

УДК 621.791

Л.И. Паришук¹, Ф.З. Гильмутдинов²

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И ЛОКАЛЬНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ ШВОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-3-3

Исследованы поля температуры и напряжений, определен химический состав, структура и механические свойства сварных соединений жаропрочных сплавов на никелевой основе после электронно-лучевой сварки. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы (ХН45МВТЮБР и ХН50МВТЮБ), электронно-лучевая сварка, локальная термообработка, сварной шов, механические свойства.

We studied the temperature field and stress determine the chemical composition, structure and mechanical properties of welded joints of heat-resistant nickel-based alloys after electron beam welding. The work is executed within the frames of the complex scientific direction 10.8. «Fusion welding technologies of new structural materials» («The strategic direction of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: heat resisting age-hardening alloys (ХН45МВТЮБР and ХН50МВТЮБ), electron beam bonding, local heat treatment, welded seam, mechanical properties.

¹Федеральное 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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт Уральского отделения Российской академии наук [Federal state budgetary institution of science Physics and technology Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences]; e-mail: gilmutdinov_f@mail.ru

Введение

В энергетическом машиностроении широко применяются сложнотермически-прочные сплавы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами: жаропрочностью и жаростойкостью [2–11]. К ним относятся жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы, основой которых является никель. Из-за сложного химического состава они чувствительны к термическим воздействиям, таким как сварка [12–15]. Правильный выбор температурного режима сварки и последующей термической обработки сварных соединений, их соблюдение обеспечивает получение заданных механических свойств конструкции.

Мощные тепловые воздействия, связанные с расплавлением металла при формировании сварного шва, вызывают изменения состава, структуры, напряженно-деформированного состояния в сварном шве и в зоне термического влияния, что влечет за собой существенное изменение прочности и пластичности сварного соединения по сравнению с основным материалом. Для обеспечения конструкционной прочности сварного соединения приходится искать режимы сварки и дальнейшей обработки сварных швов жаропрочных материалов. Данный подход открывает возможности

использования рассматриваемых сплавов в ремонтных работах, когда целесообразно было бы заменить и термически упрочнить какой-либо узел, вышедший из строя, отдельно, не обрабатывая всю конструкцию. Данная работа направлена на исследование сварных соединений, сваренных по состаренной основе, что имеет большое применение в связи с тем, что появляется возможность состарить конструкцию не всю целиком, а небольшими частями, что существенно удешевляет стоимость всей конструкции в целом.

Материалы и методы

Исследования на свариваемость жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов марок ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ выполняли на технологических образцах (пластины 100×200×2,5 мм для сплава ХН45МВТЮБР и пластины 100×200×2,0 мм для сплава ХН50ВМТЮБ).

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) и последующая упрочняющая локальная термообработка (ЛТО) проведены электронным лучом в вакууме на установке ЭЛУРС-М, оснащенной агрегатом ЭЛА-50/5М и системой программного управления на базе устройства ЧПУ «Маяк-42». Химический состав образцов определен методами рентгеноэлектронной спектроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии на спектрометрах ЭС-2401 и МС-7201М.

Микротвердость измеряли прибором ПМТ-3. Исследования микроструктур выполняли с помощью микроскопа ММР-4.

Предварительную оценку режимов сварки и локальной термоциклической обработки расфокусированным электронным лучом сварного шва производили при помощи программы расчета температурных полей в пластине придвигающемся по поверхности локальном источнике тепла.

Результаты и обсуждение

Проведены металлографические исследования образцов из свариваемого металла и сварных швов, сваренных ЭЛС.

Сварные швы из сплавов марок ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ подвергнуты штатной изотермической термообработке (ТО), рекомендованной ТУ14-1-1059–74 и ТУ14-1-1052–74 соответственно.

Режим термообработки в камерной печи СНО 4.8.2,5/10 в среде аргона для сплава марки ХН45МВТЮБР включал:

- закалку при температуре 1030°C;
- старение при температуре 800°C в течение 5 ч с охлаждением на воздухе;
- низкотемпературное старение при температуре 710°C в течение 15 ч, охлаждение на воздухе.

