

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП693

© 2021 г. Д.А. Баранов¹, С.С. Жаткин¹, К.В. Никитин¹, А.А. Паркин¹,
Е.Ю. Щедрин^{1,2}, В.Б. Деев^{3,4}

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

² ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Россия

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

⁴ Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd., Wenzhou, China

Статья поступила в редакцию 28.06.21 г., доработана 08.07.21 г., подписана в печать 19.07.21 г.

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния видов сварки (лазерной, электронно-лучевой и аргонодуговой) на свойства неразъемного соединения из сплава марки ЭП693 системы Ni–Cr–W–Co–Mo, используемого в производстве узлов и деталей газотурбинных двигателей. Для получения сварного шва при лазерной и аргонодуговой сварке использована присадочная проволока ЭП367 системы Ni–Mo–Cr–Mn. Для исследуемых видов сварки выполнен сравнительный анализ площадей нагрева, а также плотностей мощности. Установлено, что аргонодуговая сварка характеризуется большими значениями площади нагрева и плотности мощности по сравнению с лазерной и электронно-лучевой. Выявлено, что вид сварки оказывает влияние на особенности формирования сварных швов. Так, при электронно-лучевой сварке шов формируется с переходом на «кинжальное» проплавление в корне шва, а при лазерной – в виде песочных часов. Анализ микроструктуры околошовной зоны показал, что наименьший размер зерен наблюдается при лазерной сварке. Выполнен анализ распределения элементов в сварном соединении. Установлено, что при сварке с применением присадочной проволоки повышается содержание Mo и снижается – W, Co, Al и Ti в сварном шве и околошовной зоне относительно основного материала. Это обуславливает особенности разрушения образцов, полученных рассматриваемыми видами сварки. Разрушение образцов, полученных при аргонодуговой и лазерной сварке, происходило по околошовной зоне со стороны усиления шва, а при использовании электронно-лучевой технологии они разрушались по сварному шву. Механические испытания образцов при комнатной и повышенной температурах показали, что наибольшей прочностью обладают образцы, полученные с использованием лазерной и электронно-лучевой технологий сварки.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, жаропрочный никелевый сплав, лазерная сварка, электронно-лучевая сварка, аргонодуговая сварка, сварное соединение, механические свойства, микроструктура.

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

Жаткин С.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛВЭТ СамГТУ. E-mail: sergejat@mail.ru.

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

Паркин А.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры ЛВЭТ СамГТУ.

Щедрин Е.Ю. – гл. сварщик ПАО «ОДК-Кузнецов» (443009, г. Самара, Заводское шоссе, 29), ст. преподаватель кафедры ЛВЭТ СамГТУ.

Деев В.Б. – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», профессор кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4); гл. эксперт Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd. (Ouhai Economic Development Zone, 38 Dongfang South Road, Wenzhou, 325006, Zhejiang, China). E-mail: deev.vb@mail.ru

Для цитирования: Баранов Д.А., Жаткин С.С., Никитин К.В., Паркин А.А., Щедрин Е.Ю., Деев В.Б. Исследование влияния различных источников энергии на структуру и механические свойства сварного соединения из никелевого сплава ЭП693. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 6. С. 22–30.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-22-30.

Study into the effect of different energy sources on the structure and mechanical properties of EP693 nickel alloy weld joint

D.A. Baranov¹, S.S. Zhatkin¹, K.V. Nikitin¹, A.A. Parkin¹, E.Yu. Shchedrin^{1,2}, V.B. Deev^{3,4}

