

## Оригинальная статья

УДК 669.24; 620.196.5; 621.791.669

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СВАРНОГО ШВА СПЛАВА ЭП-718, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

© 2025 С. Л. Исаев<sup>1,2</sup>, Д. А. Баранов<sup>1</sup>, В. С. Муратов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «ОДК-Кузнецов» (Россия, 443022, Самара, Заводское шоссе, 29)

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

**Аннотация.** Сварные соединения жаропрочных никелевых сплавов получают различными способами. Наиболее перспективными из них являются методы, использующие концентрированные потоки энергии, в том числе лазерную и электронно-лучевую сварку. Рассмотрена электронно-лучевая сварка хромоникелевого дисперсионно твердеющего жаропрочного сплава ЭП718 (ХН45МВТЮБР-ИД). Получены сварные швы, используя режимы с постоянной скоростью перемещения луча по поверхности и различными токами с обеспечением полного провара образцов. Перед проведением исследования образцы прошли термическую обработку (закалка + старение). Исследована их микроструктура, механические свойства (временное сопротивление, предел текучести, относительные удлинение и сужение, ударная вязкость). Проведено исследование влияния утолщенных границ зерен в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных швов на долговечность неразъемного соединения. При режимах сварки с погонной энергией 2,25 и 2,33 кДж/мм в микроструктуре всех образцов выявлено наличие утолщенных границ зерен, при погонной энергией 2,44 кДж/мм – получены образцы как с утолщенными границами зерен, так и без них. Утолщенные границы зерен ЗТВ имеют ширину 3 – 7 мкм. При испытании образцов на выносливость их разрушение в обоих случаях произошло как по сварному шву, так и по ЗТВ. Выдвинуто предположение о механизме появления утолщений границ зерен в зоне термического влияния. На основании результатов испытаний выявили, что утолщения границ зерен шириной до 4 мкм не оказывают влияния на усталостную прочность сварных соединений. Наличие утолщения границ зерен шириной более 5 мкм снижает прочность сварного шва жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава ЭП718, они являются концентраторами напряжений и могут привести к дальнейшему появлению трещин в условиях реального нагружения.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, металлографическое исследование, микроструктура, испытание на выносливость

**Для цитирования:** Исаев С.Л., Баранов Д.А., Муратов В.С. Механические свойства и структура сварного шва сплава ЭП-718, полученного электронно-лучевой сваркой. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):51–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-51-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62)

## Original article

## MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE WELDED SEAM OF THE IP-718 (INCONEL 718) ALLOY OBTAINED BY ELECTRON BEAM WELDING

© 2025 S. L. Isaev<sup>1,2</sup>, D. A. Baranov<sup>1</sup>, V. S. Muratov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC UEC-Kuznetsov (29 Zavodskoe shosse, Samara, 443022, Russian Federation)

<sup>2</sup>Samara State Technical University (244 Molodogvardeiskaya str., Samara, 443100, Russian Federation)

**Abstract.** Welded joints of heat-resistant nickel alloys are produced by various methods, the most promising are those using concentrated energy flows, including laser and electron beam welding. In this paper, electron beam welding of chromium-nickel precipitation hardening heat-resistant alloy EP718 (CrNi45WMoTiAlBP-ID) is considered.

In the work, welds were obtained in welding modes with a constant beam travel speed over the sample surface and different beam currents while ensuring complete sample penetration. Before the study, the samples were heat treated (quenching + aging). Their microstructure, mechanical properties (tensile strength, yield strength, relative elongation and contraction, impact toughness) were studied; the effect of thickened grain boundaries in the heat-affected zone of welds on the durability of a permanent joint was studied. In welding modes with linear energy of 2.25 and 2.33 kJ/mm, the presence of thickened grain boundaries was revealed in the microstructure of all samples; with linear energy of 2.44 kJ/mm, samples were obtained both with thickened grain boundaries and without them. The thickened grain boundaries in the HAZ have a width of 3 – 7  $\mu\text{m}$ . During endurance testing of the samples, their destruction in both cases occurred both along the weld and along the HAZ. An assumption has been made about the mechanism of occurrence of grain boundary thickenings in the HAZ. Based on the test results, it has been revealed that grain boundary thickenings up to 4  $\mu\text{m}$  wide do not affect the fatigue strength of welded joints. The presence of grain boundary thickenings more than 5  $\mu\text{m}$  wide reduces the strength of the weld of the heat-resistant precipitation-hardening alloy EP718; they are stress concentrators and can lead to further cracking under real loading conditions.

**Keywords:** electron beam welding, metallographic examination, microstructure, endurance test

**For citation:** Isaev S.L., Baranov D.A., Muratov V.S. Mechanical properties and structure of the welded seam of the IP-718 (Inconel 718) alloy obtained by electron beam welding. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):51–62. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-51-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62)

## Введение

Дисперсионно-твердеющие сплавы на основе никеля широко применяются в авиастроении для изготовления высоконагруженных узлов, эксплуатирующихся при температурах до 800 °С [1]. К таким материалам относится сплав ЭП718 (ХН45ВМТЮБР-ИД). Для получения неразъемного соединения рассматриваемого сплава применяют технологии аргонодуговой, лазерной и электронно-лучевой сварки (ЭЛС) [2; 3].

Анализ научных исследований зарубежных и отечественных ученых в работах [4 – 13] показал, что для рассматриваемого сплава отсутствуют исследования по влиянию на долговечность сварного соединения возникающих при сварке и последующей обработке утолщенных границ зерен.

Целью настоящей работы является исследование влияния на долговечность неразъемного соединения утолщенных границ зерен в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных швов статора высокого давления авиационного двигателя из жаропрочного сплава ЭП718.