Режим термообработки для сплава марки ХН50ВМТЮБ включал:

- закалку в электровакуумной печи СЭВ 3.3/11,5 при температуре 1140°C в течение 1 ч;
- старение в камерной печи СНО 4.8.2,5/10 при температуре 900°C в среде аргона в течение 16 ч с охлаждением на воздухе.

Поскольку сварное соединение, полученное сваркой по закаленной основе исследуемых сплавов, практического применения не имеет и используется только после общей изотермической обработки всего сварного узла, то дальнейшие работы направлены на исследование сварных соединений: для практического применения – сварка по состаренному металлу с дальнейшей локальной и общей ТО сварного шва.

Микроструктура основного металла марки ХН45МВТЮБР (рис. 1) представляет собой железохромоникелевый аустенит с величиной зерна, равной 8 баллам (ГОСТ 5639-822), в котором находятся высокодисперсные выделения с твердостью

Н100234-239. Макротвердость равна 89–90 HRB (1179–1184 HB), что согласно РТМЗ-1947–91 соответствует пределу прочности не более 650 МПа.

На рис. 2 представлена макроструктура сварного соединения жаропрочного сплава марки ХН45МВТЮБР после ЭЛС по закаленной основе и штатной ТО. Шов с зоной термического влияния (ЗТВ) имеет поперечные размеры 2,82 мм.

Микроструктура сварного соединения – литая (рис. 3), из зерен твердого раствора выделились упрочняющие фазы по границам зерен. Среднее значение микротвердости $H_{200}=351,6$.

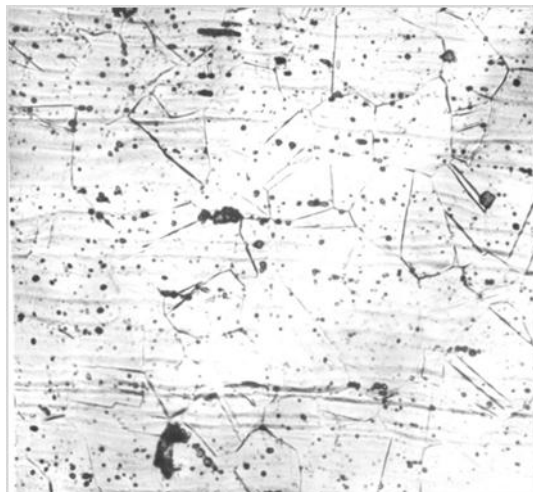


Рис. 1. Микроструктура ($\times 300$) основного металла сплава марки ХН45МВТЮБР в закаленном состоянии с твердостью 89–90 HRB (1179–1184 HB)

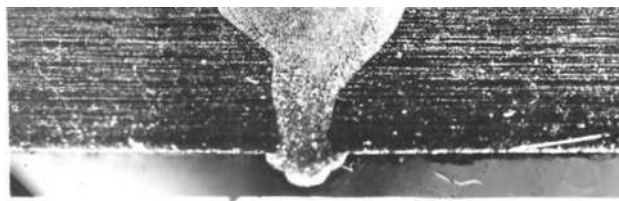


Рис. 2. Внешний вид ($\times 9$) сварного соединения жаропрочного сплава марки ХН45МВТЮБР, выполненного электронно-лучевой сваркой по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии

