

УДК 621.791

В.И. Лукин¹, В.Г. Ковальчук¹, Е.Н. Иода¹

СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ – ОСНОВА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-130-143

Сварка является наиболее эффективным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных к оптимальной по геометрической форме готовой детали или конструкции. Во многих случаях технологии сварки являются единственно возможными или наиболее эффективными способами создания неразъемных соединений конструкционных материалов, позволяющими снизить трудоемкость изготовления, повысить коэффициент использования материала, снизить энергоемкость готовых изделий. Сварка плавлением – аргоно-дуговая, электронно-лучевая, точечная контактная, лазерная, гибридная – в настоящее время является основой сварочного производства. Представлены основные результаты исследований в области разработки технологий сварки никелевых, титановых, алюминиевых сплавов и сталей.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.8. «Технологии сварки плавлением конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: *аргоно-дуговая сварка, точечная контактная сварка, электронно-лучевая сварка, сварные соединения, параметры режимов сварки, кратковременная прочность, длительная прочность, структура, ударная вязкость, стойкость против образования горячих трещин.*

V.I. Lukin, V.G. Kovalchuk, E.N. Ioda

Fusion welding is a core of welding manufacturing

Welding is the most efficient technology of manufacturing the permanent connections of structural materials and production of energy-saving joints, that are very close to the optimal shape of completed parts or structures. In many cases welding technologies are the only possible or the most effective ways to manufacture construction materials joints allowing to reduce labor costs, increase the material utilization efficiency, decrease the energy consumption of completed parts. Now fusion welding (tungsten arc welding, electron beam welding, spot welding, laser welding, hybrid welding) is the base of welding manufacturing. The most important

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

results of research projects carried out in the field of development of welding technologies of nickel, titanium, aluminum alloys and steels are presented in the paper.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 10.8. «Fusion welding technologies of construction materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *TIG welding, resistance spot welding, electron beam welding, welded joints, welding parameters, short-term durability, long-term durability, structure, impact resistance, resistance to hot crack formation.*

Введение

Сварочное производство, имеющее межотраслевой характер, представляет в настоящее время одну из науко- и инженероёмких составляющих мировой и национальных экономик. В металлообрабатывающих отраслях промышленного производства, строительстве и энергетике сварка и родственные ей процессы являются базовыми технологиями соединения и неотъемлемой частью производственного цикла. Во многих случаях технологии сварки – единственно возможные или наиболее эффективные способы создания неразъёмных соединений конструкционных материалов, позволяющие снизить трудоёмкость изготовления, повысить коэффициент использования материала, снизить энергоёмкость готовых изделий. Сварка плавлением – аргоно-дуговая, электронно-лучевая, точечная контактная, лазерная, гибридная – в настоящее время является основой сварочного производства.

Для соединения различных сталей и сплавов широко применяют аргоно-дуговую сварку (АрДЭС) неплавящимся вольфрамовым электродом как с использованием присадочных материалов, так и без них. Использование этого метода в промышленности обусловлено его универсальностью и возможностью получения при сварке сложнолегированных сплавов металла шва заданного состава с необходимыми механическими свойствами. Применение автоматической аргоно-дуговой сварки (ААрДЭС) по сравнению с ручной сваркой в промышленности более предпочтительно как по экономическим показателям (при более высоких скоростях сварки – в 2–5 раз – выше производительность труда), так и по техническим: высокая стабильность процесса, возможность использования приспособлений. Это приводит к значительному повышению качества сварных изделий.

К преимуществам лучевых технологий сварки по сравнению с дуговыми методами сварки плавлением можно отнести следующие:

– для сварки требуется в 10–15 раз меньше энергии, чем для дуговой сварки;

- не требуется применения присадочных материалов и защитных газов, так как процесс проходит в вакууме;
- возможность проводить термическую обработку сварных швов расфокусированным электронным лучом;
- высокая удельная концентрация энергии;
- дисперсная структура сварных швов;
- минимальная ширина швов и зоны термического влияния;
- получение соединений с прочностью, близкой к прочности основного металла.

Результаты испытаний сварных соединений, выполненных различными методами

С учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации жаропрочные никелевые сплавы входят в список приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий. Анализ развития науки за рубежом показывает, что в мире активно развиваются и продолжают свое развитие в будущем среди других материалов литейные и деформируемые жаропрочные никелевые сплавы. Эти материалы с улучшенными служебными характеристиками необходимы для создания изделий авиационной техники нового поколения [2–5].