## Методика проведения эксперимента

Статор высокого давления изготавливается сваркой двух заготовок: задний фланец 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 микроstructures и механических свойств сварных швов проводили на образцах-имитаторах

(рис. 1, а). Образцы (200 × 50 × 13 мм) были изготовлены из цельнокатаного кольца 1 и листового материала 2 жаропрочного сплава ЭП718.

Химический состав сплава образцов (сплав ЭП718) был определен методом спектрального анализа на спектрометре (табл. 1).

Неразъемные соединения получили на установке электронно-лучевой сварки. На различных режимах ЭЛС изменяли силу тока луча, скорость перемещения образца относительно луча оставалась неизменной.

Закалку проводили в элеваторной, а старение в шахтной электропечи.

Размер зерна определяли методом измерения длин хорд по ГОСТ 5639 – 82 в программном комплексе. Исследование микроstructures проводили на оптическом микроскопе с анализатором микроstructures поверхностных твердых тел при различных увеличениях. Замер микротвердости проводился при нагрузке 50 г.

Образцы испытывали на выносливость при консольном изгибе при частоте колебаний основного тона примерно 500 Гц. База испытаний составляла  $10^7$  циклов, температура испытаний – 20 °С, начальный уровень переменных напряжений – 400 МПа, изменение уровня переменных напряжений  $\sigma_a$  проводили с шагом 20 МПа.

## Результаты исследований и их обсуждение

В условиях серийного производства после ЭЛС на лицевой поверхности по границе сварного шва имеются продольные строчечно-точечные свечения, выявленные капиллярным контролем (рис. 2), что указывает предположительно на наличие дефектов в виде трещин. Деталь после сварки прошла термическую обработку (закалку + старение) для снятия напряжений.

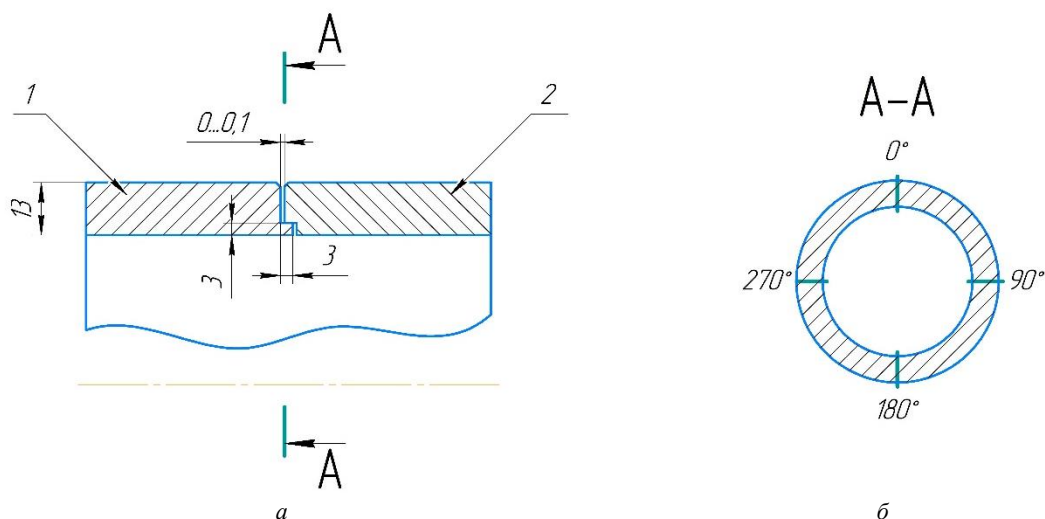


Рис. 1. Эскиз образца-имитатора (а) и схема вырезки образцов (б):  
1 – кольцо цельнокатаное; 2 – листовый материал

Fig. 1. Sketch of a sample-imitator (a) and sample cutting scheme (b):  
1 – solid rolled ring; 2 – sheet material

Для определения особенностей характерных признаков выявленных дефектов применяли металлографическое исследование сварного шва. Макро- и микроисследования проводили в четырех диаметрально противоположных поперечных сечениях сварного соединения. Макроструктура в разных направлениях идентична (рис. 3). Ширина шва с лицевой стороны составляет  $6,0 \div 6,5$  мм, с внутренней –  $1,9 \div 2,0$  мм.

На образцах как со стороны цельнокатаного кольца, так и со стороны листового материала наблюдается разнотекстурированная микроструктура во всех сечениях детали. В основном микроструктура состоит из зерен 2 – 3 балла. На цельнокатаном кольце балл зерна составляет от 2 до 5 (рис. 4, а), на листовом материале – от 3 до 5 (рис. 4, б). В отдельных зонах наблюдаются зерна второго и третьего балла, окруженные цепочками зерен пятого и шестого балла шкалы ГОСТ 5639 – 82. Микроструктура материала свариваемых деталей аустенит + карбиды, дефектов металлургического характера не обнаружено.

В исследуемых сечениях в зоне термического влияния (ЗТВ) рассматриваемого соединения обнаружены трещины, расположенные в основном материале свариваемых деталей с выходом на поверхность границы сварного шва протяженностью до 0,6 мм (рис. 5). В ЗТВ на расстоянии 0,1 – 0,3 мм от сварного шва обнаружены трещины без выхода на поверхность протяженностью 0,1 – 0,4 мм (рис. 6).

В зоне термического влияния под «грибком» наблюдается значительное количество утолщений границ зерен. Именно по ним существует наибольшая вероятность образования дефектов (микротрещин) из-за действия максимальных растягивающих температурных деформаций, возникших при ЭЛС и последующей термической обработке.

