium-nickel alloy EP718

S.L. Isaev¹, D.A. Baranov¹, E.Yu. Shchedrin¹, V.S. Muratov², K.V. Nikitin², S.S. Zhatkin²

¹ JSC “UEC-Kuznetsov”

29 Zavodskoe shosse, Samara 443022, Russia

² Samara State Technical University

244 Molodogvardeyskaya Str., Samara 443100, Russia

✉ Konstantin V. Nikitin (kvn-6411@mail.ru)

Abstract: This article presents the results of a study focused on the formation of structural characteristics and properties of welded joints in the EP718 alloy with a 13 mm thickness (accounting for a 3 mm technological substrate). The study explores variations in electron beam welding parameters, such as beam current and the speed of its movement across the specimen's surface, to determine the optimal welding mode for

this alloy. This alloy is crucial in the production of high-pressure stators for aircraft engines, as the component operates under low-cycle loads at high stress levels, making its performance critical. Specimens that were welded with a beam speed (v) of 0.0042 m/s and a beam current (i) of 85 mA exhibited a minimum tensile strength of 1160 MPa. On the other hand, specimens welded with $v = 0.006$ m/s and $i = 65$ mA demonstrated a maximum tensile strength of 1270 MPa. However, it's noteworthy that specimens welded at 0.006 m/s with beam currents of 120 mA and 75 mA experienced fracture along the weld, while specimens welded at 0.006 m/s with a beam current of 65 mA and at 0.0042 m/s with a beam current of 85 mA exhibited fracture in the heat-affected zone at a distance of 0.5–3.0 mm from the weld. Examination of the structure of specimens welded at $v = 0.006$ and 0.0042 m/s and $i = 120$ mA, 75 mA, and 85 mA revealed expanded grain boundaries in the heat-affected zone. Consequently, the optimal welding mode was identified as having a beam speed of 0.006 m/s and a beam current of 65 mA. In this mode, no thickened grain boundaries were detected, and a maximum tensile strength of 1270 MPa was achieved.

Keywords: electron beam welding, heat resistant nickel alloys, heat affected zone, structure, properties.

For citation: Isaev S.L., Baranov D.A., Shchedrin E.Yu., Muratov V.S., Nikitin K.V., Zhatkin S.S. Structure and properties of welds in electron beam welding of iron-chromium-nickel alloy EP718. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(6):44–53.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

Введение

За последние годы в авиационной технике заметно расширилось применение жаропрочных сплавов в тяжело нагруженных крупногабаритных силовых узлах и агрегатах, работающих главным образом в условиях малоцикловых нагрузок при высоком уровне напряжений. Наибольший интерес при этом представляют стали и сплавы с пределом прочности 980–1200 МПа [1], одним из представителей которых является сплав ХН45ВМТЮБР-ИД (ЭП718), используемый при изготовлении деталей, работающих в диапазоне температур до 700–800 °С. Важное место при их производстве занимает сварка.

Сварные соединения характеризуются определенным комплексом механических и эксплуатационных характеристик, которые могут существенно отличаться от свойств основного металла. Надежность и долговечность сварных конструкций, как правило, определяются качеством и структурой металла шва и зоны термического влияния, а также конструктивным оформлением места соединения. Изготовление сварных конструкций из жаропрочных сплавов производится с применением различных способов сварки и во всех случаях осложнено склонностью к образованию таких дефектов, как трещины [2; 3].

Использование электронно-лучевой сварки (ЭЛС) обеспечивает наименьший объем переплавляемого материала, минимальную деформацию изделия, а также прочность, сравнимую с прочностью основного материала. Высокое качество сварных соединений может быть достигнуто только в том случае, если используемая технология ЭЛС обеспечивает необходимую степень проплавления кромок, ограниченные химическую и структурную неоднородности в металле сварного шва и

зоны термического влияния (ЗТВ), пониженный уровень остаточных напряжений и исключение образования дефектов (трещин, пор и т.п.) [4; 5].

Анализ научных исследований зарубежных и отечественных ученых показывает, что в мире активно изучают различные способы получения бездефектных неразъемных соединений из жаропрочного сплава ЭП718. В работе [6] бездефектные соединения на образцах из листового материала толщиной 5 мм получены при сварке CO_2 -лазером. Исследована также лазерная сварка (ЛС) сплава ЭП718 толщиной 1,3 мм, получены сварные соединения с дефектами в корневой части шва в виде пор [7]. В работе [8] рассмотрены сварные швы образцов толщиной 3,4 мм, изготовленных методом аддитивного выращивания. Электродуговая сварка (ЭДС) проводилась с использованием неплавящегося вольфрамового электрода в среде защитного газа. Несмотря на то, что после термической обработки была получена мелкозернистая структура, были выявлены трещины в околошовной зоне. Влияние тепловложения при электронно-лучевой сварке на возможность исключения микротрещин в сварном шве и зоне термического влияния образцов толщиной 2 мм исследовано в [9; 10]. В работах [11–13] изучены сварные швы жаропрочного сплава Inconel 718, полученные с применением технологий ЭЛС, ЭДС и ЛС на различных режимах сварки, показано влияние величины зерна на механические свойства. Рассмотрено влияние перемешивания при сварке трением на механические свойства сварного шва образцов из сплава ЭП718 [14] и режимов электрической дуги на сварку образцов толщиной 2 мм [15], а также особенности формирования сварных швов на образцах толщиной 3 мм при ЭЛС [16] и сварка плавящимся электродом [17].

