

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНОГО ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩЕГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП693

© 2021 г. Д.А. Баранов¹, С.С. Жаткин¹, В.И. Никитин¹, В.Б. Деев^{2,3},
К.В. Никитин¹, А.Ю. Баринов¹, Д.М. Юдин¹

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 12.01.21 г., доработана 19.01.21 г., подписана в печать 25.01.21 г.

Аннотация: Рассмотрен процесс создания неразъемного соединения из жаропрочного сплава марки ЭП693 системы Ni–Cr–W–Co–Mo, применяемого в производстве узлов и деталей газотурбинных двигателей, с помощью лазерной сварки на CO₂-комплексе «TruLaser Cell 7020» импульсно-периодическим излучением. Для получения сварного шва использована прищадочная проволока ЭП367 системы Ni–Mo–Cr–Mn. Изучено влияние термической обработки на структуру и свойства околошовной зоны и сварного шва. По результатам исследований проведен анализ структуры сварного соединения и его изломов, выполненных лазерной сваркой, получены физико-механические свойства сварного шва, определен наибольший предел выносливости для сварных соединений при 2·10⁶ циклах. Определена целесообразность использования лазерной сварки жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава при изготовлении обечаек опоры и статора турбины газотурбинного двигателя. Установлено, что комплексная термическая обработка (закалка и старение) обеспечивает оптимальные значения пределов прочности при комнатной и повышенной температурах, а также кратковременную прочность сварных соединений. На основании прочностного расчета по обечайкам опоры и статора турбины газотурбинного двигателя и полученным экспериментальным данным прочности сварных соединений, выполненных при помощи лазерной сварки с импульсно-периодическим излучением, коэффициент запаса прочности составил от 1,35 до 3,0. Данная технология предлагается к внедрению в производство при изготовлении деталей и узлов типа обечаек опоры и статора турбины газотурбинных двигателей с целью повышения качества сварных швов при сокращении времени высокотемпературного нагрева за счет снижения погонной энергии.

Ключевые слова: лазерная сварка, жаропрочный сплав, газотурбинный двигатель, сварное соединение, детали сборочных единиц, физико-механические свойства, структура.

Баранов Д.А. – аспирант кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ (443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244). E-mail: d.baranov91@mail.ru.

Жаткин С.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: sergejat@mail.ru.

Никитин В.И. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Деев В.Б. – докт. техн. наук, проф. факультета машиностроения и автоматизации Уханьского текстильного университета (430200, China, Hubei Province, Wuhan, Textile Road, 1); проф. кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» (119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Никитин К.В. – докт. техн. наук, проф., декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Баринов А.Ю. – вед. инженер кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Юдин Д.М. – магистрант СамГТУ. E-mail: d.yudin2011@yandex.ru.

Для цитирования: Баранов Д.А., Жаткин С.С., Никитин В.И., Деев В.Б., Никитин К.В., Баринов А.Ю., Юдин Д.М. Обеспечение прочности сварных соединений при лазерной сварке жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 3. С. 57–65.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-57-65.

Ensuring the strength of welded joints in laser welding of EP693 heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy

D.A. Baranov¹, S.S. Zhatkin¹, V.I. Nikitin¹, V.B. Deev^{2,3}, K.V. Nikitin¹, A.Yu. Barinov¹, D.M. Yudin¹

¹ Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

Received 12.01.2021, revised 19.01.2021, accepted for publication 25.01.2021

Abstract: The paper considers the process of creating a permanent connection from the EP693 heat-resistant alloy of the Ni–Cr–W–Co–Mo system used in the manufacture of components and parts of gas turbine engines by welding on the TruLaser Cell 7020 CO₂ complex with pulse-periodic radiation. EP367 filler wire of the Ni–Mo–Cr–Mn system was used to obtain the weld. The influence of heat treatment on the structure and properties of the heat-affected zone and the weld was studied. Based on the research results, the weld structure and kinks obtained by laser welding was studied, weld physical and mechanical properties were identified, the maximum endurance limit for welded joints was determined at 2·10⁶ cycles. The expediency of laser welding of the heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy in the manufacture of shells for the turbine support and stator of gas turbine engines was determined. It was found that combined heat treatment (quenching and aging) provides optimal values of strength limits at room and elevated temperatures, as well as short-term strength of welded joints. Based on the strength calculation of the turbine support and stator of gas turbine engines and the obtained experimental data on the strength of welded joints made using laser welding with pulse-periodic radiation, the safety factor was 1.35 to 3.0. This technology is proposed to be introduced into production in the manufacture of parts and assemblies such as shells for the turbine support and stator of gas turbine engines in order to improve the quality of welds by reducing the time of high-temperature heating due to lower heat input.