Микроструктура основного материала свариваемых деталей аустенит + карбиды (4 – 5 балл зерна с отдельными зернами 3 балла).

Результаты замеров микротвердости образцов с четырех диаметрально противоположных вырезанных мест представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

**Химический состав материала**  
**Table 1. Chemical composition of the material**

| Место вырезки образца (рис. 1) | Содержание, %, элемента |            |            |             |              |         |         |           |           |           |           |           |
|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------|--------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                | C                       | Si         | Mn         | S           | P            | Cr      | Ni      | W         | Mo        | Ti        | Al        | Nb        |
| 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      |
| 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                             | $\leq 0,1$              | $\leq 0,3$ | $\leq 0,6$ | $\leq 0,01$ | $\leq 0,015$ | 14 – 16 | 43 – 47 | 2,5 – 3,5 | 4,0 – 5,2 | 1,9 – 2,4 | 0,9 – 1,4 | 0,8 – 1,5 |



Рис. 2. Свечения в зоне сварного соединения  
Fig. 2. Glow in the weld zone

Для исследования влияния утолщения границ зерен на выносливость сварного шва изготовлена партия образцов-имитаторов, полученных при различных режимах сварки (табл. 3).

Режимы сварки (погонную энергию) выбрали для обеспечения полного провара образцов толщиной 13 мм, исходя из рекомендаций нормативной документации [14] и режима, рассмотренного в работе [15].

Для повышения стойкости сварного соединения против термического растрескивания в условиях его эксплуатации (в интервале температур старения), а также уровня и стабильности прочностных характеристик и работоспособности выполнен полный цикл термической обработки (закалка + старение):

1. Термическая обработка до сварки – закалка (нагрев на воздухе 1100 °С, время  $\tau$  нагрева 2 ч, охлаждение на воздухе).
2. Термическая обработка после сварки – закалка (снятие напряжений; нагрев на воздухе до 1100 °С,  $\tau = 1$  ч, охлаждение в контейнере на воздухе с подачей аргона до температуры 500 – 600 °С, далее охлаждение без подачи аргона); старение 1 (нагрев на воздухе до 780 °С,  $\tau = 5$  ч, охлаждение на воздухе); старение 2 (нагрев на воздухе до 650 °С,  $\tau = 16$  ч, охлаждение на воздухе).

Для проверки механических свойств сварных соединений из образцов-имитаторов изготовлены образцы для определения временного сопротивления, предела текучести, относительного

удлинения и сужения (рис. 7, а, тип образца XIII) и ударной вязкости (рис. 7, б, тип образца IX) в соответствии с ГОСТ 6996 – 66, сварной шов расположен в центре образца. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Разрушение разрывных образцов с определением временного сопротивления произошло в образцах 1 и 2 по основному материалу на расстоянии 0,5 – 2,0 мм от сварного шва, 3 – по сварному шву. При макроисследовании поверхности излома всех образцов трещин не обнаружено. В исследованных сварных швах имеется провар 100 %.

При исследовании макроструктуры сварных швов подтверждены характерные для ЭЛС зоны: зона «грибка» (параметры  $h$ ,  $b$ ), кинжальная зона (параметры  $e$ ,  $d$ ), корень шва сформирован в замковой части соединения. Габаритные размеры сварного шва (рис. 8) каждого режима представлены в табл. 5. При режиме сварки 2 наблюдается максимальная ширина ванны  $b$  в зоне «грибка», при режиме 1 высота  $h$  «грибковой» зоны максимальная, что приводит к дополнительному нагреву, росту вероятности утолщения границ зерен и ожидаемого образования микротрещин. При режимах 2 и 3 получили высоту «грибковой» зоны одинаковую, ширина этой зоны минимальная при режиме 3 с требуемой глубиной провара.

Установлено, что в основном материале всех образцов в ЗТВ наблюдается однородная микроструктура, размер зерна соответствует 2 – 3 баллу, основной материал 3 – 4 баллу шкалы ГОСТ 5639 – 82.

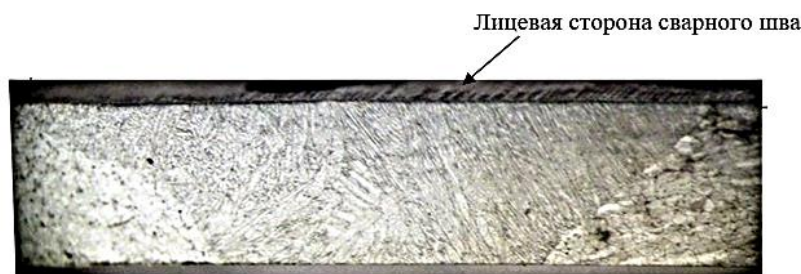


Рис. 3. Макроструктура сварного соединения в поперечном сечении шлифа  
Fig. 3. Macrostructure of a welded joint in a cross-section of a section

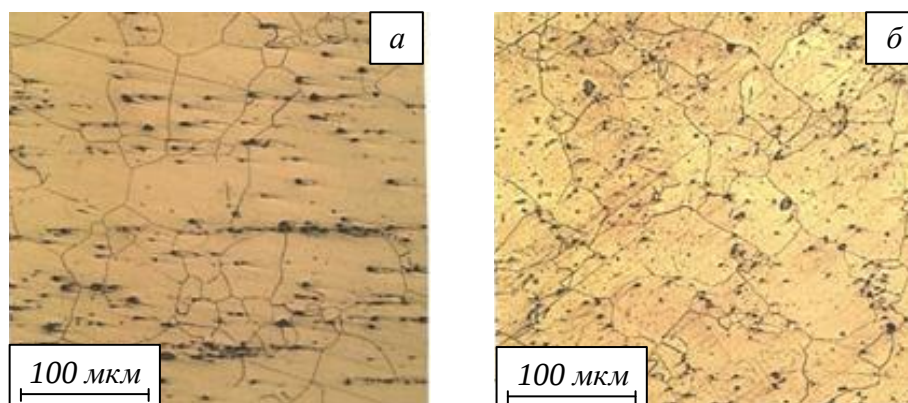


Рис. 4. Микроструктура основного материала цельнокатаного кольца (а) и листового материала (б)  
Fig. 4. Microstructure of the base material of a solid rolled ring (a) and the genuine material (б)