Разработана технология электронно-лучевой сварки (ЭЛС) высокопрочного никелевого сплава ВЖ172, предназначенного для сварных высоконагруженных деталей и сварных узлов авиационных ГТД, в том числе для изготовления ротора, работоспособного до 900°С [6]. Проведена работа по отработке режимов ЭЛС на заготовках толщиной 15 мм. Подобраны основные параметры сварки, при которых обеспечивается полный проплавление свариваемых заготовок и равнопрочность сварных соединений основному металлу при кратковременных и длительных испытаниях независимо от термообработки после сварки (старение или полная термическая обработка) – табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний сварных образцов из деформируемого сплава ВЖ172, выполненных ЭЛС

Вид образца	Вид термообработки	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	K*	$\sigma_B^{700^\circ}$, МПа	K*	$\sigma_{100}^{700^\circ}$, МПа	K*
Основной материал	Закалка+старение	1360	1,0	1060	1,0	600	1,0
Сварное соединение	Закалка+старение	1370	1,0	1070	1,0	600	1,0
	Старение	1360	1,0	1100	1,0	600	1,0

* $K = \sigma_{B,св} / \sigma_B$.

Первичная структура сварного шва сплава ВЖ172 – дисперсная, в околошовной зоне отсутствуют укрупнение и оплавление зерен (рис. 1, а),

после термической обработки имеет место равномерное распределение упрочняющей фазы (рис. 1, б).

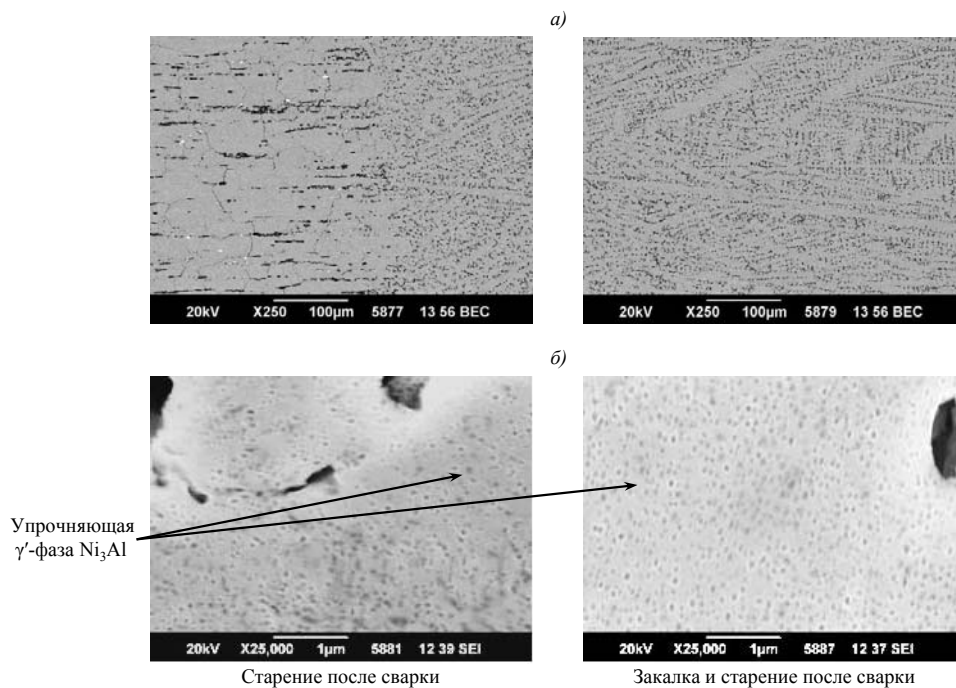


Рис. 1. Первичная структура сварного шва и околошовной зоны сплава ВЖ172 (а) и микроструктура сварного шва после термической обработки (б)

Проведены опытно-технологические работы по изготовлению сварного ротора конструкции АО «Климов» (рис. 2).