Keywords: laser welding, heat-resistant alloy, gas turbine engine, welded joint, parts of assembly units, physical and mechanical properties, structure.

Baranov D.A. – postgraduate student of the Department of foundry and high-efficiency technologies, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: d.baranov91@mail.ru.

Zhatkin S.S. – Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of foundry and high-efficiency technologies of SSTU. E-mail: sergejat@mail.ru.

Nikitin V.I. – Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Deev V.B. – Dr. Sci. (Eng.), prof. of School of mechanical engineering and automation of Wuhan Textile University (430200, China, Hubei Province, Wuhan, Textile Road, 1); prof. of Department of metal forming of National University of Science and Technology «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Nikitin K.V. – Dr. Sci. (Eng.), prof., dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport of SSTU. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Barinov A.Yu. – lead engineer of the Department of foundry and high-efficiency technologies of SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Yudin D.M. – undergraduate student of SSTU. E-mail: d.yudin2011@yandex.ru.

For citation: Baranov D.A., Zhatkin S.S., Nikitin V.I., Deev V.B., Nikitin K.V., Barinov A.Yu., Yudin D.M. Ensuring the strength of welded joints in laser welding of EP693 heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 3. P. 57–65 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-57-65.

Введение

Газотурбинный двигатель (ГТД) на сегодняшний день является одним из самых технически сложных изделий современного машиностроения, детали которого работают длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок [1]. Тенденцией развития его конструкции является повышение температуры газа и эксплуатационных нагрузок [2].

В настоящее время в машиностроении широко применяются сложнолегированные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами: жаропрочностью и жаростойкостью. Данные

сплавы в течение ближайших десяти лет будут занимать заметное место в конструкциях компрессоров, турбин и камер сгорания ГТД [2].

Жаропрочные сплавы имеют пониженную свариваемость, что проявляется в образовании трещин и необратимом снижении жаропрочности [3, 4]. Для обеспечения надежности сварных соединений из никелевых сплавов ограничивают уровень их легирования (Ti + Al — менее 4 %), а после сварки выполняют операции закалки и старения.

Поэтому основным требованием, предъявляемым к жаропрочным гомогенным дисперсионно-

твердеющим железохромоникелевым и никелевым сплавам, является обеспечение качественных сварных соединений. Это является сложной задачей, поскольку с повышением жаропрочности сплавов снижаются такие показатели свариваемости, как сопротивляемость образованию трещин при сварке и последующей термообработке (ТО) [5].

На свариваемость влияют такие физико-механические свойства, как коэффициент линейного расширения, соотношение пределов прочности и текучести, горячая пластичность, темп восстановления пластичности при охлаждении [6–8].

Повышение качества сварных швов возможно путем сокращения времени высокотемпературного нагрева за счет снижения погонной энергии. Одним из инновационных современных методов получения качественного сварного соединения из жаропрочных сплавов является применение лазерной сварки.

Лазерная сварка обладает рядом существенных преимуществ перед другими традиционными способами: высокая концентрация энергии, небольшой объем сварочной ванны, малая ширина зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения [9–13]. Эти факторы обеспечивают высокую технологическую прочность сварных соединений и существенное понижение величины деформаций сварных конструкций. Поэтому процесс лазерной сварки с высокой концентрацией энергии и значительным отношением глубины проплавления к ширине шва позволяет получить качественную свариваемость жаропрочных сплавов [14, 15].

Цель работы — исследование влияния параметров сварки на прочность сварных соединений из жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава марки ЭП693.

Материалы и методика экспериментов

Химический состав жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава марки ЭП693 представлен в табл. 1 [16]. Образцы размером $200 \times 100 \times 1,8$ мм вырезали из тонколистового материала, прошедшего в состоянии поставки термическую обработку — закалку при температуре 1080–1100 °С и последующее охлаждение в воде или под водяным душем.