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

² Public Joint Stock Company «UEC-Kuznetsov», Samara, Russia

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

⁴ Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd., Zhejiang, China

Received 28.06.2021, revised 08.07.2021, accepted for publication 19.07.2021

Abstract: The paper provides the results of a study on the influence of welding types (laser, electron beam, and TIG welding) on the properties of a permanent connection made of an EP693 alloy of the Ni–Cr–W–Co–Mo system used in the production of gas turbine engine components and parts. EP367 filler wire of the Ni–Mo–Cr–Mn system was used to obtain a weld during laser and TIG welding. A comparative analysis of heating areas and power densities was performed for the welding types studied. It was established that TIG welding features by greater values of the heating area and power density in comparison with laser and electron beam welding. It was found that the type of welding affects the features of weld formation. For example, a weld is formed with the transition to knife fusion penetration in the weld root for electron beam welding, and in the form of an «hourglass» for laser welding. The analysis of the heat affected zone microstructure showed that the smallest grain size is formed during laser welding. The distribution of elements in the weld joint was analyzed. It was found that when welding with the use of filler wire, the Mo content increases and the W, Co, Al, and Ti content decreases in the weld and heat affected zone relative to the base metal. This determines the peculiarities of failure for samples obtained using the welding types studied. Samples obtained by TIG and laser welding broke along the heat affected zone on the weld reinforcement side. Samples obtained by electron beam welding broke along the weld. Mechanical tests of samples at room and elevated temperatures showed that samples obtained by laser and electron beam welding have the highest tensile strength.

Keywords: gas turbine engine, heat-resistant nickel alloy, laser welding, electron beam welding, TIG welding, weld joint, mechanical properties, microstructure.

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

Zhatkin S.S. — Cand. Sci. (Eng.), Associate professor of the Department of FHET, SSTU. E-mail: sergejat@mail.ru.

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

Parkin A.A. — Cand. Sci. (Eng.), Associate professor of the Department of FHET, SSTU.

Shchedrin E.Yu. — Chief welder of the Public Joint Stock Company «UEC-Kuznetsov» (443009, Russia, Samara, Zavodskoe shosse, 29), Senior lecturer of the Department of FHET, SSTU.

Deev V.B. — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief researcher of the Laboratory «Ultrafine-grained metallic materials», Professor of the Department of metal forming of National University of Science and Technology «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4), Chief expert of Wenzhou Jinghe Intelligent Manufacturing Science & Technology Co., Ltd. (Ouhai Economic Development Zone, 38 Dongfang South Road. Wenzhou, 325006, Zhejiang, China). E-mail: deev.vb@mail.ru.

For citation: Baranov D.A., Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Parkin A.A., Shchedrin E.Yu., Deev V.B. Study into the effect of different energy sources on the structure and mechanical properties of EP693 nickel alloy weld joint. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 6. P. 22–30 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-22-30.

Введение

Основной тенденцией в развитии технологий создания газотурбинных двигателей (ГТД) является повышение температуры газа и эксплуатационных нагрузок [1]. В связи с этим в двигателестроении находят широкое применение жаропрочные сплавы [2]. Одним из эффективных методов снижения себестоимости конструкции при изготовлении деталей сборочных единиц ГТД является создание неразъемных соединений, а так-

же элементов самих деталей сварочными технологиями [3–6].

Стремление повысить жаропрочность и снизить ползучесть жаропрочных сплавов противоречит требованиям сварочного процесса, поскольку с повышением жаропрочности сплавов снижаются такие показатели свариваемости, как сопротивляемость образованию трещин при сварке и последующей термообработке [7, 8].

Свариваемость как один из показателей физических свойств материала является функцией его состава по основным легирующим элементам, а также содержанию примесных элементов. На нее влияют такие физико-механические свойства материалов, как коэффициент линейного расширения, соотношение пределов прочности и текучести, горячая пластичность, темп восстановления пластичности при охлаждении [9].

Для сварки никелевых сплавов применяют различные способы, однако всегда необходимо учитывать причины формирования дефектов сварного шва, которые могут иметь металлургическую природу и отрицательно влиять на ползучесть и коррозионную стойкость [10].

Обеспечение качества сварных соединений из Fe—Cr—Ni- и Ni-сплавов является сложной задачей. Это связано с тем, что сплавы на основе никеля имеют тенденцию к развитию горячего растрескивания при кристаллизации сварного шва. На границах зерен обычно присутствуют жидкие фазы, из-за которых могут формироваться горячие трещины вследствие напряжений, возникающих в процессе усадки охлаждающегося сварного шва [11, 12].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) наиболее часто используется для сварки суперсплавов на основе никеля. При реализации ЭЛС генерируется очень высокая плотность энергии, но при этом увеличивается вероятность возникновения горячих трещин ликвационного и кристаллизационного типов [12].