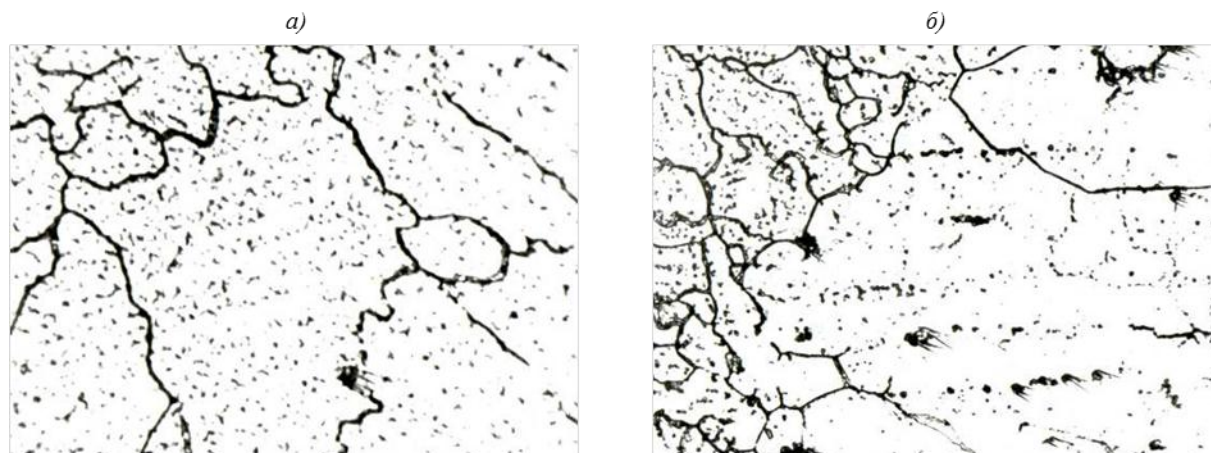


Рис. 3. Микроструктура ($\times 300$) сварного соединения (а) и границы сплавления сварного шва (б) сплава марки ХН45МВТЮБР, выполненного электронно-лучевой сваркой по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии

Граница сплавления на рис. 3, б – четкая, с выделениями упрочняющих фаз по границам зерен. Микротвердость имеет значение $H_{200}=339\text{--}359$. В зоне термического влияния наблюдаются области: полной, частичной перекристаллизации и закалки. Структура состоит из крупных зерен твердого раствора, упрочненных выделениями карбидов по телу и границам зерен.

На рис. 4 изображена микроструктура основного металла из сплава марки ХН50ВМТЮБ в закаленном состоянии. Микроструктура сплава в закаленном состоянии соответствует твердому раствору, в котором растворены все упрочняющие фазы, с твердостью 89–90 HRB (1179–1184 HB), что, согласно РТМЗ-1947–91, соответствует пределу прочности не более 1000 МПа.

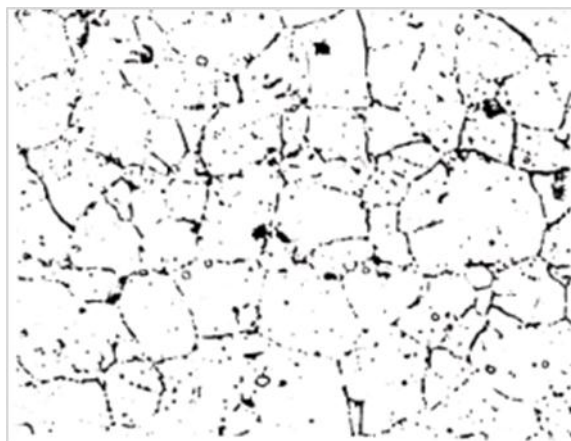


Рис. 4. Микроструктура ($\times 300$) основного металла сплава марки ХН50ВМТЮБ в закаленном состоянии с твердостью 89–90 HRB (1179–1184 HB)

На рис. 5 представлена макроструктура сварного соединения жаропрочного сплава марки ХН50ВМТЮБ, выполненного ЭЛС также по закаленной основе, но с последующей закалкой и старением по штатной технологии. Зона термического влияния шва, сваренного электронным лучом, имеет поперечные размеры 3,5 мм. Микроструктура шва, сваренного электронным лучом, имеет плотное дендритное строение с твердостью $H_{100}=276$. Граница сплавления имеет плавный переход к зоне термического влияния, ее микроструктура тонкая без утолщения границ зерен. Микротвердость границы сплавления имеет значение $H_{100}=268\text{--}276$.