В ЗТВ под «подгрибковой» зоной на локальных участках наблюдается утолщение границ зерен шириной 3 – 7 мкм (табл. 6). Это предположительно обусловлено выделением карбидных фаз при нагреве во время сварки с последующим охлаждением и ускоренной диффузией по границам зерен, что может привести к образованию трещин [26; 27]. После термической обработки количество утолщенных границ зерен увеличилось. Для определения влияния утолщения границ зерен на выносливость проведены сравнительные испытания образцов с утолщенными границами зерен и без них.

Для испытаний рассматривали образцы (режимы 1 – 3), вырезанные из деталей, которые прошли полный технологический цикл (сварка, термическая и механическая обработки). По результатам исследования микроструктуры на всех образцах, полученных по режимам 1 и 2, имеются утолщения границ зерен, при реализации режима 3 утолщенные границы выявлены не на всех образцах.

Сварной шов

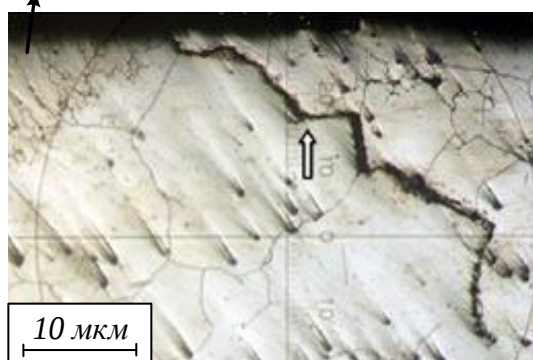


Рис. 5. Трещина в ЗТВ, выходящая к границе сварного шва  
Fig. 5. A crack in the heat-affected zone extending to the weld boundary

Для испытания брали образцы в количестве 40 шт. (режим сварки 1 – 3) с утолщением границ зерен в ЗТВ и 30 шт. (режим сварки 3) без утолщенных границ зерен в ЗТВ.

Перед проведением испытаний все образцы препарировали тензорезисторами с базой 5 мм (рис. 9). Режим испытаний задавали по контрольному тензорезистору 1, наклеенному на сварном шве. Для контроля режима испытаний использовался тензорезистор 2.

Образцы испытывали на выносливость при консольном изгибе на вибростенде при частоте основного тона (первая форма собственных колебаний детали). При задании уровня переменных напряжений динамический модуль упругости  $E$  для сплава ЭП718 при комнатной температуре был принят 204 000 МПа. За критерий разрушения принимали снижение резонансной частоты колебаний образца на 2 % относительно исходного значения. Для визуального обнаружения трещин испытания продолжали до снижения резонансной частоты примерно на 10 %, наработанные

Сварной шов

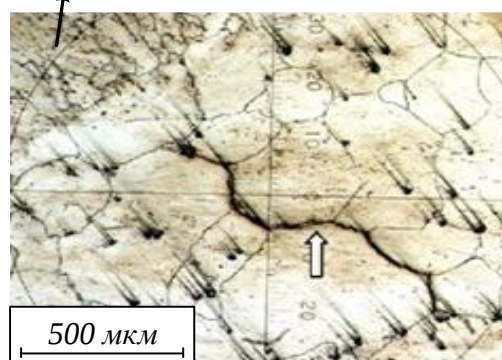


Рис. 6. Трещина в ЗТВ  
Fig. 6. Crack in the heat-affected zone

**Результаты измерения микротвердости**  
**Table 2. Microhardness measurement results**

| Образец             | Микротвердость, МПа           |              |                      |
|---------------------|-------------------------------|--------------|----------------------|
|                     | детали из листового материала | сварного шва | цельнокатаной детали |
| 1 (рис. 1, б, 0°)   | 4175 – 4234                   | 4292 – 4351  | 4116 – 4234          |
| 2 (рис. 1, б, 90°)  | 4292 – 4351                   | 4351 – 4420  | 4292 – 4420          |
| 3 (рис. 1, б, 180°) | 4214 – 4302                   | 4263 – 4381  | 4067 – 4155          |
| 4 (рис. 1, б, 270°) | 4126 – 4194                   | 4400 – 4479  | 4204 – 4283          |

**Режимы сварки образцов**  
**Table 3. Welding modes of samples**

| Режим | Погонная энергия, кДж/мм |
|-------|--------------------------|
| 1     | 2,25                     |
| 2     | 2,33                     |
| 3     | 2,44                     |

при этом циклы не учитывали. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 7.

Предел выносливости  $\sigma_a$  образцов, полученных по режиму 3, как с утолщенными границами зерен в ЗТВ, так и без них, не разрушившихся на базе  $1 \times 10^6$  циклов, составил 280 МПа. Предел выносливости образцов, полученных по режимам 1 и 2, с утолщенными границами зерен на базе  $12 \times 10^6$  циклов, составил 240 МПа, разрушение произошло по ЗТВ.

Наличие утолщений границ зерен в ЗТВ более 5 мкм снижают выносливость образцов, до 4 мкм – не влияет на выносливость образцов. Результаты испытаний образцов, полученных по режиму 3, на сопротивление усталости представлены на рис. 10. Кривые усталости приведены с вероятностью разрушения 50 %.