тродом магнитосжатой дугой листового материала сплава ЭП718 толщиной 2 мм [17].

Часть опубликованных исследований посвящена изучению особенностей формирования геометрии и микроструктуры сварного шва, а также образования дефектов в нем и зоне термического влияния при сверхвысокочастотной и обычной ЭЛС, микроволновой сварке [18–20].

Отечественные исследователи в работах [21; 22] изучали структуру и свойства сварных швов, полученных различными видами сварки — роботизированной сваркой плавящимся электродом и ЛС.

Для изготовления неразъемных соединений из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД (ЭП718) перспективно применение концентрированных потоков энергии, в том числе электронно-лучевой сварки, которая обеспечивает минимальную ширину шва и высокое качество сварного соединения [23]. Однако процесс ЭЛС имеет ряд трудностей и нерешенных проблем в получении бездефектных сварных соединений, к числу которых можно отнести возможность образования в металле сварных соединений трещин, пор и других дефектов, вызывающих снижение надежности и эксплуатационных характеристик изделия [24].

Целью данной работы являлось исследование особенностей формирования структуры и свойств сварных соединений из сплава ЭП718 толщиной 13 мм (с учетом технологической подкладки 3 мм) за счет изменения различных параметров электронно-лучевой сварки (тока луча, скорости его перемещения по поверхности образца) и выбор оптимального режима сварки для данного сплава, используемого при изготовлении статора высокого давления авиационного двигателя. Эта деталь является ответственным крупногабаритным изделием сложной профильной формы и работает в условиях малоциклических нагрузок при высоком уровне напряжений, но в работах [6–22] при проведении исследований данный факт не учитывали.

Материалы и методика экспериментов

Статор высокого давления изготавливается сваркой двух заготовок: заднего фланца из цельнокатаного кольца (по ОСТ 1.90396-91) и среднего кольца из листового материала ЭП718 (по ТУ 14-1-5095-92). Деталь после сварки проходит термическую обработку для снятия напряжений и придания необходимых механических свойств.

Реализацию режимов сварки, исследование микроструктуры и механических свойств сварных швов проводили на образцах-имитаторах длиной 200 мм, шириной 50 мм и толщиной 13 мм, изготовленных из цельнокатаного кольца (рис. 1, поз. 1) и листового материала (рис.1, поз. 2) жаропрочного сплава ЭП718.

Определение локального химического состава сплава проводили методами качественного и количественного микрорентгенспектрального анализа на растровом электронном микроскопе. Химический состав сплава образцов определяли методом спектрального анализа на спектрометре (табл. 1). Марка материала образцов соответствует сплаву ЭП718.

Неразъемные соединения получали на установке электронно-лучевой сварки. На различных режимах ЭЛС изменяли скорость перемещения образца относительно луча и силу тока луча.

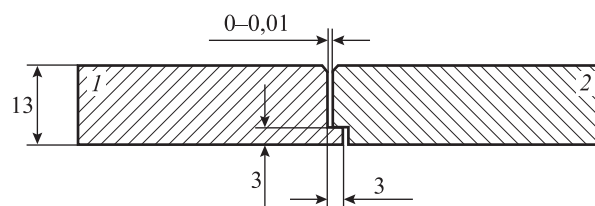


Рис. 1. Эскиз образца-имитатора
1 — цельнокатаное кольцо, 2 — листовый материал
Размеры указаны в мм

Fig. 1. Sketch of a simulator specimen
1 — solid rolled ring; 2 — sheet material
Dimensions are given in mm

Таблица 1. Химический состав (мас.%) материала образцов-имитаторов

Table 1. Chemical composition (wt.%) of simulator specimens' material

Место вырезки (см. рис. 1)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Mo	Ti	Al	Nb
Поз. 1	0,055	0,007	0,07	0,0016	0,004	15,6	45,24	3,44	4,45	2,08	0,99	1,13
Поз. 2	0,058	0,08	0,24	0,0016	0,01	15,9	44,73	3,23	4,11	2,17	0,98	1,01
ТУ-14-1-5095-92	≤0,1	≤0,3	≤0,6	≤0,01	≤0,015	14–16	43–47	2,5–3,5	4,0–5,2	1,9–2,4	0,9–1,4	0,8–1,5