Сварку проводили на лазерном CO₂-комплексе «TruLaser Cell 7020» (корпорация TRUMPF, Германия) по оптимальному режиму, подобранному в процессе исследования [17]: частота следования импульсов — 90 кГц, мощность — 4 кВт, скорость сварки — 33,3 мм/с, скорость подачи присадочной проволоки марки ЭП367 — 33,3 мм/с, диаметр присадочной проволоки — 0,8 мм, диаметр лазерного луча в фокусе — 0,7 мм, фокусное расстояние — 280 мм, защитный газ — He.

Использование при сварке присадочной проволоки марки ЭП367 обусловлено тем, что данный материал обладает высокой стойкостью к образованию горячих трещин [18]. Химический состав присадочной проволоки представлен в табл. 2 [19].

Сборка образцов осуществлялась встык без разделки кромок с обеспечением их прижима к медной подложке по всей поверхности листа в стапеле (рис. 1). Это позволяло имитировать про-

Таблица 1. Химический состав (%) жаропрочного сплава ЭП693

Table 1. Chemical composition (%) of EP693 heat-resistant alloy

Основные элементы							Примеси, не более							
Ni	Cr	W	Mo	Co	Al	Ti	Mn	S	P	C	Si	Fe	B	Ce
Основа	17,0–20,0	5,0–7,0	3,0–5,0	5,0–8,0	1,6–2,3	1,1–1,6	0,40	0,15	0,015	0,10	0,50	5,0	0,05	0,05

Таблица 2. Химический состав (%) сварочной проволоки марки ЭП367

Table 2. Chemical composition (%) of EP367 grade filler wire

Основные элементы				Примеси, не более				
Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	S	P	Fe
Основа	14,0–6,0	14,0–16,0	1,0–2,0	0,50	0,08	0,015	0,015	4,0

изводственные условия изготовления тонколистовых обечаек.

После сварки часть образцов была подвергнута термической обработке в электрической печи «Naberteherm RHTV» (Naberteherm, Германия): закалка на воздухе при температуре $t = 1000 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 ч + старение на воздухе при $t = 700 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ длительностью 16 ч и охлаждение на воздухе [20].

Образцы для механических испытаний на разрыв были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 [21].