Лазерная сварка (ЛС) характеризуется высокой плотностью мощности и все чаще используется для соединения элементов из никелевых сплавов вследствие таких преимуществ, как [13–20]:

- незначительное искажение формы;
- уменьшение размера зоны теплового воздействия;
- повышенная скорость процесса сварки, связанная со значительной проникающей способностью;
- высокое отношение глубины к ширине зоны плавления.

Однако проблемы с возникновением горячих трещин существуют и при ЛС. В связи с этим реализуются альтернативные способы, например сварка трением [21].

Одним из направлений повышения качества сварных швов сплавов на никелевой основе является термическая обработка изделия [22–24].

Следует отметить, что в доступной научной литературе практически отсутствуют результаты исследований по сравнению эффективности различных видов сварки жаропрочных никелевых сплавов.

Ранее авторы исследовали влияние лазерной сварки на структуру и прочность сварных соединений из жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 (ТУ 14-1-1960-2004), широко применяющегося при изготовлении деталей и узлов в газотурбинных двигателях [25].

Целью данной работы являлся сравнительный анализ влияния различных источников энергии на формирование структуры и механические свойства сварного соединения из жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693.

Материалы и методика экспериментов

В качестве исходного материала для экспериментов использовали жаропрочный дисперсионно-твердеющий никелевый сплав ЭП693 (табл. 1) в состоянии поставки в виде листов толщиной 1,8 мм, прошедших у производителя термическую обработку — закалку при температуре 1080–1100 °С с последующим охлаждением в воде. Из листов вырезали образцы размером 200 × 100 × 1,8 мм.

В качестве присадочного материала использовали сварочную проволоку марки ЭП367 согласно ГОСТ 2246-70 (табл. 2).

Соединение образцов осуществляли разными видами сварки в стапеле с медной подложной.

Лазерную сварку (ЛС) выполняли на лазерном CO₂-комплексе TruLaser CELL 7020 («TRUMPF», Германия) по режиму:

- частота следования импульсов 90 кГц;
- мощность 4 кВт;
- скорость сварки 2 м/мин;
- скорость подачи присадочной проволоки 2 м/мин;
- диаметр присадочной проволоки 0,8 мм;
- диаметр лазерного луча в фокусе 0,7 мм;
- фокусное расстояние 280 мм;
- защитный газ — He.

Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) проводили на электронно-лучевой установке АЭЛСК-19 (НИТИ «Прогресс», РФ) по режиму:

- ускоряющее напряжение 60 кВ;
- ток луча 120 мА;
- скорость сварки 0,35 м/мин;

Таблица 1. Химический состав (мас.%) жаропрочного сплава ЭП693

Table 1. Chemical composition (wt.%) 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 (мас.%) сварочной проволоки марки ЭП367

Table 2. Chemical composition (wt.%) 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

- диаметр электронного луча в фокусе 0,5 мм;
- осцилляция 0,5 мм;
- фокусное расстояние 190 мм (сварка производилась без подачи присадочной проволоки).

Аргондуговую сварку (АрДС) осуществляли на посту АРК-3 (сварочный источник ВСВУ-315, ОАО «Электромеханика», РФ) по режиму:

- ток 120 А;
- напряжение 10–12 В;
- скорость процесса 0,35 м/мин;
- сварочная проволока подавалась вручную;
- диаметр присадочной проволоки 2,0 мм;
- защитный газ — Аг.

После сварки часть образцов подвергали термической обработке (ТО) в электрической печи Naberteherm RHTV («Naberteherm», Германия): закалка при $t = 1000 \pm 50$ °С, $\tau = 4$ ч + старение при $t = 700 \pm 50$ °С, $\tau = 16$ ч, охлаждение на воздухе (рекомендуемый режим ТО согласно ПИ 1.4.75.2000 [26]). Испытания образцов на разрыв и определение угла загиба были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 [27].

Химический состав сварных соединений оценивали на спектроанализаторе ARL 3460 («Thermo Fisher Scientific», США). Механические испытания проводили на разрывной машине Testometric модели FS150kN-AX («Testometric Company Ltd.», Великобритания).