Таблица 2. Режимы термической обработки образцов до и после сварки

Table 2. Heat treatment modes for specimens before and after welding

Термообработка до сварки	Термообработка после сварки		
Закалка	Закалка (снятие напряжений)	Старение 1	Старение 2
$t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$, охлаждение на воздухе	Нагрев на воздухе до $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$, охлаждение до $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в контейнере на воздухе с подачей аргона, далее – без подачи аргона	$t = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 5\text{ ч}$, охлаждение на воздухе	$t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 16\text{ ч}$, охлаждение на воздухе

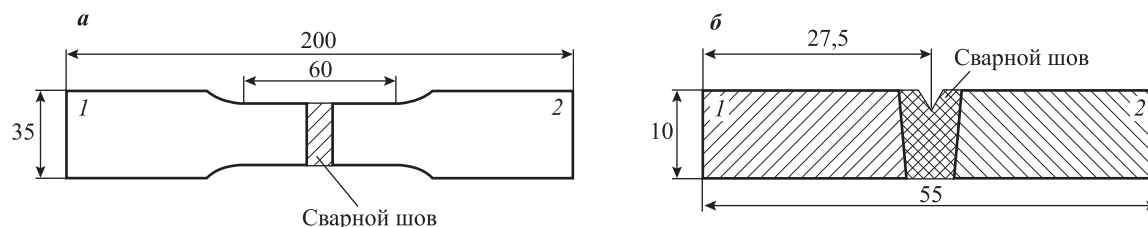


Рис. 2. Эскизы образцов для оценки механических свойств: временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения и сужения (а) и ударной вязкости (б)

1 – цельнокатаное кольцо, 2 – листовый материал. Размеры указаны в мм

Fig. 2. Sketches of specimens for evaluating mechanical properties: ultimate tensile strength, yield strength, elongation, and contraction (a) and impact strength (b)

1 – solid rolled ring, 2 – sheet material. Dimensions are given in mm

После сварки образцы подвергали термической обработке. Закалку проводили в элеваторной, а старение — в шахтной электропечи. Режимы термической обработки (закалка и старение) представлены в табл. 2.

Для оценки механических свойств сварных соединений из образцов-имитаторов были изготовлены образцы для определения временного сопротивления (σ_b), предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительных удлинения (δ) и сужения (ψ) (тип XIII, рис. 2, а) и ударной вязкости (KCU) (тип IX, рис. 2, б) в соответствии с ГОСТ 6996-66 (сварной шов расположен в центре образца).

Размер зерна определяли путем измерения длин хорд по ГОСТ 5639-82 в программном комплексе. Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе с анализатором микроструктуры поверхности твердых тел при различных увеличениях. Замер микротвердости осуществляли при нагрузке 50 г.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Перед выполнением сварки провели оценку предела прочности образцов с цельнокатаного кольца ($\sigma_b = 930\text{ МПа}$) и листового материала ($\sigma_b =$

$= 990\text{ МПа}$). Так как последний имеет повышенную прочность (более 980 МПа), перед сваркой выполнили закалку. На рис. 3 представлена микроструктура листового жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП718 толщиной 13 мм в состоянии поставки и после закалки при температуре 1100 °С и выдержке 2 ч с последующим охлаждением на воздухе. Микроструктура основного материала после термической обработки представляет собой аустенитные зерна, карбиды и γ' -фазу (рис. 3, а). В обоих случаях имеет место средний балл зерна 3–6 шкалы ГОСТ 5639-82.

Получена партия образцов-имитаторов на различных режимах сварки (табл. 3): скорость перемещения луча по поверхности образца (v) и ток луча (i), которые выбирались исходя из рекомендаций нормативной документации и обеспечения полно-