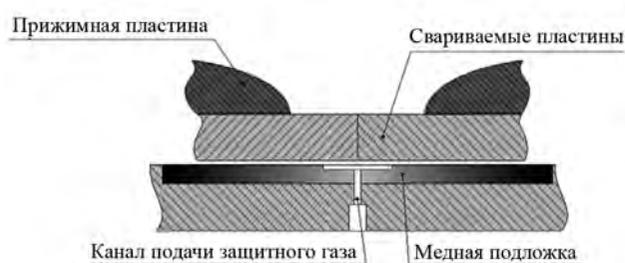


Рис 1. Схема сборки образцов для сварки встык в стапеле с медной подложкой

Fig. 1. Sample assembly diagram for bench butt welding with copper substrate

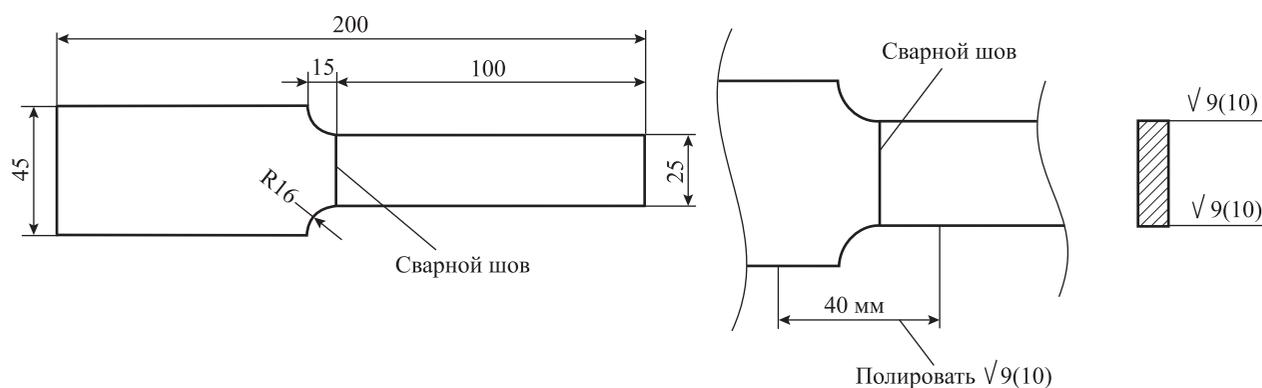


Рис 2. Эскиз образцов для определения предела выносливости

Fig. 2. Outline drawing of samples for endurance limit determination

Таблица 3. Геометрические параметры сварного шва

Table 3. Welded joint geometrical parameters

Способ сварки	Присадочный материал	Ширина шва, мм, со стороны		Высота шва, мм, со стороны	
		усиления	проплава	усиления	проплава
ЛС	Проволока марки ЭП367 диаметром 0,8 мм	2,0–2,4	1,6–1,8	0,2	0,2

Для определения предела выносливости в условиях ПАО «Кузнецов» (г. Самара) были разработаны образцы для испытаний (рис. 2).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Формирование шва при лазерной сварке (ЛС) происходило в виде «песочных часов» при скоростях ЛС более 25 мм/с [22].

Анализ геометрических параметров сварных швов (табл. 3) свидетельствует о том, что в процессе сварки, независимо от источника нагрева, была реализована модель тонкой пластины: ширина сварных швов больше или сопоставима с толщиной свариваемого материала.

Разрушение сваренных образцов в закаленном состоянии поставки, а также в сочетании с закалкой и старением при механических испытаниях на разрыв при комнатной температуре произошло по околошовной зоне сварного соединения со стороны усиления шва (рис. 3). Такой характер разрушения образцов может быть обусловлен большими деформациями, которые приводят к неустраняемым повреждениям границ шва даже за счет применения последующей ТО [22].

Таблица 4. Физико-механические свойства жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава марки ЭП693 в зависимости от вида сварки и термической обработки

Table 4. Physical and mechanical properties of EP693 heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy depending on welding and heat treatment types

Способ сварки	Присадочный материал	Режим ТО	σ_B , МПа	
			20 °С	800 °С
Лазерная (эксперимент)	ЭП367 (Ø 0,8 мм)	ЗСП + Св.	870–897	735–750
		ЗСП + Св. + З + Ст.	1084–1132	765–787
Аргондуговая (АО «НИАТ» [11])	–	ЗСП + Св. + З + Ст.	981–1079	589–687
Аргондуговая (ФГУП «ВИАМ» [5])	ЭП367 (Ø 0,8 мм)	ЗСП + Св. + З + Ст.	1030–1060	640–680
Исходный лист ЭП693 [11]	–	ЗСП	980–1060	–
	–	З + Ст.	980–1080	588–686

Примечание. ЗСП – закаленное состояние поставки; Св. – сварка; З – закалка; Ст. – старение.

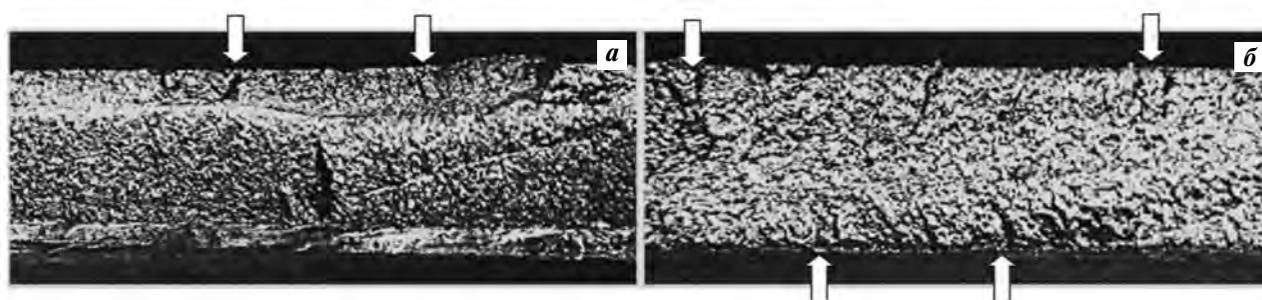


Рис 3. Макроструктура излома (×8)

a – лазерная сварка в закаленном состоянии поставки; *б* – лазерная сварка в сочетании с закалкой и старением

Fig. 3. Fracture macrostructure (×8)

a – laser welding in as-quenched delivery condition; *b* – laser welding in combination with quenching and aging

В табл. 4 представлены экспериментальные и литературные данные по кратковременной прочности сварных соединений, выполненных аргондуговой и лазерной сварками в закаленном состоянии поставки, а также в сочетании с закалкой и старением.