При внешнем осмотре установлено, что разрушение всех образцов произошло на расстоянии

30,1 – 32,0 мм от основания широкой части в зоне расположения тензодатчика 1 (рис. 11, 12).

При анализе изломов установлено, что разрушение всех образцов имеет усталостный характер. В изломах образцов наблюдаются локальные участки, окисленные до коричневого цвета. Дефектов (пор) сварки, непроваров в изломах образцов не обнаружено. Для описания места расположения очагов разрушения приняли следующие условные обозначения: А – поверхность со стороны маркировки; Б – поверхность со стороны тензодатчика; правый и левый торцы узкой части образца со стороны поверхности А (рис. 12). Высота плоскости разрушения указана от основания широкой части образцов. Расположение очагов разрушения приведено в табл. 8.

Макроанализ проводили на шлифах, изготовленных по боковой поверхности образцов в зоне разрушения. Разрушение образцов произошло как по сварному шву (режим сварки 3, режимы

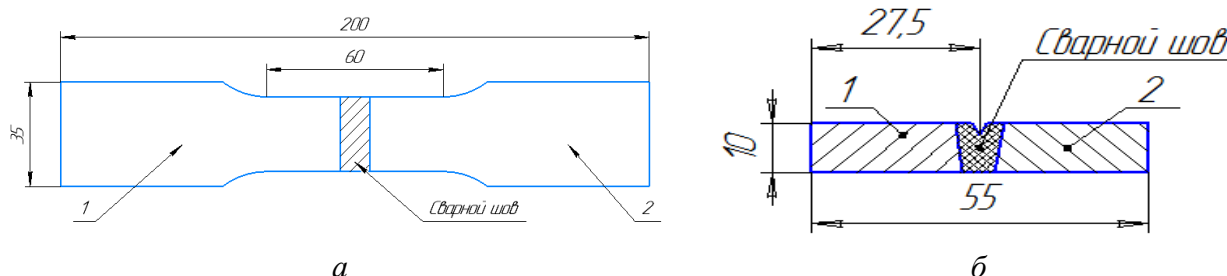


Рис. 7. Эскизы образцов:

а – образец для определения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения и сужения; б – образец для определения ударной вязкости; 1 – кольцо цельнокатаное; 2 – листовый материал

Fig. 7. Sketches of samples:

а – sample for determining tensile strength, yield strength, relative elongation and narrowing; б – sample for determining impact toughness; 1 – solid-rolled ring; 2 – sheet material

**Механические свойства сварных соединений**  
**Table 4. Mechanical properties of welded joints**

| Режим        | Механические свойства сварных соединений                |                                                  |                           |                       |                                                        | Микротвердость,<br>МПа |
|--------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------|------------------------|
|              | Временное<br>сопротивление<br>$\sigma_{\text{в}}$ , МПа | Предел<br>текучести<br>$\sigma_{\text{т}}$ , МПа | Относительное             |                       | Ударная вязкость при<br>изгибе КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |                        |
|              |                                                         |                                                  | удлинение $\delta$ ,<br>% | сужение $\psi$ ,<br>% |                                                        |                        |
| 1            | 1070 – 1090                                             | 630 – 650                                        | 13,0 – 13,8               | 16,9 – 17,8           | 0,60 – 0,62                                            | 3479                   |
| 2            | 1060 – 1080                                             | 610 – 630                                        | 14,6 – 15,0               | 19,6 – 20,1           | 0,60 – 0,62                                            | 3538                   |
| 3            | 1110 – 1130                                             | 620 – 640                                        | 17,3 – 18,2               | 25,7 – 26,4           | 0,55 – 0,57                                            | 3518                   |
| ТУ<br>(лист) | более 1080                                              | более 790                                        | более 13                  | –                     | более 0,35                                             | 2871 – 3557            |

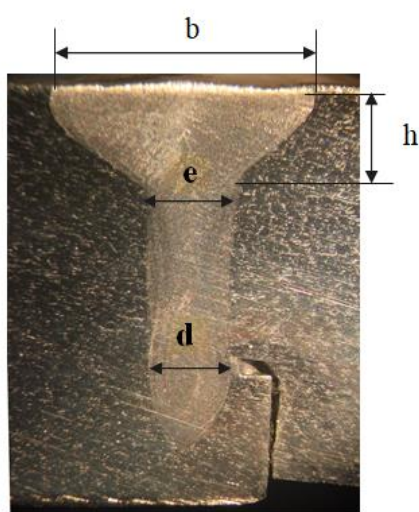


Рис. 8. Макроструктура сварных швов  
 Fig. 8. Macrostructure of welded seams

испытаний 1, 2, 4), так и по ЗТВ (режимы сварки 1 и 2, режимы испытаний 12<sup>1</sup> и 12<sup>2</sup>; режим сварки 3, режимы испытаний 3, 5, 7 – 11). Образцы с утолщением границ зерен шириной более 4 мкм разрушились по ЗТВ (табл. 8). Утолщения границ зерен явились концентраторами образования трещин, что привело к последующему разрушению.

Микроструктура сварного шва имеет столбчатую структуру литого сплава, ближе к центру

наблюдаются нитевидные кристаллы, ЗТВ практически отсутствует, отчетливо просматривается граница сварного шва и основного материала.

Микроструктура ЗТВ, характерная для сплава ЭП718, представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор + упрочняющие фазы. Зерно соответствует 2 – 4 баллу шкалы ГОСТ 5639 – 82. Ширина сварного шва, замеренная на образцах, разрушенных по ЗТВ, составляет примерно 5,5 – 6,2 мм. Разрушение образцов в ЗТВ произошло по телу зерен, что подтверждается анализом траектории развития трещины и типично для усталостного разрушения (рис. 13).