Таблица 3. Режимы сварки образцов

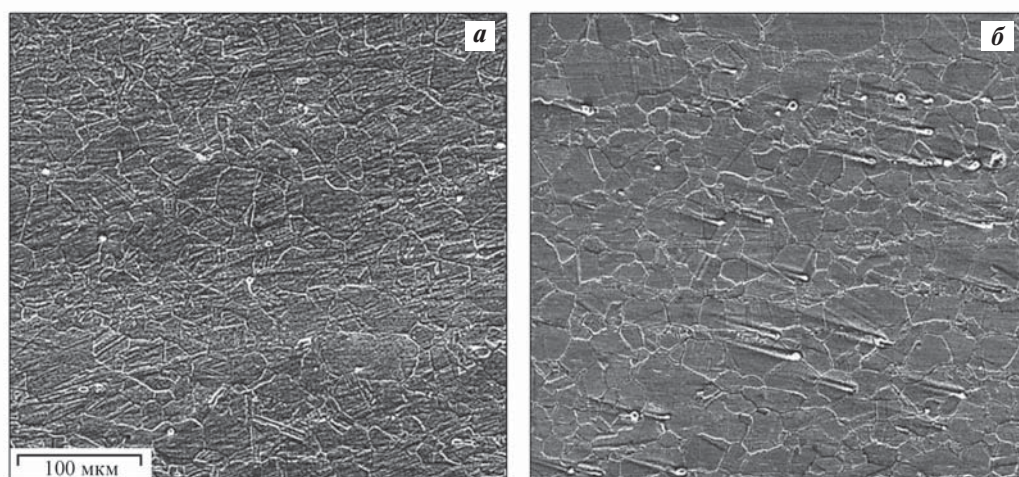
Table 3. Welding modes

№ режима	v , м/с	i , мА
1	0,006	120
2	0,006	75
3	0,006	65
4	0,0042	85

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений

Table 4. Mechanical properties of welded joints

№ режима	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²	Микротвердость, кг/мм ²
1	1160	760	17,2	15,5	0,42	308
2	1170	770	17,8	19,0	0,41	329
3	1270	920	21,0	21,7	0,93	348
4	1160	810	15,4	15,5	0,81	335
ТУ 14-1-1059-2004	≥1080	≥790	≥13	–	≥0,35	293–363
ТУ 14-1-3905-85	≥1080	≥790	≥12	≥14	≥0,35	285–415

Рис. 3. Микроструктура ($\times 400$) листового сплава ЭП718 в состоянии поставки (а) и после термической обработки (закалки) (б)Fig. 3. Microstructure ($\times 400$) of EP 718 sheet alloy in as-delivered condition (a) and after heat treatment (quenching) (b)

го провара образцов толщиной 13 мм. Результаты механических испытаний приведены в табл. 4.

На образцах, сваренных в режимах 1 и 2, при определении временного сопротивления разрушение произошло по сварному шву, а на остальных испытанных образцах — в ЗТВ на расстоянии 0,5–3,0 мм от сварного шва.

В исследованных сварных швах, полученных в режимах 1–3, имеется 100 %-ный провар (рис. 4, а–в). В сварном соединении в режиме 4 выявлен непровар величиной 0,1 мм, а в одном сечении — единичная пора диаметром 1,0 мм (указаны стрелками на рис. 4, г). Согласно нормативной документации (РТМ 1.4.1703-87) для данной толщины материала допускаются поры до 1,5 мм. Трещин и других дефектов сварки при микроисследовании сечений сварных образцов не обнаружено.

В макроструктуре сварных швов наблюдаются характерные для ЭЛС зоны: зона «грибка» (пара-

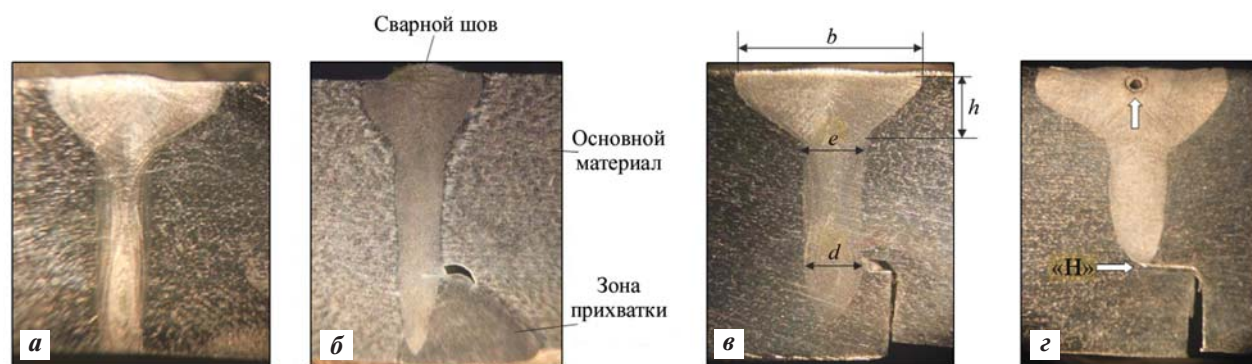
метры *h*, *b*), кинжальная зона (*e*, *d*) и корень шва, сформированный в замковой части соединений (рис. 4, в, г) и в зоне подкладки (рис. 4, а). Габаритные размеры сварного шва (рис. 4, в) для каждого режима представлены в табл. 5.