Использование гомогенной присадочной проволоки ЭП367 позволяет получать сварные соединения с достаточно высокой прочностью, которая при ЛС составляет $\sim 0,88 \div 0,92$ от прочности основного материала без последующей ТО. Это достигается за счет дополнительного легирования шва титаном и алюминием из основного металла [5, 23].

После термической обработки (закалка + старение) кратковременная прочность сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, выше

(до 10 %) прочности основного материала, прошедшего аналогичную ТО.

На рис. 3 представлены изломы образцов, соединенных лазерной сваркой, после циклических испытаний.

На рис. 4 приведены макроструктуры сварных соединений с разрушением в околошовной зоне при циклических испытаниях после лазерной сварки с подачей присадочной проволоки до и после ТО.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что разрушение образцов после лазерной сварки при циклических испытаниях имеет различный характер:

– без последующей ТО (рис. 3, *a*) разрушение произошло от корня шва по околошовной зоне (рис. 4, *a*);

– с последующей ТО (рис. 3, *б*) разрушение от-

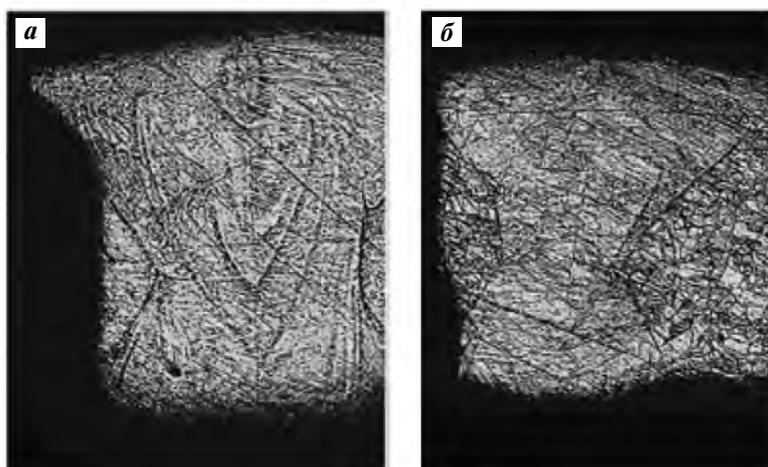


Рис 4. Макроструктура сварного соединения с разрушением в околошовной сварной зоне при циклических испытаниях ($\times 32$)

а – лазерная сварка в закаленном состоянии поставки; *б* – лазерная сварка с последующими закалкой и старением

Fig. 4. Macrostructure of welded joint with heat-affected zone fracture at cyclic tests ($\times 32$)

a – laser welding in as-quenched delivery condition; *b* – laser welding with subsequent quenching and aging