Результаты экспериментов и их обсуждение

В зависимости от источника нагрева и скорости сварки происходит различное формирование сварочной ванны. Это обусловлено величиной плот-

ности мощности при различных видах сварки. Известно, что лазерным и электронным пучком можно вести обработку с минимальным пятном и высокой плотностью мощности (табл. 3).

На рис. 1 представлены особенности формирования швов при различных видах сварки:

ЛС — в виде песочных часов;

ЭЛС — с переходом на «кинжальное» проплавление в корне шва;

АрДС — характерное формирование шва с усилением.

Анализ микроструктуры околошовной зоны (ОШЗ) показал (рис. 2, а), что минимальный размер зерна формируется при ЛС (№ 4 по шкале эталонов, согласно ГОСТ 5639-82). Это обусловлено высокими скоростями кристаллизации ванны расплава и за счет интенсивного отвода тепла в основной материал (ОМ).

Характерной особенностью жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ЭП693 является наличие в его составе достаточного коли-

Таблица 3. Связь между площадью нагрева и плотностью мощности в зависимости от вида сварки

Table 3. Relationship between heating area and power density depending on welding type

Вид сварки	Площадь нагрева, см ²	Плотность мощности, Вт/см ²
ЛС	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^6$
ЭЛС	$2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^6$
АрДС	$2 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^5$

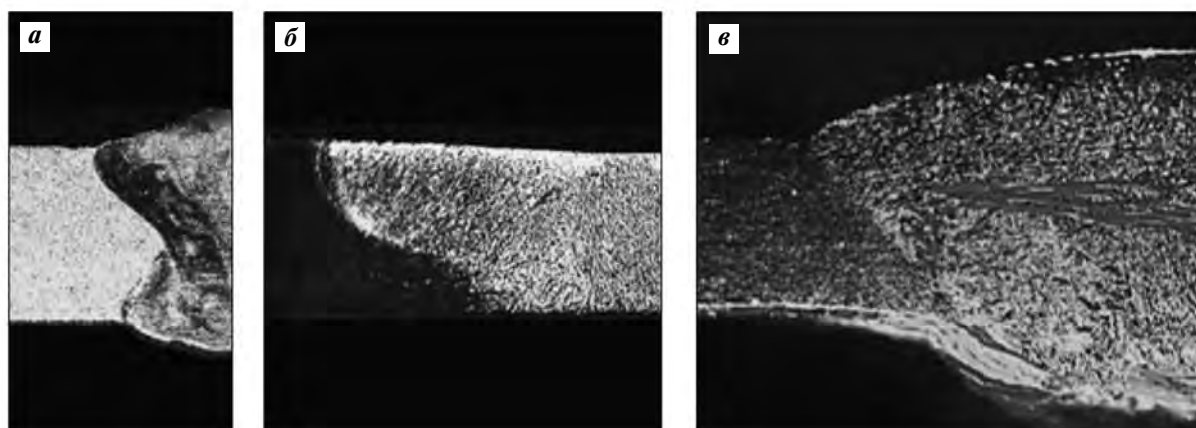


Рис. 1. Формирование сварного соединения в зависимости от вида сварки (×50): ЛС (а), ЭЛС (б) и АрДС (в)

Fig. 1. Weld joint formation depending on welding type (×50): LW (a), EBW (b) and TIGW (c)