Наибольшая величина провара сварного шва обнаружена при токе сварки 120 мА. На необходимую нам глубину проварили образцы в режимах 1–3. Как видно из табл. 5, при режиме сварки 4 наблюдается максимальная ширина ванны (*b*) в зоне «грибка» и минимальная глубина провара. В случае режима 1 высота грибковой зоны (*h*) наибольшая, что приводит к дополнительному нагреву, вероятности утолщения границ зерен и образования микротрещин. При сварке в режимах 2 и 3 получена одинаковая высота грибковой зоны, но ее ширина меньше при режиме 2. Однако требуемая глубина провара минимальна при режиме 3 и токе луча 65 мА, что обеспечивает наименьшее тепловложение в

Таблица 5. Габаритные размеры сварного шва

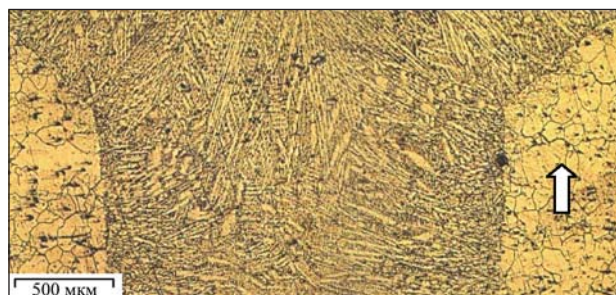
Table 5. Dimensions of the welds

№ режима	h , мм	b , мм	e , мм	d , мм	Глубина провара, мм
1	4,0–4,8	8,3–9,0	2,7–3,0	2,1–2,3	13,0
2	3,5–3,7	6,4–7,6	2,6–2,7	2,0–2,3	12,6
3	3,5–3,7	8,0–8,1	2,6–3,0	2,5	11,4
4	4,0–4,6	8,9–9,5	2,7–3,0	0,2–0,8	9,8
РТМ 1.4.1703-87	Факультативно		1,5–3,5	1,5–2,5	≥10,5

Рис. 4. Макроструктура сварных швов ($\times 6$), полученных в режимах 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)Fig. 4. Macrostructure of welds ($\times 6$) obtained in modes 1 (a), 2 (b), 3 (v), and 4 (z)

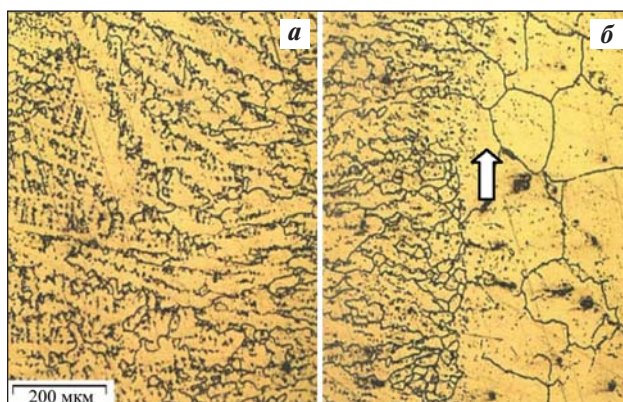
металл и снижает вероятность утолщения границ зерен в зоне термического влияния и появления трещин.

В материале образцов, сваренных в режимах 1, 2 и 4, до термообработки в ЗТВ наблюдаются утолщенные границы зерен (указаны стрелкой на рис. 5–7). Предположительно это связано с выделением карбидных фаз при нагреве во время сварки и последующим охлаждением, обусловленным ускоренной диффузией по границам зерен, что может привести впоследствии к образованию тре-

Рис. 5. Микроструктура сварного шва ($\times 50$), полученного в режиме сварки 1Fig. 5. Microstructure of the weld ($\times 50$) obtained in welding mode 1

щин [25]. После термообработки количество утолщенных границ зерен увеличилось.

Микроструктура основного материала всех образцов — неоднородная, разнотельная: в основном размер зерна соответствует 3–4-му баллу шкалы ГОСТ 5639-82, на некоторых участках и в

Рис. 6. Микроструктура образца ($\times 200$), полученного в режиме сварки 2

а — сварной шов, б — околошовная зона

Fig. 6. Microstructure of the specimen ($\times 200$) obtained in welding mode 2

а — weld, б — heat-affected zone

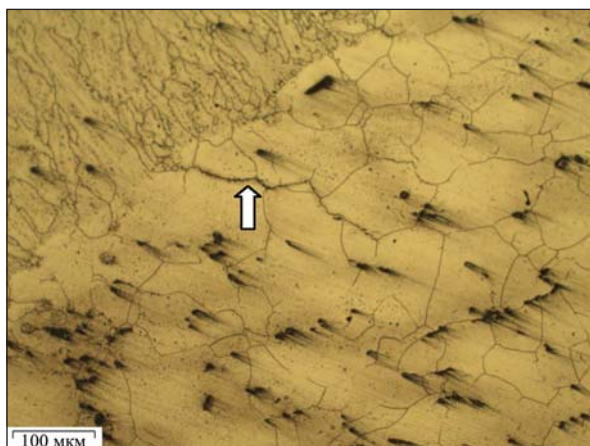


Рис. 7. Микроструктура ($\times 100$) образца в околошовной зоне с утолщенными границами зерен, полученного в режиме сварки 4