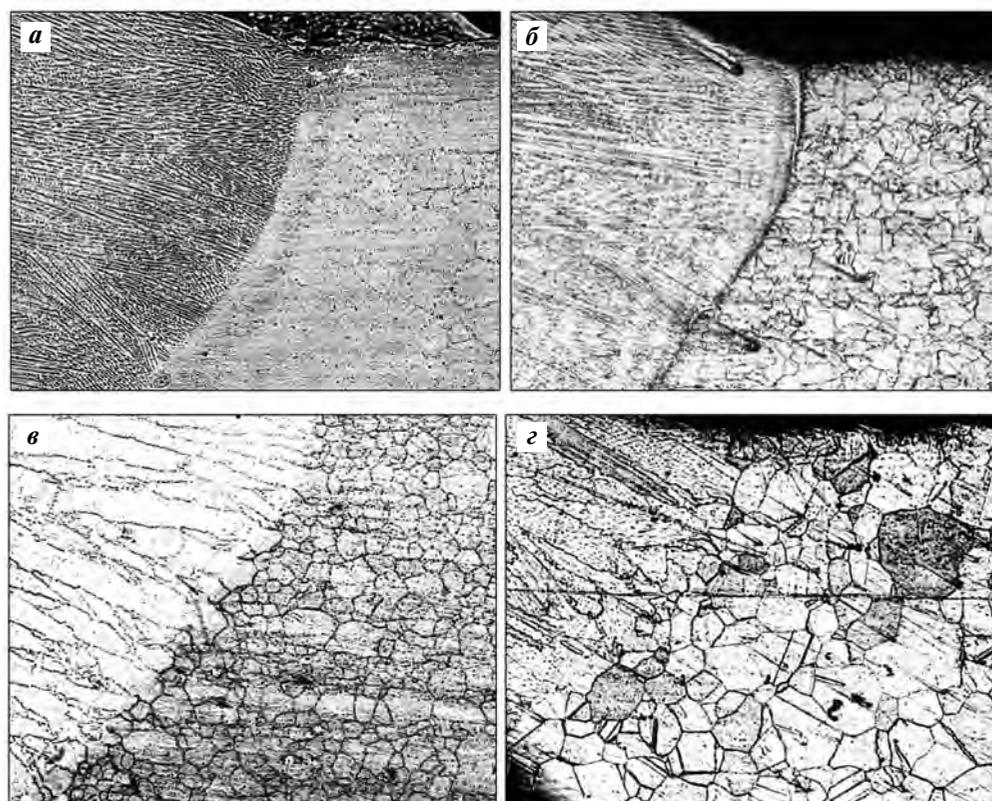


Рис 5. Микроструктура околошовной зоны сварного соединения, выполненного лазерной сваркой, до и после циклических испытаний ($\times 300$)

а – до ТО и циклических испытаний; *б* – до ТО и после циклических испытаний; *в* – после ТО и до циклических испытаний; *г* – после ТО и циклических испытаний

Fig. 5. Heat-affected zone microstructure for welded joint made by laser welding, before and after cyclic tests ($\times 300$)

a – before heat treatment and cyclic tests; *b* – before heat treatment and after cyclic tests; *v* – after heat treatment and before cyclic tests; *z* – after heat treatment and cyclic tests

Таблица 5. Влияние термической обработки на предел выносливости (σ_{-1}) жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693

Table 5. Effect of heat treatment on endurance limit (σ_{-1}) of EP693 heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy

Способ сварки	Присадочный материал	Режим ТО	σ_{-1} , МПа, при долговечности $2 \cdot 10^6$ циклов
ЛС	ЭП367 ($\varnothing 0,8$ мм)	ЗСП + Св.	215–228
		ЗСП + Св. + З + Ст.	215–243
Примечание. ЗСП – закаленное состояние поставки; Св. – сварка; З – закалка; Ст. – старение.			

мечено со стороны усиления и со стороны проплава по околошовной зоне (рис. 4, б).

На рис. 5 представлены микроструктуры околошовных зон сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, до и после ТО и циклических испытаний.

Согласно [22], место разрушения сварных соединений, полученных в результате ЛС, смещается от околошовной зоны в основной материал. При этом прочность сварного шва объясняется высокой дисперсностью структуры и псевдообъемной схемой кристаллизации в верхних и нижних частях сварочной ванны. По мнению авторов [22], прочность околошовной зоны обеспечивается минимальными значениями деформации в процессе сварки, зоной разупрочнения, не превышающей 0,1–0,3 мм, и разной линией сплавления, которая изменяет ортогональность нагрузки при испытаниях к наименее прочной околошовной зоне. Данный феномен наблюдается в сварных соединениях, выполненных лазерной сваркой (см. рис. 4).

Анализ полученной микроструктуры жаропрочного сплава (рис. 5), имеющей средний балл зерна 6–7 по шкале ГОСТа 5639-82, и типов микроструктуры деформируемых жаропрочных сплавов показывает, что сплав ЭП693 обладает характерной мелкозернистой структурой с деформированным упрочнением. Также можно отметить, что циклические испытания не влияют на структуру сварного соединения.

В табл. 5 приведены полученные данные по кратковременной прочности сварных соединений.

Анализ предела выносливости образцов (см. табл. 5) свидетельствует о том, что закалка с последующим старением не влияет на прочность сварных соединений, выполненных лазерной сваркой.

Запас прочности конструкции определяется следующим образом:

$$K_m = \sigma_{\text{дл}} / \sigma_{\text{max}},$$

где $\sigma_{\text{дл}}$ — предел длительной прочности материала в расчетной точке обечайки при соответствующей температуре и времени работы в рассматриваемом режиме, МПа; σ_{max} — максимальное главное напряжение, МПа.