Рис. 2. Сварной роторный блок из сплава ВЖ172 конструкции АО «Климов»

Разработана технология электронно-лучевой сварки нового литейного жаропрочного сплава ВЖ172Л, созданного на базе деформируемого сплава ВЖ172, в сочетаниях ВЖ172Л+ВЖ172Л (отливка+отливка) и ВЖ172Л+ВЖ172 (отливка+деформируемый полуфабрикат) для изготовления литосварных высоконагруженных деталей и узлов авиационных ГТД. Выбраны основные параметры режима ЭЛС заготовок толщиной 15 мм. При механических испытаниях образцов сварных соединений, полученных ЭЛС при оптимальном режиме ($v_{св} = 15$ м/ч), установлено, что по данным кратковременной прочности при температурах испытаний 20 и 700°С сварные соединения практически равнопрочны сплаву ВЖ172Л. Значение предела длительной прочности сварных соединений составляет 0,92 от прочности сплава ВЖ172Л при высоких значениях времени до разрушения (табл. 2). Механические свойства образцов из литых пластин, заготовок фасонных деталей из сплава ВЖ172Л: $\sigma_{в}^{20^{\circ}} = 990$ МПа; $\sigma_{в}^{700^{\circ}} = 785$ МПа; $\sigma_{100}^{700^{\circ}} = 640$ МПа.

Таблица 2

Результаты испытаний сварных образцов сочетаний сплавов ВЖ172Л+ВЖ172Л и ВЖ172Л+ВЖ172, выполненных ЭЛС

Сочетание сплавов	$\sigma_{в}^{20^{\circ}}$, МПа	K^*	$\sigma_{в}^{700^{\circ}}$, МПа	K^*	$\sigma_{100}^{700^{\circ}}$, МПа	K^*	$KCU^{20^{\circ}}$, Дж/см ²
ВЖ172Л+ВЖ172Л	960	0,97	765	1,0	590	0,92	13
ВЖ172Л+ВЖ172	1050	1,0	840	1,0	590	0,92	20

Исследованы структуры сварных соединений, выполненных ЭЛС. В образцах сварных соединений между швом и основным материалом (как деформируемым, так и литым) наблюдается четкая граница, укрупнение и оплавление зерен по линии сплавления отсутствуют. В швах наблюдается структура более дисперсная, чем в свариваемых материалах (рис. 3).

Проведен фрактографический анализ изломов сварных соединений после испытаний на ударный изгиб с помощью растрового электронного микроскопа. Установлено, что в образцах, выполненных на скорости сварки 15 м/ч, разрушение смешанное – не только по границам дендритов, но и внутризеренное, с образованием ямочного рельефа (отливка+отливка) или полностью внутризеренное, с образованием вытянутых ямок (отливка+деформируемый полуфабрикат) – рис. 4.

Проведены опытно-технологические работы по изготовлению сварного диффузора конструкции АО «Климов» (рис. 5).

Разработаны технологии автоматической аргоно-дуговой сварки без присадочного материала, точечной контактной сварки (ТКС), а также состава присадочного материала и технологии его получения в виде проволоки для сварки из сплава ВЖ171, упрочняемого внутренним

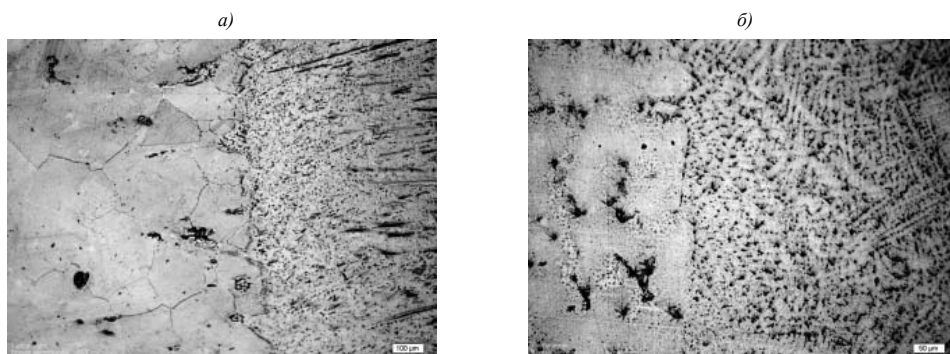


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) свариваемых сплавов и сварного шва со стороны ВЖ172 (а) и со стороны ВЖ172Л (б)