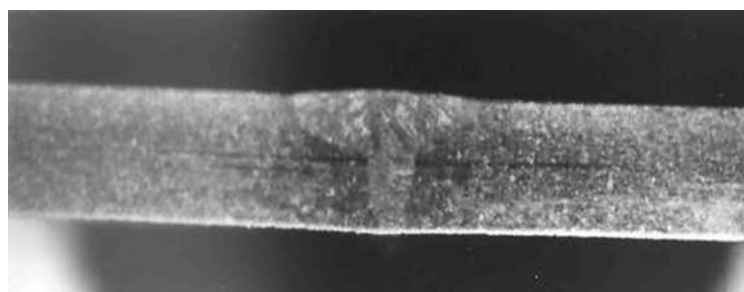


Рис. 5. Внешний вид ($\times 9$) сварного соединения жаропрочного сплава марки ХН50ВМТЮБ, выполненного электронно-лучевой сваркой по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии

В зоне термического влияния наблюдается область полной перекристаллизации с микротвердостью $H_{100}=266$ и величиной рекристаллизованного зерна 6–7 баллов по ГОСТ 5639–82.

Микроструктура сварного соединения – литая (рис. 6, а), состоящая из дендритов твердого раствора на основе никеля и дисперсных зернистых выделений карбидных фаз, равномерно распределенных в объеме металла шва.

На рис. 6, б представлена граница сплавления с выделениями карбидных фаз по границам зерен, дендритов, со средним значением микротвердости $H_{200}=283$. В зоне термического влияния наблюдаются области полной, частичной перекристаллизации и закалки. Структура околошовной зоны представляет собой зерна твердого раствора никеля и выделения карбидных фаз в теле и по границам зерен. Микротвердость имеет значение $H_{200}=278–288$.

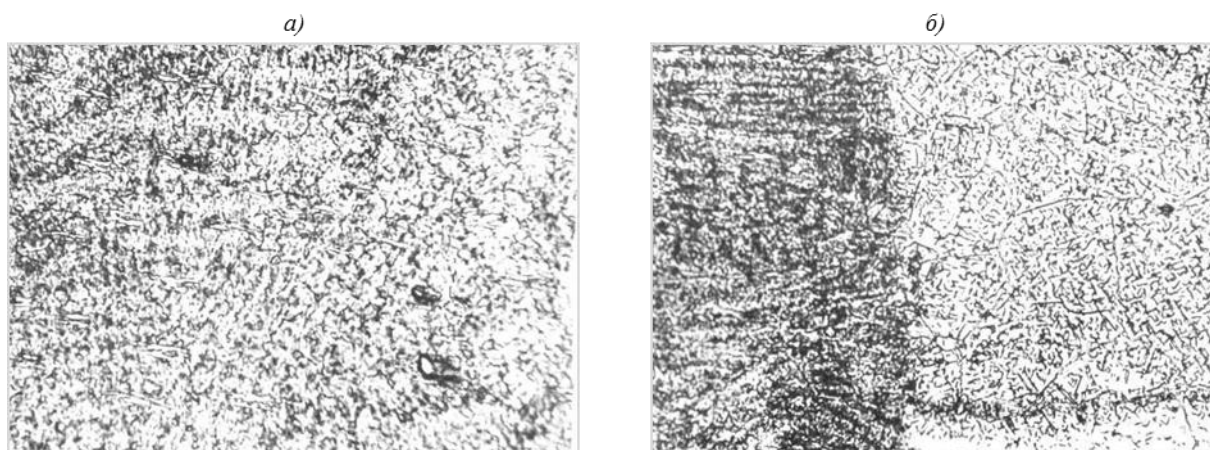


Рис. 6. Микроструктура ($\times 300$) сварного соединения (а) и границы сплавления сварного шва (б) сплава марки ХН50ВМТЮБ, выполненного электронно-лучевой сваркой по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии

Расчет напряженно-деформированного состояния в рамках структурно-аналитической теории прочности [16] с учетом активной пластичности, ползучести, диффузионной ползучести, релаксации напряжений показал, что как в результате сварки, так и при старении в сварном шве, возникают механические напряжения, сопоставимые с пределом прочности.

Изменения химического состава и структуры, наличие остаточных напряжений и высокой плотности точечных дефектов влияют на температурный интервал, кинетику и последовательность превращений при ЭЛС швов. Высокая плотность дефектов, созданных при пластической деформации, и наличие остаточных напряжений существенно ускоряют процесс выделения упрочняющих фаз в сварном шве. Стандартная ТО по режимам, указанным ранее, привела к достижению равновесной структуры материала шва, которая аналогична структуре состаренного материала без шва.