Согласно прочностному анализу сварных обечайек опоры и статора турбины ГТД, которые испытывались по режиму с наименьшим запасом прочности и при удвоенном времени работы, максимальные напряжения на сварные соединения варьировались в диапазоне 65–160 МПа. Следовательно, значения коэффициента K_m для сварных обечайек из жаропрочного сплава ЭП693, выполненных лазерной сваркой, находится в интервале 1,35–3,0.

Согласно нормам прочности ГТД для авиации, запас прочности по местным напряжениям для обечайек ГТД составляет 1,8 [24].

На основании вышеизложенного, применение лазерной сварки для жаропрочного сплава ЭП693 в производстве ГТД по исследованным режимам возможно с целью повышения показателей свариваемости, но ее следует рассматривать в зависимости от максимальных напряжений, действующих на конструкцию.

Выводы

1. Установлено, что кратковременная прочность сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, из жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 без последующей термической обработки составляет 0,9 от прочности основного материала. Последующая термическая обработка стабилизирует структуру сварного соединения и увеличивает его прочность до 10 % от прочности основного материала. Повышение прочности обусловлено применением гомо-

генной присадочной проволоки марки ЭП367 за счет дополнительного легирования шва титаном и алюминием.

2. На основании данных прочностного расчета по обечайкам опоры и статора турбины ГТД и полученных экспериментальных данных о прочности сварных соединений из жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693, выполненных при помощи лазерной сварки с импульсно-периодическим излучением, выявлено, что коэффициент запаса прочности составляет от 1,35 до 3,0.

3. Показано, что использование лазерной сварки по исследованным режимам жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 целесообразно для сварных конструкций, где максимальные напряжения на сварные соединения составляют до 120 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

Acknowledgments: *The research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the project component of Government Task № 0778-2020-0005.*

Литература/References

1. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы: Учеб. для вузов. Сер. Газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 2007.
Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. Automation and regulation of aircraft engines and power plants. Systems. Moscow: Mashinostroenie, 2007 (In Russ.).
2. *Ломбер Б.С., Моисеев С.А.* Жаропрочные деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД. *Все материалы. Энциклопед. справочник.* 2007. No. 6. С. 2—5.
Lomber B.S., Moiseev S.A. Heat-resistant and wrought alloys for modern promising gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 2007. No. 6. P. 2—5 (In Russ.).
3. *Naffakh H., Shamanian M., Ashrafizadeh F.* Dissimilar welding of AISI310 austenitic stain less steel to nickel-based alloy Inconel657. *J. Mater. Process. Technol.* 2009. No. 209. P. 3628—3939.
4. *Никоненко Е.Л., Попова Н.А., Сизоненко Н.Р., Деммент Т.В., Конева Н.А.* Изменение структуры жаропрочного сплава, легированного рением и лантаном, в зависимости от термической обработки. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2018. Т. 61. No. 4. С. 294—299.
Nikonenko E.L., Popova N.A., Sizonenko N.R., Dement T.V., Koneva N.A. Change of the structure of a heat-resistant alloy doped by rhenium and lanthanum depending on thermal processing. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy).* 2018. Vol. 61. No. 4. P. 294—299 (In Russ.).
5. *Qian M., Lippold J.C.* Liquefaction phenomena in the simulated heat-affected zone of alloy 718 after multiple post weld heat treatment cycles. *Weld. J.* 2003. Vol. 82. No. 6. P. 145—150.
6. *Сорокин Л.И.* Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. *Свароч. пр-во.* 1971. No. 4. С. 4—5.
Sorokin L.I. Weldability of heat resistant alloys used in aircraft gas turbine engines. *Svarochnoe proizvodstvo.* 1971. Vol. 4. P. 4—5 (In Russ.).
7. *Ma G., Wu D., Niu F., Zou H.* Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welding Ni-based superalloy. *Opt. Lasers Eng.* 2015. Vol. 72. P. 39—46.
8. *Муравьев В.И., Бахматов П.В., Плетнев Н.О., Дебеляк А.А.* Влияние напряженного состояния на структуру и свойства при сварке конструкций из сталей и сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2016. Т. 59. No. 4. С. 251—255.
Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Pletnev N.O., Debelyak A.A. Effect of stress state on the structure and properties of constructions of steels and alloys at welding. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy).* 2016. Vol. 59. No. 4. P. 251—255 (In Russ.).
9. *Çam G., Koçak M.* Progress in joining of advanced materials. Part I: Solid state joining, fusion joining, and joining of intermetallics. *Sci. Technol. Weld. J.* 1998. No. 3. P. 105—126.
10. *Çam G., Koçak M.* Progress in joining of advanced materials. *Int. Mater. Rev.* 1998. No. 43. P. 1—44.
11. *Çam G., Fischer A., Ratjen R., Dos Santos J.F., Koçak M.* Properties of laser beam welded superalloys Inconel 625 and 718. In: *Proc. 7-th Eur. Conf. on laser treatment of materials — ECLAT'98* (Hannover, 21—23 Sept. 1998). P. 333—338.
12. *Corba C., Ferencz P., Mihăilă I.* Laser welding. Nonconvent. *Technol. Rev.* 2018. No. 4. P. 34—37.
13. *Bratukhin A.G., Maslenkov S.B., Logunov A.V., Prokopinskaya S.G., Solov'ev Yu.V.* Heat treatment using high-concentrated energy suppliers. *Met. Sci. Heat Treat.* 1995. Vol. 37. No. 11—12. P. 479—484.
14. *Moosavy H.M., Aboutalebi M.R., Seyedein S.H., Goodarzi M., Khodabakhshi M.* Modern fiber laser beam weld-