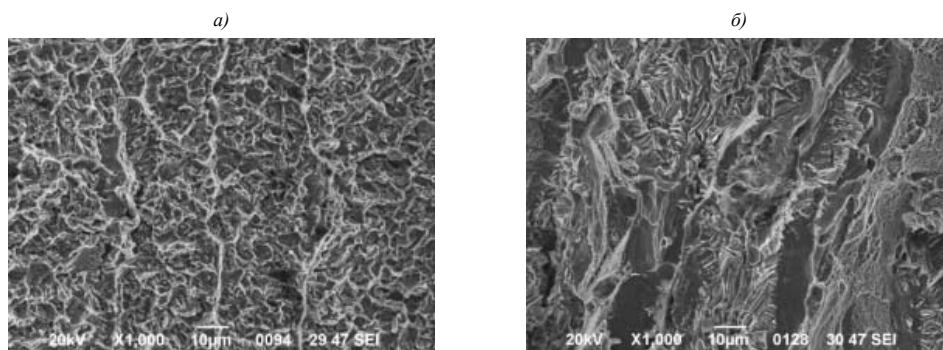


Рис. 4. Строение изломов сварных образцов при сочетании сплавов ВЖ172Л+ВЖ172Л (а) и ВЖ172Л+ВЖ172 (б)

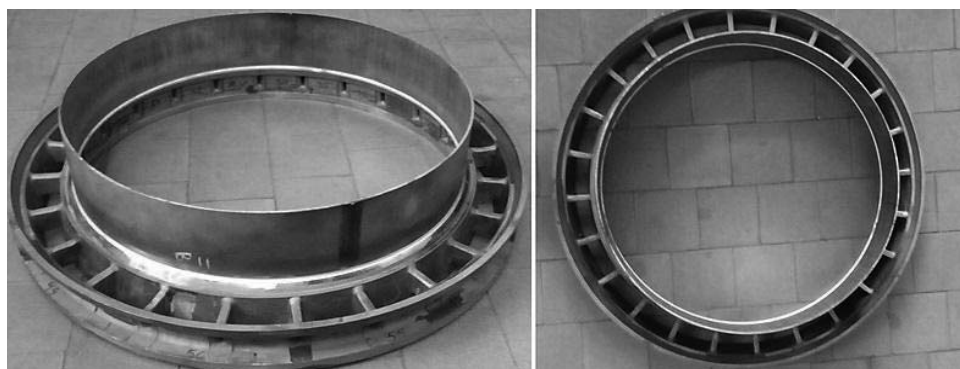


Рис. 5. Сварной диффузор конструкции АО «Климов»

азотированием и предназначенного для изготовления наиболее теплонагруженных элементов камеры сгорания ГТД [7, 8].

Режимы ААрДЭС без присадочного материала отработывали на скоростях сварки, наиболее часто применяемых для сварки листовых никелевых сплавов. Выбран оптимальный режим сварки, на котором получены сварные соединения (на трех промышленных плавках сплава ВЖ171), практически равнопрочные основному металлу:

$$\begin{aligned} - \sigma_{\text{в.св}}^{20^\circ} &= 0,95 \sigma_{\text{в}}^{20^\circ}; \\ - \sigma_{100\text{св}}^{900^\circ} &= 1,0 \sigma_{100}^{900^\circ}; \\ - \sigma_{100\text{св}}^{1000^\circ} &= 0,92 \sigma_{100}^{1000^\circ}. \end{aligned}$$

Структуры сварных соединений, выполненных ААрДЭС, представлены на рис. 6.

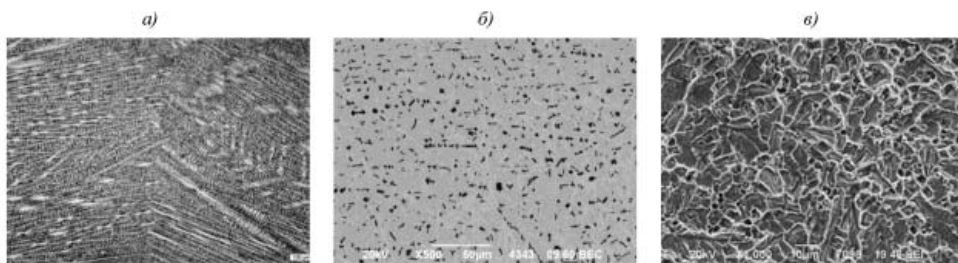


Рис. 6. Первичная структура сварных соединений сплава ВЖ171 (а), структура после ХТО (б) и фрактография излома (в)

Основными технологическими затруднениями при ТКС жаропрочных никелевых сплавов являются выплески из зоны образования ядра вследствие высокого сопротивления пластической деформации основного металла по периферии расплавленного ядра, что затрудняет формирование уплотнительного пояса, препятствующего выдавливанию расплавленного металла [9].