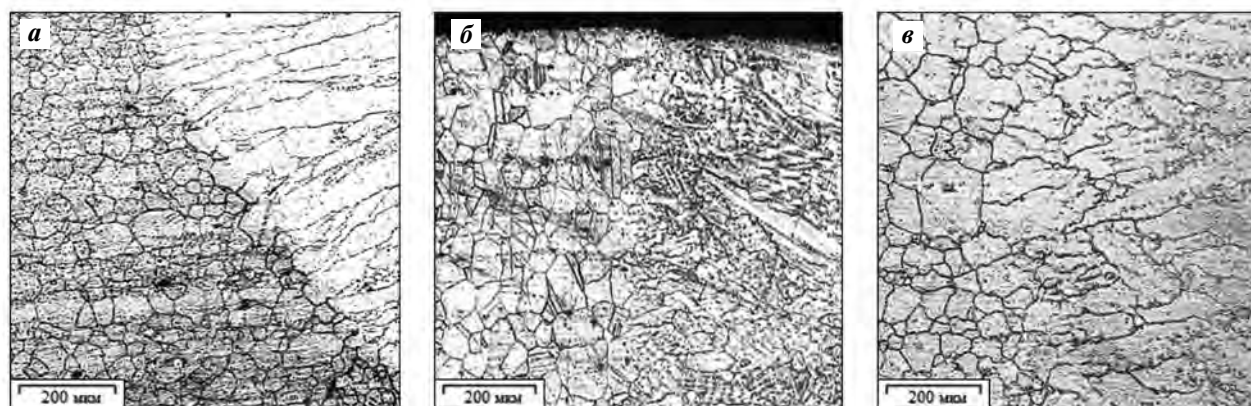


Рис. 2. Микроструктура околошовной зоны после термообработки (×300) в зависимости от видов сварки: ЛС (а), ЭЛС (б) и АрДС (в)

Fig. 2. Microstructure of heat-affected zone after heat treatment (×300) depending on welding types: LW (a), EBW (b) and TIGW (c)

чества алюминия и титана, которые, взаимодействуя с никелем, образуют γ' -фазу типа $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Микроструктура данного сплава представляет собой ГЦК-решетку, содержащую карбиды и когерентную с твердым раствором интерметаллидную γ' -фазу, прочность которой возрастает с ростом температуры. Жаропрочность γ' -фазы определяется содержанием в сплаве алюминия и титана. Наибольшая ее величина достигается после закалки и последующего старения, в результате чего образуются мелкодисперсные выделения γ' -фазы, которые в никелевом сплаве ЭП693 составляют от 13 до 15 об.% [8].

Анализ химического состава сварного соединения (табл. 4) показал, что при сварке с применением присадочной проволоки ЭП367 происходит

перераспределение химических элементов, а именно — увеличение содержания Мо и уменьшение W, Co, Al и Ti в сварном шве (СШ) и ОШЗ относительно ОМ. Сварочная проволока ЭП367 не содержит в своем составе Al, Ti, Co и W, поэтому при АрДС и ЛС наблюдается более низкое содержание данных элементов в СШ и ОШЗ по сравнению с основным материалом. В то же время при ЭЛС (где сварочная проволока не используется) содержание этих элементов практически не изменяется. Следовательно, отсутствие Al и Ti в присадочном материале приводит к уменьшению концентрации интерметаллидной γ' -фазы в сварном шве. Данный фактор оказывает положительное влияние при сварке и повышает свариваемость сплава без потери прочностных характеристик.

Таблица 4. Распределение химических элементов (мас.%) в сварном соединении

Table 4. Distribution of chemical elements (wt.%) in weld joint

Элемент	ЭП693	ЭП367	АрДС			ЭЛС			ЛС		
			ОМ	ОШЗ	СШ	ОМ	ОШЗ	СШ	ОМ	ОШЗ	СШ
C	≤ 0,1	≤ 0,08	6,71	7,6	10,46	5,54	6,77	8,03	6,71	7,3	8,47
Mn	≤ 0,4	1,0–2,0	0,22	0,17	0,98	0,29	0,05	0,12	0,14	0,44	0,53
S	≤ 0,015	≤ 0,02	0	0	0,02	0	0,13	0,12	0,24	0,07	0,31
P	≤ 0,02	≤ 0,02	0	0,08	0,07	0,08	0	0,12	0,15	0,02	0
Fe	≤ 5	≤ 4	1,2	0,99	1,02	4,32	3,4	3,65	1,49	1,19	1,2
Cr	17,0–20,0	14,0–16,0	17,3	17,1	15,27	17,1	16,8	16,7	16,9	16,3	15,6
Ni	Основа	Основа	56,9	57,2	57,52	55,9	56,0	54,4	57,9	58,3	58,4
W	5,0–7,0	—	5,23	4,75	2,58	5,3	5,15	5,55	5,64	4,44	3,52
Mo	3,0–5,0	14,0–16,0	3,83	4,42	7,54	3,31	3,26	3,07	2,32	5,36	6,26
Co	5,0–8,0	—	5,22	4,96	2,81	5,1	5,14	4,88	5,39	4,19	3,59
Al	1,6–2,3	—	2,08	1,44	0,97	1,6	1,92	2,06	1,83	1,35	1,21
Ti	1,1–1,6	—	1,3	1,27	0,76	1,42	1,38	1,37	1,25	1,01	0,87