Fig. 7. Microstructure ($\times 100$) of the specimen in the heat-affected zone with thickened grain boundaries, obtained in welding mode 4

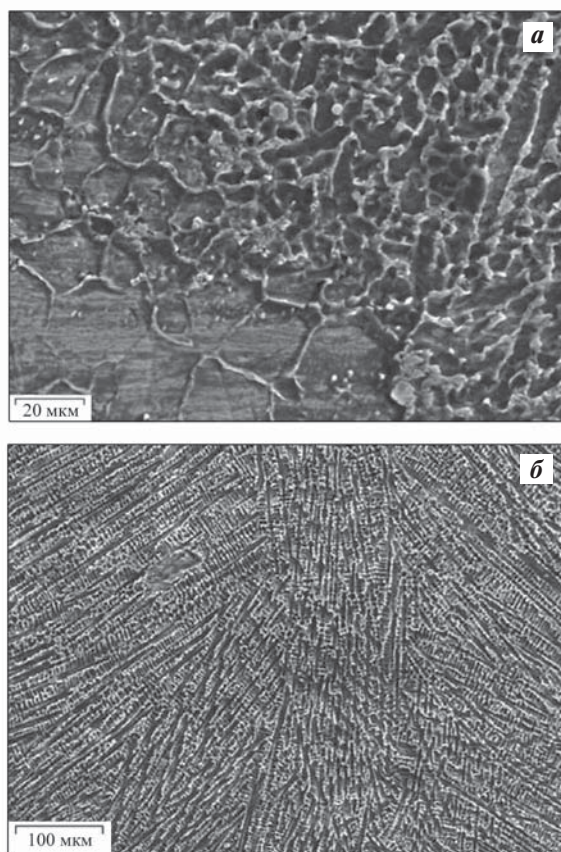


Рис. 8. Микроструктура образца основного металла в районе околошовной зоны (а) и сварного шва (б) при сварке в режиме 3

а – увеличение $600\times$, б – $250\times$

Fig. 8. Microstructure of the base metal sample in the heat-affected zone (а) and the weld (б) during welding mode 3
а – $600\times$ magnification, б – $250\times$ magnification

околошовной зоне наблюдаются отдельные зерна 2–3-го балла.

Микроструктура образца, полученного в режиме сварки 3, представлена на рис. 8. В этом случае дефектов в виде трещин и непроваров не выявлено.

Таким образом, в режиме 3 получены оптимальные геометрические параметры сварного шва, дефекты отсутствуют. Ток луча имеет наименьшую величину для обеспечения минимального нагрева основного материала и полного провара кромок. Сварной шов обладает столбчатой структурой литого сплава, ближе к центру наблюдаются нитевидные кристаллы, которые обеспечивают более высокую жаропрочность материала полученного неразъемного соединения.

Интенсивный отвод тепла в условиях ЭЛС в основной металл сокращает размеры ЗТВ и формирует мелкодендритную структуру по краю сварного шва (см. рис. 8). Основной металл в ЗТВ имеет однородное крупнозернистое строение. В структуре наблюдаются карбонитриды и карбиды, а также мелкодисперсная интерметаллидная γ' -фаза. В микроструктуре ЗТВ обнаружено увеличенное зерно относительно основного материала.

Выводы

При исследовании сварных швов образцов-имитаторов из сплава ХН45МВТЮБР-ИД (ЭП718) толщиной 13 мм установлено следующее.

1. Минимальный предел прочности 1160 МПа имеют образцы, сваренные при скорости перемещения луча по их поверхности $v = 0,0042$ м/с и токе луча $i = 85$ мА (режим 4). Для образцов, сваренных при $v = 0,006$ м/с и $i = 65$ мА (режим 3), характерен максимальный предел прочности, равный 1270 МПа.

2. У образцов, сваренных при $v = 0,006$ м/с, $i = 120$ и 75 мА (режимы 1 и 2), при определении временного сопротивления разрушение произошло по сварному шву. При применении режимов сварки 3 и 4 разрушение наблюдалось по ЗТВ на расстоянии 0,5–3,0 мм от сварного шва.

3. При микроисследовании шлифов образцов, сваренных с использованием режимов 1, 2 и 4, выявлены расширенные границы зерен в ЗТВ.

4. На основании полученных данных оптимальным является режим сварки 3 ($v = 0,006$ м/с и $i = 65$ мА): утолщенных границ зерен не обнаружено и достигнут максимальный предел прочности 1270 МПа.