В результате исследований разработаны технологические режимы сварки листов из сплава ВЖ171 толщиной 1,3 мм:

- режим 1 – усилие сварки+ток сварки+ток дополнительный;
- режим 2 – усилие сварки+усилиековки+ток сварки+ток дополнительный.

Разработанные режимы ТКС обеспечивают требуемые размеры литых точек и отсутствие дефектов (рис. 7, а). Азотирование сварных образцов суммарной толщиной 2,6 мм происходит не на всю толщину, так как максимальная толщина зоны образования упрочняющей фазы (нитрид титана) от поверхности образца составляет ~0,75 мм (рис. 7, б).

Сварные соединения, полученные на указанных режимах ТКС, имеют высокие значения прочности при испытаниях на срез. Для образцов

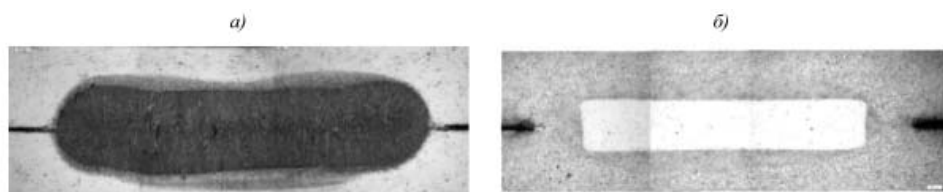


Рис. 7. Структура сварного соединения сплава ВЖ171, выполненного по разработанному режиму 2 с помощью точечной контактной сварки без термической обработки (а) и после азотирования (б)

толщиной 1,0 мм значения прочности при срезе выше, чем для образцов толщиной 1,3 мм, так как азотированная зона относительно толщины сварного образца больше. Способ обработки поверхности под сварку оказывает влияние на механические свойства сварных соединений (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний на срез сварных образцов из сплава ВЖ171, выполненных точечной контактной сваркой на выбранных режимах, с различной подготовкой поверхности

Толщина металла, мм	Режим сварки	Вариант подготовки поверхности под сварку	$\tau_{ср}^{20^{\circ}}$, МПа
1,3	1	Механическая обработка	560
		То же	590
		Химическое травление	630
		Пескоструйная обработка	560
1,0	1	Механическая обработка	810
		То же	860

Проведены опытно-технологические работы по изготовлению сварных узлов камеры сгорания (жаровой трубы) конструкции АО «Климов» (рис. 8).



Рис. 8. Жаровая труба конструкции АО «Климов»

Для расширения возможностей использования новых материалов в перспективных изделиях авиационной техники для аргоно-дуговой сварки сплава ВЖ171 разработаны состав присадочного материала, легированного РЗМ [10, 11], сочетающего высокие характеристики кратковременной и длительной прочности с рабочей температурой до 1200°С, и технологии его изготовления в виде проволоки. Свойства сварных соединений сплава ВЖ171, выполненных ААрДЭС с разработанной присадочной проволокой:

- стойкость против образования горячих трещин составляет $v_{кр} = 4,35$ мм/мин, что в 1,4 раз выше, чем для сплава ВЖ171 без присадки;
- ударная вязкость – $KCV^{20^\circ} = 30$ Дж/см², что в 1,7 раза превышает показатель KCV^{20° для сплава ВЖ171;

$$- \sigma_{св}^{1100^\circ} = 0,95 \sigma_{в}^{1100^\circ};$$

$$- \sigma_{св}^{1200^\circ} = 0,86 \sigma_{в}^{1200^\circ};$$

$$- \sigma_{100св}^{1100^\circ} = 0,89 \sigma_{100}^{1100^\circ};$$

$$- \sigma_{100св}^{1200^\circ} = 0,84 \sigma_{100}^{1200^\circ}.$$

Алюминиевые сплавы вызывают наибольший интерес у конструкторов авиационной и ракетной техники благодаря их повышенным удельным и эксплуатационным характеристикам, коррозионной стойкости.

На протяжении последних десятилетий как отечественными, так и зарубежными конструкторами, реализованы технологии для сварных конструкций из алюминий-литиевых сплавов в изделиях гражданской и военной техники. Однако существует ряд проблем, связанных с качеством и, соответственно, с эксплуатационными характеристиками сварных соединений.