Таблица 5. Механические свойства сплава ЭП693 в зависимости от вида сварки

Table 5. Mechanical properties of EP693 alloy depending on welding type

Технология	Присадочный материал	Режим термической обработки *	σ _в , МПа	
			t = 20 °C	800 °C
ЛС	ЭП367	3 + С	870–900	735–750
		3 + С + ТО	1080–1130	765–787
ЭЛС	—	3 + С	880–920	—
		3 + С + ТО	1090–1120	770–780
АрДС	ЭП367	3 + С	800–870	—
		3 + С + ТО	1020–1080	640–679
Исходный лист ЭП693	—	З	980–1060	—
	—	ТО	980–1080	588–686

* С — сварка, З — закалка, 3 + С — закалка + старение.

Дополнительное легирование шва молибденом из присадочной проволоки повышает деформационную способность и стойкость к образованию трещин при сварке жаропрочных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов. Это обусловлено тем, что при сварке данной проволокой металл шва имеет более низкую жаропрочность и релаксационную стойкость, чем основной материал, что создает условия для релаксации остаточных напряжений в большем объеме более пластичного металла СШ по сравнению с более жаропрочной ОШЗ [28].

Влияние вида сварки и термической обработки на механические свойства сплава ЭП693 представлено в табл. 5.

Ввиду особенностей распределения элементов (табл. 4) разрушение всех сварных соединений, выполненных методами АрДС и ЛС, при механических испытаниях на разрыв произошло по ОШЗ со стороны усиления шва, а полученных с применением ЭЛС — по сварному шву (рис. 3).

Изменения в содержании химических элементов при ЭЛС в сварном соединении незначительны и не оказывают сильного влияния на механиче-

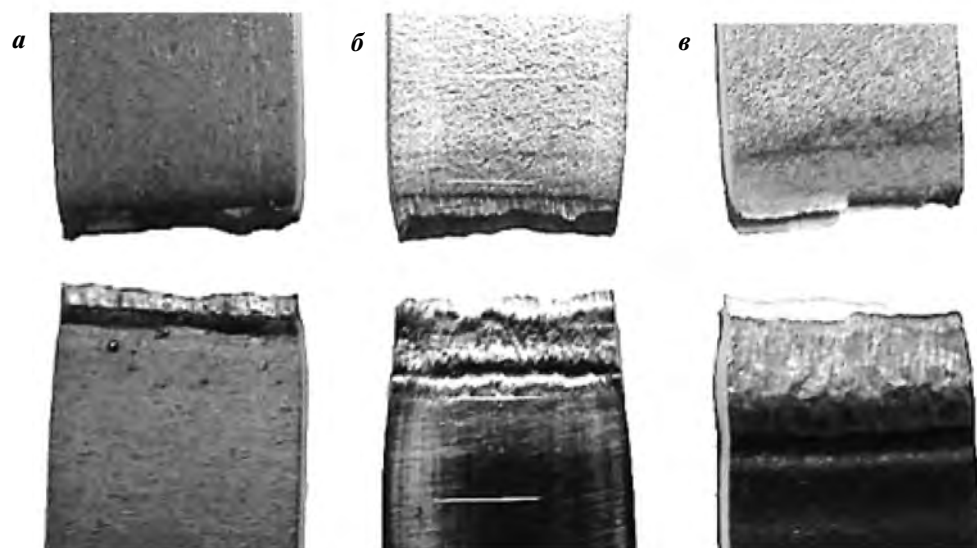


Рис. 3. Характер разрушения образцов в зависимости от вида сварки (×1): ЛС (а), ЭЛС (б) и АрДС (в)

Fig. 3. Failure pattern of samples depending on welding type (×1): LW (а), EBW (б) and TIGW (в)

ские свойства материала при комнатной и повышенной температурах (табл. 5).