Список литературы/References

- Lombert B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2011;1–10. Lombert B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High-temperature-resistant wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines and gas turbine plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*. 2011;1–10. (In Russ.).
- Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;1(34):3–33. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” of the State Scientific Center of the Russian Federation for the implementation of the “Strategic Directions for the Development of Materials and Technologies for Their Processing for the Period up to 2030”. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*. 2015;1(34):3–33. (In Russ.).
- Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45. *Труды ВИАМ*. 2020;9(91):3–14. Kablov E.N., Antipov V.V., Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of electron-beam welding of heat-resistant alloys EI698-VD and EP718-ID with steel 45. *Trudy VIAM*. 2020;9(91):3–14. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14>
- Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. Электронно-лучевая сварка (Под ред. Б.Е. Патона). Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
- Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
- Hong J.K., Park J.H., Park N.K., Eom I.S., Kim M.B., Kang C.Y. Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 welds by CO₂ laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;1:515–520. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.224>
- Patela V., Salia A., Hyderb J., Corlissb M., Hyderb D., Hunga W. Electron beam welding of inconel 718 procedia manufacturing. In: *Proc. 48th SME North American Manufacturing Research Conference* (Ohio, USA). 2020. Vol. 1. P. 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
- Raza T., Andersson J., Svensson L.E. Vareststraint weldability testing of additive manufactured alloy 718. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(7): 606–611. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1437338>
- Agilan M., Venkateswaran T., Sivakumar D., Pant B. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Inconel-718 EB welds. *Procedia Materials Science*. 2014;5:656–662. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.312>
- Mei Y., Liu Y., Liu C., Li C., Yu L., Guo Q., Li H. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718. *Materials and Design*. 2016;89:964–977. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.082>
- Peng G., Zhang K.F., Zhang B.G., Jiang S.S., Zhang B.W. Microstructures and high temperature mechanical properties of electron beam welded Inconel 718 superalloy thick plate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21:315–322. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61598-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61598-7)
- Manikandan S., Sivakumar D., Rao K.P., Kamaraj M. Effect of enhanced cooling on microstructure evolution of alloy 718 using the gas tungsten arc welding process. *Weld World*. 2016. 18 p. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0349-1>
- Zhang Y.N., Cao X., Wanjara P. Microstructure and hardness of fiber laser deposited Inconel 718 using filler wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69:9–12. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5171-y>
- Song K.H., Kim W.Y., Nakata K. Investigation of microstructure and mechanical properties on surface-modified Inconel 718 alloy. *Materials Transactions*. 2013;(54)10:2032–2036. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2013096>
- Sonar T., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Venkateswaran T., Sivakumar D. Effect of Delta current and Delta current frequency on microstructure and tensile properties of gas tungsten constricted arc (GTCA) welded Inconel 718 alloy joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2019;28(1):186–200. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2019-0020>
- Sumit K. Sharma, Prashant Agarwal, J. Dutta Majumdar. Studies on electron beam welded Inconel 718 similar joints: Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (23–25 January 2017, Kruger National Park). *Procedia Manufacturing*. 2017;7:654–659. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.097>
- Tushar S., Visvalingam B., Sudersanan M., Thiruvankatam V., Dhenuvakonda S. Influence of magnetically constricted arc traverse speed (MCATS) on tensile properties and microstructural characteristics of welded Inconel 718 alloy sheets. *Defence Technology*. 2020. P. 40. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.07.009>
- Kwon S.I., Bae S.H., Do J.H., Jo C.Y., Hong H.U. Characterization of the microstructures and the cryoge-

- nic mechanical properties of electron beam welded Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2015;47(2):77–87.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-3269-6>
19. Jia Z., Wan X., Guo D. Study on microstructure and mechanical properties of Inconel718 components fabricated by UHFP-GTAW technology. *Materials Letters*. 2019;261: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127006>
 20. Bansal A., Sharma A.K., Das S., Kumar P. Characterization of microstructure and strength of microwave welded Inconel 718 joints at 2.45 GHz frequency. *Kovove materijali*. 2016;54:27–35.
https://doi.org/10.4149/km_2016_1_27
 21. Никифоров Р.В., Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р., Камалетдинова Р.Р., Башаров Р.Р. Структура и свойства сварных соединений сплава ЭП718, полученных роботизированной сваркой плавящимся электродом. *Вестник УГАТУ*. 2021;4(94):10–18.
 Nikiforov R.V., Galimov V.R., Hisamutdinov E.R., Kamalutdinova R.R., Basharov R.R. Structure and properties of welded joints of EP718 alloy produced by robotic consumable electrode welding. *Vestnik UGATU*. 2021;4(94):10–18. (In Russ.).
 22. Баранов Д.А., Паркин А.А., Жаткин С.С. Особенности формирования сварного шва жаропрочного сплава ХН45ВМТЮБР в зависимости от режимов лазерной сварки. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018;4(2):170–176.
 Baranov D.A., Parkin A.A., Zhatkin S.S. Peculiarities of weld seam formation in KhN45VMTYuBR heat-resistant alloy depending on laser welding modes. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2018;4(2):170–176. (In Russ.).
 23. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев: ЭкоТехнология, 2004. 260 с.
 24. Сорокин Л.И. Образование горячих трещин в околошовной зоне при сварке жаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное производство*. 2005;8:4–18.
 Sorokin L.I. Formation of hot cracks in the near-weld zone during welding of heat-resistant nickel alloys. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2005;8:4–18. (In Russ.).
 25. Паршуков Л.И., Гильмутдинов Ф.З. Электронно-лучевая сварка и локальная термообработка сварных швов из жаропрочных сплавов. *Труды ВИАМ*. 2017;5(53):23–31.
 Parshukov L.I., Gilmutdinov F.Z. Electron-beam welding and local heat treatment of welds from heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*. 2017;5(53):23–31. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-5-3-3>