Разработаны технологические процессы КСТ для алюминиевых (марки 1370, 1913) и алюминий-литиевых сплавов (марки В-1461, В-1469). Выбранные режимы сварки и подготовки поверхности обеспечивают отсутствие сварочных дефектов, уменьшение зоны термического влияния, образование в литом ядре равноосной мелкозернистой структуры (рис. 9).

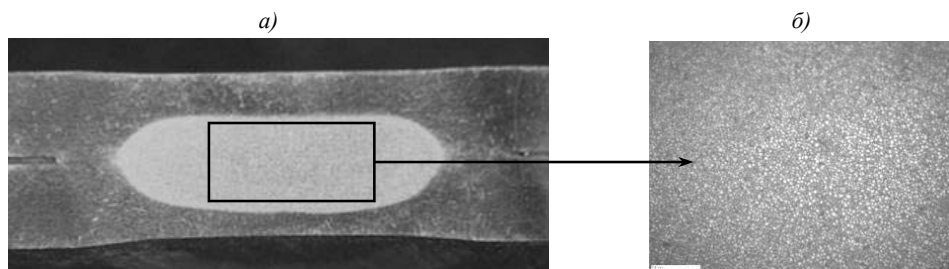


Рис. 9. Макро- ($\times 8$) и микроструктуры ($\times 200$) сварной точки алюминий-литиевого сплава В-1469

Сварные соединения имеют высокие значения максимальной нагрузки при испытании на срез. Средние значения $\tau_{\text{ср}}$ для листов толщиной 1–1,8 мм составляют 200–230 МПа. Ускоренные испытания сварных соединений на коррозионную стойкость в камере солевого тумана (КСТ) в течение 3 мес и натурные испытания (1 год) в условиях промышленной и приморской атмосферы показали, что минимальные потери прочности имеют сварные соединения алюминий-литиевого сплава В-1461: 4,5% после выдержки в КСТ и 3% после экспозиции в приморской атмосфере.

Разработаны технологии аргоно-дуговой сварки алюминиевых сплавов марок 1151, 1913, В-1208 и В-1579, обеспечивающие прочность сварных соединений на уровне 0,80–0,95 от прочности основного материала (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных ААрДЭС

Сплав	σ_b^* , МПа	$\sigma_{b,св}/\sigma_b$	Угол изгиба α , град	KCU, кДж/м ²
1151	393	0,86	37	94
В-1208	320	0,7	65	225
В-1579	325	0,92	106	320
1913	390	0,82	60	–

* Средние значения.

Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях авиакосмической техники обеспечивает снижение массы по сравнению с клепанными на 10–15%. Снижение массы с одновременным снижением стоимости производства – наиболее сложная задача в области разработки конструкции фюзеляжа пассажирского самолета.

В настоящее время лазерная сварка успешно применяется при изготовлении панелей нижней части фюзеляжа самолетов А318, А340-600NGW и А380 (рис. 10, а). Данная технология позволила уменьшить массу самолета на 15%, что существенно снизило расход топлива.

На протяжении последних лет во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии лазерной сварки (ЛС) алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, позволяющие применить их в сварных конструкциях элементов фюзеляжа перспективных изделий авиационной техники. Качество сварных соединений, выполненных лазерным лучом, в ряде случаев превосходит традиционные виды сварки по прочности сварного шва и его коррозионной стойкости, по остаточным тепловым деформациям и поводам, что позволяет рассматривать ЛС как конечную сборочную операцию, не требующую последующей механической обработки и правки.

Для разработки технологий ЛС материалов нового поколения используется современный роботизированный технологический комплекс лазерной гибридной сварки Laser Weld 8R60 (рис. 10, б).



Рис. 10. Сварная панель крыла, выполненная с применением лазерной сварки из алюминий-литиевого сплава 1424 (а) и роботизированного технологического комплекса лазерной гибридной сварки Laser Weld 8R60 (б)

Значительный объем исследований направлен на освоение технологических процессов ЛС перспективных алюминий-литиевых сплавов. Разработаны технологии лазерной сварки сплавов марок В-1461, В-1469 и 1424. Работы в этом направлении ведутся в тесном сотрудничестве с ведущими университетами и институтами – МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИТПМ СО РАН и др. (табл. 5).