Применение присадочной проволоки ЭП367 позволяет получать сварные соединения с достаточно высокой прочностью, которая при АрДС и ЛС составляет ~0,9 от прочности основного материала (до термической обработки), что достигается за счет дополнительного легирования шва молибденом, входящим в состав присадочной проволоки.

Последующая термическая обработка (закалка + старение) после сварки повышает прочность сварных соединений, выполненных методами АрДС, ЭЛС и ЛС, по сравнению с прочностью основного материала, прошедшего аналогичную ТО. Наибольшая прочность в сварных соединениях достигается при ЛС и ЭЛС, что обусловлено меньшими тепловложениями при рассматриваемых видах сварки (см. табл. 3). Данный фактор способствует незначительному увеличению размера зерна в ОШЗ, что обуславливает высокие прочностные свойства соединения при комнатной и повышенной температурах (см. табл. 5).

Выводы

На основании выполненных исследований установлено следующее.

1. Применение присадочной проволоки ЭП367 повышает показатели свариваемости жаропроч-

ного дисперсионно-твердеющего сплава ЭП693 за счет уменьшения содержания γ' -фазы в сварном шве и околошовной зоне.

2. Дополнительное легирование сварного шва молибденом повышает его деформационную способность к образованию горячих трещин при сварке и последующей термической обработке сплава ЭП693.

3. Термическая обработка в виде закалки с последующим старением стабилизирует структуру сварного соединения и повышает прочность шва за счет образования γ' -фазы в процессе старения, тормозящей пластические деформации в сварном шве и околошовной зоне.

4. Применение лазерной сварки позволяет получать сварные соединения с большей прочностью по сравнению с аргонодуговой технологией. Это достигается за счет меньшего тепловложения и высокой скорости кристаллизации сварочной ванны, что не вызывает значительных изменений в структуре основного материала и околошовной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания (код проекта № 0778-2020-0005).

Acknowledgments. *The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation within the framework of the project part of the state assignment (Project Code 0778-2020-0005).*