Информация об авторах

Сергей Леонидович Исаев – зам. гл. сварщика по производству, ПАО «ОДК-Кузнецов».

<https://orcid.org/0009-0006-6329-4685>

E-mail: isl231083@yandex.ru

Дмитрий Александрович Баранов – к.т.н., зам. гл. сварщика по новым и ремонтным технологиям, ПАО «ОДК-Кузнецов».

<https://orcid.org/0009-0009-8955-8556>

E-mail: D.Baranov91@mail.ru

Евгений Юрьевич Щедрин – гл. сварщик, ПАО «ОДК-Кузнецов».

<https://orcid.org/0009-0004-0406-915X>

E-mail: Chiefwelder24@yandex.ru

Владимир Сергеевич Муратов – д.т.н., профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет (СамГТУ).

<https://orcid.org/0000-0001-8637-1096>

E-mail: muratov1956@mail.ru

Константин Владимирович Никитин – д.т.н., декан факультета металлургии, машиностроения и транспорта, СамГТУ.

<https://orcid.org/0000-0001-7061-0144>

E-mail: kvn-6411@mail.ru

Сергей Сергеевич Жаткин – к.т.н., профессор кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии», СамГТУ.

<https://orcid.org/0000-0001-5625-848X>

E-mail: Sergejat@mail.ru

Information about the authors

Sergey L. Isaev – Deputy Chief Welder for Production, PJSC “ODK-Kuznetsov”.

<https://orcid.org/0009-0006-6329-4685>

E-mail: isl231083@yandex.ru

Dmitry A. Baranov – Cand. Sci.(Eng.), Deputy Chief Welder for New and Repair Technologies, PJSC “ODK-Kuznetsov”.

<https://orcid.org/0009-0009-8955-8556>

E-mail: D.Baranov91@mail.ru

Evgeny Yu. Shchedrin – Chief Welder, PJSC “ODK-Kuznetsov”.

<https://orcid.org/0009-0004-0406-915X>

E-mail: Chiefwelder24@yandex.ru

Vladimir S. Muratov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University (SamSTU).

<https://orcid.org/0000-0001-8637-1096>

E-mail: muratov1956@mail.ru

Konstantin V. Nikitin – Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Faculty of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, SamSTU.

<https://orcid.org/0000-0001-7061-0144>

E-mail: kvn-6411@mail.ru

Sergey S. Zhatkin – Cand. Sci.(Eng.), Professor of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, SamSTU.

<https://orcid.org/0000-0001-5625-848X>

E-mail: Sergejat@mail.ru

Вклад авторов

С.Л. Исаев – определение цель работы, проведение экспериментов, написание текста статьи.

Д.А. Баранов – подготовка исходных образцов, участие в обсуждении результатов.

Е.Ю. Щедрин – участие в проведении металлографического исследования структуры сварных швов и в обсуждении результатов.

В.С. Муратов – определение методики экспериментов, участие в обсуждении результатов, написание текста статьи.

К.В. Никитин – участие в написании статьи и обсуждении результатов

С.С. Жаткин – литературный обзор, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

S.L. Isaev – determined the purpose of the work, conducted experiments, wrote an article.

D.A. Baranov – prepared the initial samples, participated in the discussion of the results.

E.Yu. Shchedrin – participated in the metallographic study of the structure of welds, participated in the discussion of the results.

V.S. Muratov – determined the methodology of experiments, participated in the discussion of the results, wrote the article.

K.V. Nikitin – participated in writing the article and discussing the results

S.S. Zhatkin – carried out a literature review, participated in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023, доработана 02.10.2023, подписана в печать 04.10.2023

The article was submitted 11.07.2023, revised 02.10.2023, accepted for publication 04.10.2023