Таблица 5

Механические характеристики сварных соединений, выполненных лазерной сваркой (ЛС)

Сплав	Организация	Присадка	Тип лазера (мощность)	Режим ТО+ЛС	$\sigma_{в.св}$, МПа	$\sigma_{в.св}/\sigma_{в}$	Угол изгиба α , град	$KCU_{1,2}$, кДж/м ²
В-1461	МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ФГУП «ВИАМ»	Св-1201	YL (8 кВт)	T1+ЛС	315	0,58	42	110
		Св-1201		T1+ЛС+T1	490	0,90	46	130
		Св-1217		T1+ЛС	335	0,61	42	105
		Св-1217		T1+ЛС+T1	495	0,91	45	115
		Без присадки		T1+ЛС	275	0,50	40	100
В-1469	МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ФГУП «ВИАМ»	Св-1201	YL (8 кВт)	T1+ЛС	350	0,65	72	165
		Св-1201		T1+ЛС+T1	495	0,92	80	192
		Св-1217		T1+ЛС	360	0,67	55	140
		Св-1217		T1+ЛС+T1	500	0,93	78	176
		Без присадки		T1+ЛС	335	0,62	54	160
	ИТПМ СО РАН	Без присадки	CO ₂ L (5 кВт)	T1+ЛС	300	0,56	–	–
	ООО «ЛТЦ» (г. Шатура)	Без присадки	CO ₂ L (5 кВт)	T1+ЛС	270	0,5	60	105
1424	ООО НТО «ИРЭ-Полное»	Без присадки	YL (10 кВт)	T1+ЛС	320	0,7	60	155
	ИТПМ СО РАН	Без присадки	CO ₂ L (5 кВт)	T1+ЛС	350	0,77	–	–

Применение присадочных материалов при ЛС позволяет улучшить качество формирования шва и повысить механические характеристики сварных соединений.

Изготовление крупногабаритных сварных конструкций из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов связано с большими сложно-

стями вследствие их склонности к образованию горячих трещин, а также разупрочнению под воздействием термического цикла сварки плавлением ($\sigma_{в.св} \leq 0,5\sigma_B$). Для сварки плавлением (аргоно-дуговая, лазерная, гибридная) разработаны новые присадочные материалы на основе системы Al–Cu, содержащие 6 и 10% Cu с добавками редких и редкоземельных металлов. Уменьшение склонности к образованию горячих трещин, повышение прочности и пластичности алюминиевого сплава связаны с измельчением зерна, полным или частичным подавлением процессов рекристаллизации в сплаве, с непосредственным упрочняющим воздействием частиц дисперсоидов.

Применение разработанных присадок Св-1209 и Св-1221 для сварки сплавов В-1461 и В-1469 обеспечило повышение прочностных характеристик на 10%, малоциклового усталости в 2–3 раза по сравнению со сварными соединениями, выполненными серийной присадкой Св-1201 (табл. 6).

Таблица 6

Механические свойства сварных соединений, выполненных ААрДЭС

Сплав	Присадка	σ_B^* , МПа	$\sigma_{в.св}/\sigma_B$	Угол изгиба α , град	KCU_2 , кДж/м ²	МЦУ: $N_{ср}$, цикл (при $\sigma_{max}=157$ МПа)
В-1461	Св-1209	390	0,7	65	190	>300000
	Св-1221	395	0,71	50	160	>300000
	Св-1201	360	0,66	40	120	88700
В-1469	Св-1209	410	0,75	95	180	260950
	Св-1221	415	0,76	85	155	>300000
	Св-1201	370	0,69	65	165	110030

* Средние значения.

Анализ коррозионной стойкости показал, что сварные соединения сплавов В-1461 и В-1469, выполненные аргоно-дуговой сваркой с новыми присадочными материалами, не склонны к межкристаллитной и расслаивающей коррозии, что позволяет рекомендовать разработанные присадки для изготовления коррозионностойких сварных конструкций из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов.

Разработаны технологические процессы автоматической аргоно-дуговой, электронно-лучевой сварки и ультразвуковой ударной обработки сварных соединений сплава ВТ18У применительно к корпусным деталям компрессора высокого давления (рис. 11).

Полученные характеристики прочности и жаропрочности сварных соединений находятся на уровне характеристик основного материала, а применение ультразвуковой ударной обработки (УУО) позволяет повысить характеристики сопротивления усталости сварных соединений в ~10 раз (табл. 7). Выбран режим термообработки сварных соединений (950°С, 1 ч), обеспечивающий снижение остаточных напряжений в 3 раза.