Литература/References

1. Leyens C. Advanced materials and coatings for future gas turbine applications. In: *Proceedings of the 24th International congress of the aeronautical sciences* (Yokohama, Japan, 29 August—3 September 2004). P. 1—10.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы: Учеб. для студ. М.: Машиностроение, 2007.
Inozemtsev A.A., Nihamkin M.A., Sandratsky V.L. Automation and regulation of aircraft engines and power plants. Systems: Textbook for student. Moscow: Mashinostroyeniye, 2007 (In Russ.).
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. No. S2. С. 98—103.
Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M. High-temperature deformable nickel alloys for advanced gas turbine engines and gas turbine plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman*. 2011. No. S2. P. 98—103 (In Russ.).
4. Henderson M.B., Arrell D., Heobel M., Larsson R., Marchant G. Nickel-based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Sci. Technol. Weld. JOI*. 2004. Vol. 9. Iss. 1. P. 13—21.
5. Osintsev K.A., Konovalov S.V., Glezer A.M., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Panchenko I.A., Sundeev R.V. Research on the structure of $\text{Al}_{2.1}\text{Co}_{0.3}\text{Cr}_{0.5}\text{FeNi}_{2.1}$ high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels. *Mater. Lett.* 2021. Vol. 294. Art. 129717.
6. Shen Q., Kong X., Chen X. Fabrication of bulk Al—Co—Cr—Fe—Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties. *J. Mater. Sci. Technol.* 2021. Vol. 74, P. 136—142.
7. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД. В кн. *Все материалы: Энциклопед. справочник*. 2007. No. 6. С. 2—5.
Lomberg B.S., Moiseev S.A. Heat-resistant and wrought alloys for modern promising gas turbine engines. In: *All materials: Encyclopedic reference book*. 2007. Vol. 6. P. 2—5 (In Russ.).
8. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. *Сварочное 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. No. 4. P. 4—5 (In Russ.).
9. Курочко Р.С. Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД. *Авиационная пром-сть*. 1982. No. 8. С. 4—8.
Kurochko R.S. Welding and soldering of heat-resistant materials of the hot path of the GTE. *Aviacionnaya promyshlennost'*. 1982. No. 8. P. 4—8 (In Russ.).
10. Caron J.L., Sowards J.W. Weldability of nickel-base alloys. *Compr. Mater. Process*. 2014. Vol. 6. P. 151—179.
11. Qian M., Lippold J.C. Liquation phenomena in the simulated heat-affected zone of alloy 718 after multiple post weld heat treatment cycles. *Welding J*. 2003. Vol. 82. No. 6. P. 145—150.
12. Sashank S., Sravan, Rajakumar S., Karthikeyan R., Nagaraju D.S. Weldability, mechanical properties and microstructure of nickel based super alloys: A review. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy (ICMED 2020)* (Hyderabad, India, July 10—12, 2020), 2020. Vol. 184. P. 1—3.
13. Ferro P., Bonollo F., Tiziani A. Laser welding of copper—nickel alloys: A numerical and experimental analysis. *Sci. Technol. Weld. Joining*. 2005. Vol. 10. No. 3. P. 299—310.
14. Çam G., Koçak M. Progress in joining of advanced materials. Pt. 1: Solid state joining, fusion joining, and joining of intermetallics. *Sci. Technol. Weld. Joining*. 1998. Vol. 3. No. 3. P. 105—126.
15. Çam G., Koçak M. Progress in joining of advanced materials. *Inter. Mater. Rev*. 1998. No. 43. P. 1—44.
16. Çam G., Fischer A., Ratjen R., dos Santos J. F., Koçak M. Properties of laser beam welded superalloys Inconel 625 and 718. In: *Proceedings of the 7th European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'98* (Hannover, 21—23.09.1998). P. 333—338.
17. Corba C., Ferencz P., Mihăilă I. Laser welding. *Nonconv. Technol. Rev*. 2018. No. 4. P. 34—37.
18. Bratukhin A.G., Maslennikov S.B., Logunov A.V., Prokopinskaya S.G., Solov'ev Yu.V. Heat treatment using high-concentrated energy suppliers. *Metal Sci. Heat Treatment*. 1995. Vol. 37. No. 11-12. P. 479—484.
19. Naffakh-Moosavy H., Aboutalebi M.R., Seyedein S.H., Goodarzi M., Khodabakhshi M., Mapelli, Barella S. Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloys. *Optics Laser Technol*. 2014. Vol. 57. P. 12—20.
20. 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 CO_2 laser welding. *J. Mater. Process. Technol*. 2008. Vol. 201. No. 1. P. 515—520.
21. Chamanfar A., Mohammad J., Gholipour J., Wanjara P., Yue S. Suppressed liquation and microcracking in linear

- friction welded WASPALOY. *Mater. Design*. 2012. Vol. 36. P. 113—122.
22. Anbarasan N., Bikash Kumar Gupta, Prakash S., Muthukumar P., Oyyaravelu R., John Felix Kumar R., Jerome S. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of inconel 718. *Mater. Today: Proceedings*. 2018. No. 5. P. 7716—7724.
23. Yoshinori Ono, Tetsumi Yuri, Nobuo Nagashima, Hideshi Sumiyoshi, Toshio Ogata, Naoki Nagao. High-cycle fatigue properties of Alloy718 base metal and electron beam welded joint. *Phys. Procedia*. 2015. Vol. 67. P. 1028—1035.
24. Rautio T., Mäkilängas J., Kumpula J., Järvenpää A., Hamada A. Laser welding of laser powder bed fusion manufactured Inconel 718: Microstructure and mechanical properties. *Key Eng. Mater.* 2021. Vol. 883. P. 234—241. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.020.
25. 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. No. 3. С. 57—65.
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 connections in laser welding of heat-resistant dispersion-hardening nickel alloy ЭП693. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. Vol. 62. No. 4. P. 441—447.
26. ПИ 1.4.75-2000 Производственная инструкция. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. М.: ОАО «НИАТ». 2000. С. 65—70.
PI 1.4.75-2000. Production instruction. Arc welding in shielding gases of structural, stainless and heat-resistant steel and alloys. Moscow: PJS «NIAT». 2000. P. 65—70 (In Russ.).
27. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2006.
GOST 6996-66. Welded joints. Methods for determining mechanical properties. Moscow: Standartinform, 2008 (In Russ.).
28. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях. *Сварочное 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.).