### Выводы

Микроисследованием шлифов выявлены утолщения границ зерен шириной 3 – 7 мкм в ЗТВ на всех режимах сварки. На режимах сварки с погонной энергией 2,25 и 2,33 кДж/мм ширина утолщения границ зерен составила 4 – 5 и 5 – 7 мкм, 2,44 кДж/мм – 3 – 4 мкм. При испытании на выносливость разрушение образцов (режим сварки 3) без утолщения границ зерен произошло как по сварному шву, так и по ЗТВ на расстоянии примерно 0,6 – 1,2 мм от края сварного шва. При испытании на выносливость разрушение образцов (режим сварки 3) с утолщением границ зерен произошло по ЗТВ на расстоянии примерно 0,5 – 1,9 мм от сварного шва. Разрушение всех образцов имеет усталостный характер.

**Размеры сварного шва**  
**Table 5. Dimensions of the weld**

| Режим (погонная энергия)  | $h$ , мм      | $b$ , мм  | $e$ , мм  | $d$ , мм  | Глубина провара, мм |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| 1 (2,25 кДж/мм)           | 3,0 – 3,5     | 6,3 – 6,4 | 2,0       | 1,1 – 1,5 | 13,0                |
| 2 (2,33 кДж/мм)           | 2,7 – 3,0     | 6,6 – 6,8 | 2,1 – 2,2 | 1,6 – 1,8 | 13,0                |
| 3 (2,44 кДж/мм)           | 2,5 – 3,0     | 5,5 – 6,2 | 2,5 – 2,6 | 2,1 – 2,2 | 13,0                |
| По нормативному документу | факультативно |           | 1,5 – 3,5 | 1,5 – 2,5 | не менее 10,5       |

**Ширина утолщения границ зерен**  
**Table 6. Width of grain boundary thickening**

| Режим | Ширина утолщения границ зерен, мкм |
|-------|------------------------------------|
| 1     | 4 – 5                              |
| 2     | 5 – 7                              |
| 3     | 3 – 4                              |

Анализ особенностей формирования сварного соединения ЭЛС жаропрочного сплава ЭП718 позволяет сделать предположение о механизме появления утолщений границ зерен в ЗТВ. По результатам исследования и литературным данным степень их проявления зависит от балльности зерна исходных заготовок и усугубляется при наличии в структуре материала зерен крупнее 2 – 3 балла.

Основное количество утолщений границ зерен находятся в ЗТВ под «грибком», в которой существует наибольшая вероятность образования дефектов в виде трещин вследствие действия максимальных растягивающих температурных деформаций, возникших при ЭЛС и последующей термической обработки.

Предел выносливости образцов при режиме сварки с погонной энергией 2,44 кДж/мм как с утолщением границ зерен, так и без, одинаковый (280 МПа). Утолщения границ зерен шириной до 4 мкм не оказывают влияния на усталостную прочность ЗТВ сварных швов.

Наличие утолщения границ зерен шириной более 5 мкм снижает прочность. Предел выносливости образцов на базе  $1,2 \times 10^6$  циклов составил 240 МПа. Имеющиеся утолщения границ зерен в ЗТВ шириной более 5 мкм являются концентратором напряжений и могут привести к дальнейшему появлению трещин в условиях реального нагружения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные дефор-

мируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2011;1–10.

2. 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.  
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14>
3. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014:487.
4. Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, Wayne Hunga. Electron Beam Welding of Inconel 718 Procedia Manufacturing. In: *48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48*, Ohio, USA 48, 2020;1:428–435.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
5. 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>
6. 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>

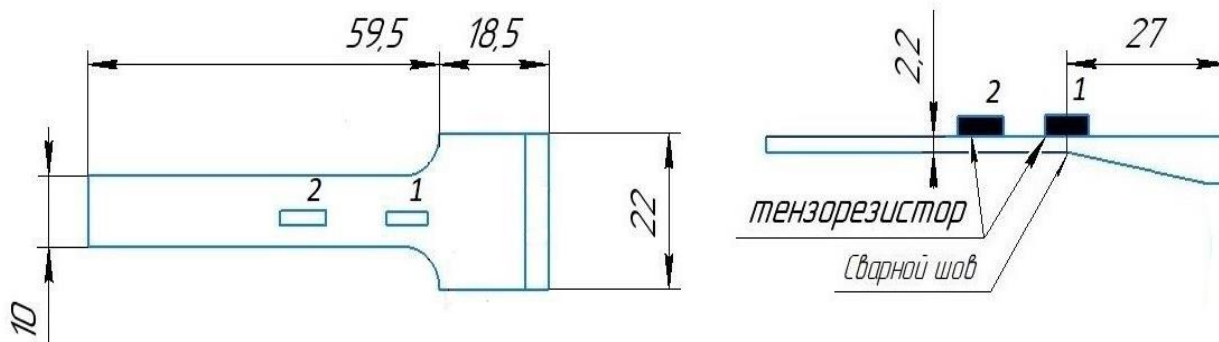


Рис. 9. Эскиз образца для испытания на выносливость  
 Fig. 9. Sketch of a specimen for endurance testing