В данной работе методами рентгеноэлектронной и Оже-электронной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа исследованы структурно-фазовое состояние и химический состав сплавов марок ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ в состоянии поставки (металлические пластины) и их швы, полученные ЭЛС.

Рентгеноструктурные исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-3М с использованием $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучения. Результаты экспериментов обработаны с использованием программы анализа структурно-фазового состояния.

Далее представлены результаты рентгенофазового анализа образцов из сплавов марок ХН50ВМТЮБ и ХН45МВТЮБР.

Сплав марки ХН50ВМТЮБ. Из полученных результатов следует, что материал основы состоит из фазы системы Ni–Cr–Fe (твердый раствор), в которой содержится вторая мелкодисперсная фаза системы Fe–Cr–Mo(W) в количестве – до 4% (объемн.). Материал шва в состоянии после сварки – это фаза на основе системы Ni–Cr–Fe – более крупноблочная с большим параметром решетки. Термоциклирование шва привело к измельчению структуры до состояния, характерного для состаренного материала основы. Вторая фаза на дифрактограмме прослеживается слабо и тип фазы не идентифицируется. Шов, состаренный вместе с основой (стандартная ТО), по фазовому составу аналогичен материалу в состоянии поставки. Таким образом, структура сварного шва более крупнодисперсная и представляет собой твердый раствор на основе Cr–Ni. Проведенная циклическая ТО привела к измельчению структуры, но образования вторых фаз не обнаружено.

Сплав марки ХН45МВТЮБР. Материал поставки сплава марки ХН45МВТЮБР – двухфазный, относительно мелкоблочный, основа – фаза системы типа Fe–Cr–Ni. Вторая, упрочняющая фаза – типа Ni₄Mo. Материал в вершине шва до шлифовки также двухфазный, с меньшей долей второй фазы по сравнению с материалом поставки. Таким образом, в вершинных областях шва в процессе его остывания произошло упрочнение с выделением второй фазы, но структура стала крупноблочной. После шлифовки вершины шва – материал шва стал однофазным, более мелкодисперсным.

В целом структурно-фазовое состояние сварных швов отличается от состояния материала поставки. Размеры блоков когерентного рассеяния в основном материале более чем в 2 раза превышают размеры блоков в шве.

Химические составы основного материала и сварного шва исследованы методом Оже-электронной спектроскопии на спектрометре JAMP-10s (фирма Jeol). Исследования проведены в приповерхностных областях пластин после травления поверхности ионами аргона с энергией 3 кэВ в течение 3 мин со скоростью травления 3,5 нм/мин.

Основными компонентами материала в состоянии поставки сплава марки ХН45МВТЮБР являются никель, хром и железо. Из легирующих компонентов в исследованных приповерхностных слоях обнаруживается молибден. Приповерхностная область содержит углерод, азот и кислород, выделившийся из слоя оксидов.

Как и у сплава марки ХН50ВМТЮБ, зона шва незначительно обогащена хромом, железом и молибденом. Углерод в процессе сварки выгорает до минимума. В обоих случаях наблюдается присутствие азота. В отличие от сплава марки ХН50ВМТЮБ, поверхность пластины из сплава марки ХН45МВТЮБР и его сварной шов загрязнений серы не содержат.

Таким образом, в процессе сварки происходит некоторое изменение элементного состава зоны сварного шва по отношению к основному материалу. В частности, возрастает содержание хрома и молибдена – в 1,1–1,2 раза, что может положительно сказаться на жаростойкости зоны сварного шва и на склонности материала к выделению упрочняющих фаз с участием молибдена, вольфрама и ниобия. В то же время это ведет к смещению температуры фазовых превращений при ТО. Для рассмотренных сплавов следует ожидать понижения температуры ТО при упрочнении, в том числе вследствие напряженного состояния зоны сварного шва.