- ing of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloys. *Opt. Laser Technol.* 2014. Vol. 57. P. 12–20.
15. *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. *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Vol. 201. No. 1. P. 515–520.
 16. ТУ 14-1-1960-2004. Прокат тонколистовой холоднокатаный из жаропрочного сплава марки.
TU 14-1-1960-2004. Technical conditions. Cold-rolled thin-sheet rolled products of heat-resistant alloy (In Russ.).
 17. *Baranov D.A., Parkin A.A., Zhatkin S.S.* HN45VMTYUBR Alloy: Impact beam welding modes on microstructure and distribution of alloying elements in the seam. *Solid State Phenomena.* 2018. Vol. 284. P. 530–535.
 18. *Сорокин Л.И., Богдасаров Ю.С., Тупикин В.И.* Сравнительная оценка присадочных проволок для аргонодуговой сварки жаропрочных сплавов. *Свароч. пр-во.* 1993. No. 10. С. 31–33.
Sorokin L.I., Bogdasarov U.S., Tupikin V.I. Comparative evaluation of filler wires for argon-arc welding of heat-resistant alloys. *Svarochnoe proizvodstvo.* 1993. Vol. 10. P. 31–33 (In Russ.).
 19. Международный стандарт. Проволока стальная сварочная. ГОСТ 2246-70. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_2246-70 (дата обращения: 27.10.2018).
International standard. Welding steel wire. GOST 2246-70. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_2246-70 (accessed: 27.10.2018) (In Russ.).
 20. ПИ 1.4.75-2000 Производственная инструкция. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. М.: НИАТ, 2000. С. 65–70.
PI 1.4.75-2000. Arc welding in shielding gases of structural, stainless and heat-resistant steel and alloys. Moscow: NIAT, 2000. P. 65–70 (In Russ.).
 21. Международный стандарт. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. ГОСТ 6996-66. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_6996-66 (дата обращения: 27.10.2018).
International standard. Welded joints. Methods for determining mechanical properties. URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_6996-66 (accessed: 27.10.2018) (In Russ.).
 22. *Федоров Б.М., Мосюров А.И.* Влияние параметров лазерной сварки на прочность никелевых сплавов. *Технол. машиностроения.* 2011. No. 11. С. 44–45.
Fedorov B.M., Mosyurov A.I. The effect of laser welding parameters on the strength of nickel alloys. *Technologiya mashinostroeniya.* 2011. No. 11. P. 44–45 (In Russ.).
 23. *Hugnes W.P., Berry T.F.* A study of the strain-age cracking characteristics in welded Rene 41. *Phase I. Weld. J.* 1967. Vol. 46. No. 8. P. 361–370.
 24. *Ножницкий Ю.А.* Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей военной авиации. М.: ЦИАМ, 2005.
Nozhnicliy U.A. Strength standards of aviation gas turbine engines of military aircraft. Moscow: TsIAM, 2005 (In Russ.).