Разработаны технологии аргоно-дуговой и электронно-лучевой сварки высоко-прочной коррозионностойкой стали ВНС73-Ш мартенситного класса с повышенным содержанием азота [12], предназначенной для изготовления сварных, в том числе не требующих термообработки после

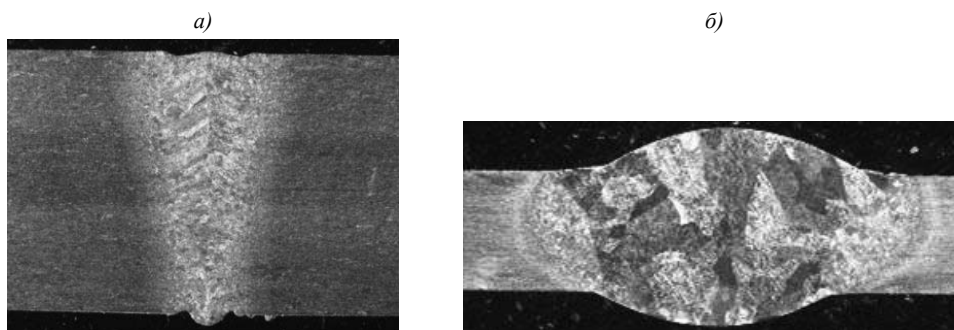


Рис. 11. Макроструктура ($\times 7$) сварных соединений сплава ВТ18У, выполненных ЭЛС (а) и ААрДЭС (б)

сварки, высоконагруженных силовых деталей и узлов изделий, работающих в атмосферных условиях и условиях морской среды.

Таблица 7

Механические свойства сварных соединений сплава ВТ18У

Вид сварки	Полуфабрикат	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Угол изгиба α , град	КСУ, кДж/м ²	$\sigma_{\text{в}}^{500^\circ}$, МПа	МЦУ: $N_{\text{ср}}$, цикл ($\sigma_{\text{max}}=392$ МПа)
ААрДЭС (ВТ18У)	Лист толщиной 3 мм	1035	15	415	755	16600–32350
ААрДЭС (ВТ18У+УУО)		1015	30	490	745	>150000
ЭЛС	Плита толщиной 14 мм	1025	54	440	720	–

Установлено, что ручная аргоно-дуговая сварка термически упрочненных заготовок обеспечивает прочность сварных соединений, не требующих термообработки после сварки, не менее 0,8 от прочности основного металла при высоких показателях ударной вязкости образцов. Сварные соединения, выполненные методом электронно-лучевой сварки, практически равнопрочны основному металлу независимо от проведения термической обработки – до или после сварки (табл. 8). Коррозионная стойкость сварных соединений – на уровне основного материала при испытаниях в ГЦКИ и КСТ.

Таблица 8

Механические свойства сварных соединений стали ВНС73-Ш

Вид сварки	Технологический вариант	$\sigma_{\text{в.св.}}^{20^\circ}$, МПа	K^*	Ударная вязкость, Дж/см ²	
				КСУ ^{20°} _{шов}	КСУ ^{-70°} _{шов}
Аргоно-дуговая с присадкой 08Х14Н7КВМ	Термообработка+сварка	1245	0,83	72	41
Электронно-лучевая	Сварка+термообработка	1485	0,99	–	27
	Термообработка+сварка	1425	0,95	–	27

* $K = \sigma_{\text{в.св.}} / \sigma_{\text{в}}$ ($\sigma_{\text{в}} \geq 1500$ МПа).

Заключение

Разработанные технологические процессы сварки плавлением, обеспечивающие получение сварных соединений с высоким комплексом технологических и механических свойств, позволят применять перспективные материалы в сварных конструкциях изделий авиакосмической техники и снизить их массу на 10–15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 13–19.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных сплавов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3. С. 34–38.
4. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сварка и безопасность: сб. матер. Всерос. науч.-практич. конф. Якутск, 2012. Т. 1. С. 21–30.
5. Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., Гейкин В.А., Поклад В.А. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей. М.: Наука и технологии. 2001. 544 с.
6. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газо-турбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
8. Быков Ю.Г., Овсепян С.В., Мазалов И.С., Ромашов А.С. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя // Вестник двигателестроения, 2012. №2. С. 246–249.
9. Кочергин К.А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ.: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2016).
11. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
12. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М. Особенности сталей, легированных азотом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. №12. С. 3–6.