Параметры испытания на выносливость  
Table 7. Endurance test parameters

| Режима испытания                             | $\sigma_a$ , МПа | Частота основного тона $F$ , Гц | База испытаний $N \cdot 10^{-6}$ , цикл | Место разрушения |
|----------------------------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------|
| <i>Образцы без утолщенных границ зерен</i>   |                  |                                 |                                         |                  |
| 1                                            | 400              | 522                             | 2,21                                    | по сварном шву   |
| 2                                            | 360              | 524                             | 2,72                                    | по сварном шву   |
| 3                                            | 340              | 521                             | 5,39                                    | по ЗТВ           |
| 4                                            | 320              | 517                             | 6,65                                    | по сварном шву   |
| 5                                            | 300              | 499                             | 4,97                                    | по ЗТВ           |
| 6                                            | 280              | 501                             | 1,43                                    | не разрушился    |
| <i>Образцы с утолщенными границами зерен</i> |                  |                                 |                                         |                  |
| 7                                            | 400              | 512                             | 1,99                                    | по ЗТВ           |
| 8                                            | 360              | 521                             | 4,34                                    | по ЗТВ           |
| 9                                            | 340              | 516                             | 10,0                                    | по ЗТВ           |
| 10                                           | 320              | 522                             | 8,21                                    | по ЗТВ           |
| 11                                           | 300              | 507                             | 9,31                                    | по ЗТВ           |
| 12 <sup>3</sup>                              | 280              | 532                             | 1,15                                    | не разрушился    |
| 12 <sup>1</sup>                              | 240              | 518                             | 12,79                                   | по ЗТВ           |
| 12 <sup>2</sup>                              | 240              | 520                             | 12,04                                   | по ЗТВ           |

Примечание: индексы 1 – 3 – образцы, полученные по режимам сварки 1 – 3.

- 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>
- 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;60:899–914. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0349-1>
- 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. *Metall Mater Trans A*. 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. In.: *International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017*, 23-25 January 2017, Kruger National Park. *Procedia Manufacturing*. 2017;7:654 – 659. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.097>
- Jia Z, Wan X, Guo D. Study on microstructure and mechanical properties of Inconel718 components fabricated by UHFP-GTAW technology. *Mater Lett*. 2019;261:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127006>

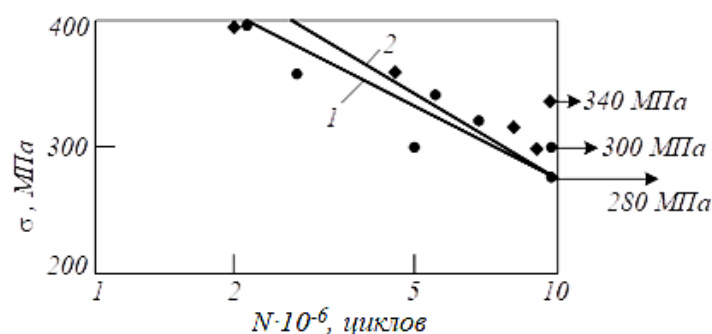


Рис. 10. Кривые сопротивления усталости образцов, полученных по режиму сварки 3, с утолщенными границами зерен по ЗТВ (1, ●) и без утолщенных границ зерен (2, ◆)

Fig. 10. Fatigue resistance curves of samples obtained by welding mode 3 with thickened grain boundaries according to TV (1, ●) and without thickened grain boundaries (2, ◆)

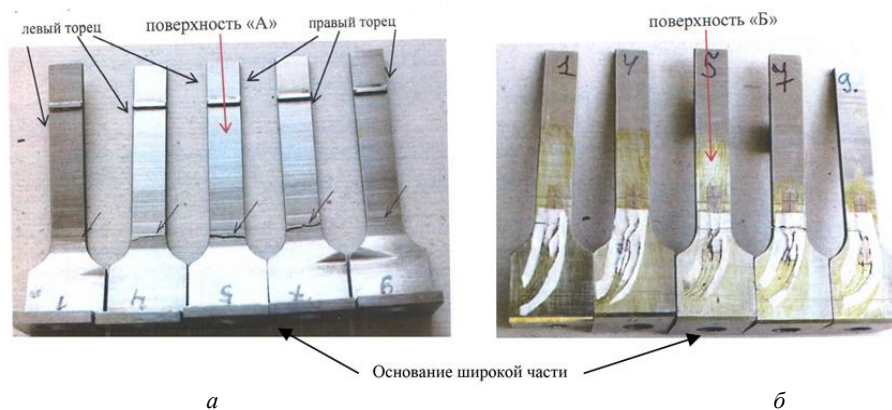


Рис. 11. Внешний вид и место разрушения образцов без утолщенных границ зерен  
Fig. 11. Appearance and location of fracture of samples without thickened grain boundaries

12. 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. [https://doi.org/10.54708/19926502\\_2021\\_254910](https://doi.org/10.54708/19926502_2021_254910)
13. 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.
14. *Производственная инструкция ПИЛ.4.75-2000. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов*. Москва: ОАО НИАТ, 2001:115.
15. 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 ХН45ВМТЮБР-ИД. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;6(29):44–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

#### REFERENCES

1. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Highly heat-resistant deformable nickel alloys for advanced gas turbine engines and gas turbine installations. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*. 2011:1–10. (In Russ.).
2. 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>



Рис. 12. Внешний вид и место разрушения образцов (указано стрелкой) с утолщенными границами зерен  
Fig. 12. Appearance and location of destruction of samples (indicated by arrow) with thickened grain boundaries

**Очаги разрушения**  
**Table 8. Centers of destruction**

| Режимы испытания                                                              | Начало разрушения                                                      | Место разрушения                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Образцы без утолщенных границ зерен</i>                                    |                                                                        |                                                                                    |
| 1                                                                             | На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 1,3 мм от правого торца | Разрушение по сварному шву                                                         |
| 2                                                                             | На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 0,6 мм от правого торца | Разрушение по сварному шву                                                         |
| 3                                                                             | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по основному материалу на расстоянии 0,6 – 1,2 мм от сварного шва (ЗТВ) |
| 4                                                                             | На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 5,3 мм от правого торца | Разрушение по сварному шву                                                         |
| 5                                                                             | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по ЗТВ                                                                  |
| <i>Образцы с утолщенными границами зерен</i>                                  |                                                                        |                                                                                    |
| 7                                                                             | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по ЗТВ                                                                  |
| 8                                                                             | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по основному материалу на расстоянии 1,6 – 1,9 мм от сварного шва (ЗТВ) |
| 9                                                                             | На поверхности <i>B</i> от левого торца                                | Разрушение по ЗТВ                                                                  |
| 10                                                                            | На поверхности <i>B</i> от левого торца                                | Разрушение по ЗТВ                                                                  |
| 11                                                                            | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по основному материалу на расстоянии 0,5 – 0,6 мм от сварного шва       |
| 12 <sup>1</sup>                                                               | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по ЗТВ на расстоянии 0,9 – 1,0 мм от сварного шва                       |
| 12 <sup>2</sup>                                                               | На поверхности <i>B</i> от правого торца                               | Разрушение по ЗТВ на расстоянии 0,7 – 0,8 мм от сварного шва                       |
| Примечание: индексы 1 и 2 – партия образцов получена на режимах сварки 1 и 2. |                                                                        |                                                                                    |

- Makarov E.L., Yakushin B.F. *Theory of weldability of steels and alloys: monograph*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2014:487. (In Russ.).
- Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, Wayne Hunga. Electron Beam Welding of Inconel 718 *Procedia Manufacturing*. In: 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48, Ohio, USA 48, 2020;1:428–435. <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>

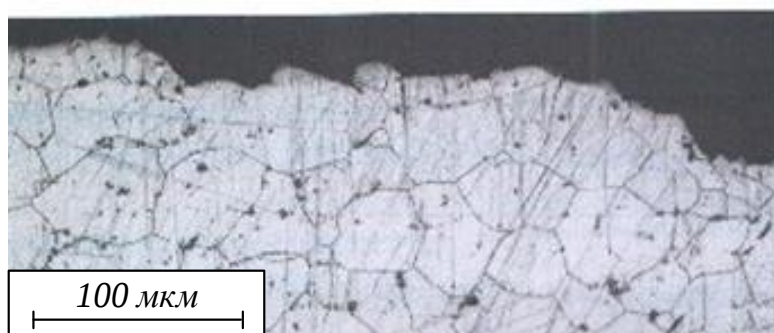


Рис. 13. Микроструктура основного материала около зоны излома образца по основному материалу  
Fig. 13. Microstructure of the base material near the fracture zone of the sample along the base material

8. 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;60:899–914.  
<https://doi.org/10.1007/s40194-016-0349-1>
9. 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. *Metall Mater Trans A*. 2019;28(1):186–200.  
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2019-0020>
10. Sumit K. Sharma, Prashant Agarwal, J. Dutta Majumdar. Studies on Electron beam welded Inconel 718 similar joints. In.: *International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017*, 23–25 January 2017, Kruger National Park. *Procedia Manufacturing*. 2017;7:654–659.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.097>
11. Jia Z, Wan X, Guo D. Study on microstructure and mechanical properties of Inconel718 components fabricated by UHFP-GTAW technology. *Mater Lett*. 2019;261:1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127006>
12. Nikiforov R.V., Galimov V.R., Khisamutdinov E.R., Kamaletdinova R.R., Basharov R.R. Structure and properties of welded joints of EP718 alloy obtained by robotic welding with a melting electrode. *Vestnik UGATU*. 2021;4(94):10–18. (In Russ.).  
[https://doi.org/10.54708/19926502\\_2021\\_254910](https://doi.org/10.54708/19926502_2021_254910)
13. Baranov D.A., Parkin A.A., Zhatkin S.S. Features of the formation of the weld of the heat-resistant alloy KHN45MVTYUBR, depending on the modes of laser welding. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2018;4(2):170–176. (In Russ.).
14. Production instruction PI1.4.75-2000 Arc welding in the environment of protective gases of structural, stainless and heat-resistant steels and alloys. Moscow: JSC NIAT, 2001:115. (In Russ.).
15. 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 KHN45MVTYUBR-ID. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2023;6 (29):44–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

**Сведения об авторах:**

**Сергей Леонидович Исаев**, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалы, Самарский государственный технический университет, главный сварщик, ПАО «ОДК-Кузнецов»

**E-mail:** isl231083@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0006-6329-4685

**Дмитрий Александрович Баранов**, к.т.н., заместитель главного сварщика по новым и ремонтным технологиям, ПАО «ОДК-Кузнецов»

**E-mail:** D.baranov91@mail.ru

**ORCID:** 0009-0009-8955-8556

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

**E-mail:** muratov1956@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8637-1096

**Information about the authors:**

**Sergey L. Isaev**, postgraduate student of Department “Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials”, Samara State Technical University, chief welder for production, PJSC “ODK-Kuznetsov”

**E-mail:** isl231083@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0006-6329-4685

**Dmitry A. Baranov**, Cand. Sci. (Eng.), deputy chief welder for new and repair technologies, PJSC UEC-Kuznetsov

**E-mail:** D.baranov91@mail.ru

**ORCID:** 0009-0009-8955-8556

**Vladimir S. Muratov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the department of metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials Samara State Technical University

**E-mail:** muratov1956@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8637-1096

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 09.10.2024

После доработки 28.10.2024

Принята к публикации 12.11.2024

Received 09.10.2024

Revised 28.10.2024

Accepted 12.11.2024