Рентгеноэлектронными и масс-спектрометрическими исследованиями установлено, что состав материала сварных швов и прилегающих к ним областей отличается от состава исходного материала. Установлено, что погонная энергия, используемая при сварке, влияет как на количественный состав швов, так и на химическое состояние компонентов. Результаты Оже-анализа исследуемых сплавов подтверждают, что зона сварного шва обогащается хромом и молибденом. Однако, несмотря на наблюдаемое перераспределение легирующих компонентов в зоне сварки, состав сталей в ней остается соответствующим составу, способному к термическому упрочнению.

В результате металлографических и металлофизических исследований установлено, что изменения химического состава и структуры, а также наличие остаточных напряжений и высокой плотности точечных дефектов влияют на температурный интервал, кинетику и последовательность превращений в сварных соединениях. Высокая плотность точечных дефектов, созданных пластической деформацией, и наличие остаточных напряжений существенно ускоряют процесс выделения интерметаллидов в сварном шве.

Таблица 1

**Механические свойства сварного соединения сплава марки ХН45МВТЮБР
(лист толщиной 2,5 мм)**

Режим обработки	Условный номер образца	Испытание на статическое растяжение			Испытание на ударный изгиб		Испытание на статический изгиб		
		σ_b , Н/мм ²	δ , %	Характер разрушения	KCU, Дж/см ²	Характер разрушения	Нагрузка P, кН	α^* , град	Характер разрушения
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии	1	1215	21,5	По основе	63	По надрезу, по границе сплавления металла шва	1,70	132,5	Без разрушения
	2	1215	22,5	По зоне термического влияния	68		1,69	131	
	3	1215	21,5		69,5		1,68	132	
	4	1205	20,0		57		1,70	134	
	5	1215	22,5		57		1,64	132	
	6	1215	22,5		82		1,70	137	
Основной металл в состаренном состоянии, прошедший закалку и старение	7	1215	25	Разрушение без образования шейки	62	Хрупкое разрушение по надрезу	1,70	128	Хрупкое разрушение
	8	1215	23		61		1,70	132	
	9	1215	23		69		1,71	130	
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по состаренной основе	10	784	7,0	Разрушение по шву с образованием шейки	80	По надрезу,	1,32	135	Без разрушения
	11	794	7,5		84		1,24	133	
	12	784	7,0		83		1,21	125	
	13	764	7,0		80,5		1,26	133	
	14	794	7,0		83		1,26	130	
	15	794	7,0		77		1,25	129	
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по состаренной основе, после локальной термодиффузионной обработки	16	1098	18	По зоне термического влияния	70	По границе сплавления металла шва	1,82	152,5	Без разрушения
	17	1171	18,5		65		1,83	138	
	18	1156	17,5		67		1,86	150	
	19	1029	13,5		73		1,83	143	
	20	1137	17,5		65		1,79	137	
	21	1112	16		67		1,62	141	

* Угол изгиба до образования первой трещины.

Таблица 2

**Механические свойства сварного соединения сплава марки ХН50МВТЮБР
(лист толщиной 2,0 мм)**

Режим обработки	Условный номер образца	Испытание на статическое растяжение			Испытание на ударный изгиб		Испытание на статический изгиб		
		σ_b , Н/мм ²	δ , %	Характер разрушения	KCU, Дж/см ²	Характер разрушения	Нагрузка P, кН	α^* , град	Характер разрушения
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по закаленной основе, после закалки и старения по штатной технологии	1	921	26,0	По основе	97	По надрезу, по границе сплавления металла шва	0,95	131	Без разрушения
	2	941	21,5		67		0,95	130	
	3	980	26,0		97		0,95	123,5	
	4	960	25,5		107		0,94	120	
Основной металл в состаренном состоянии, прошедший закалку и старение	5	951	33	Разрушение без образования шейки	84	Хрупкое разрушение по надрезу	0,95	123	Хрупкое разрушение
	6	931	33		73		1,00	125	
	7	892	30		78		1,02	128	
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по состаренной основе	8	872	15,5	По шву	80	По надрезу, по границе сплавления металла шва	0,78	120	Без разрушения
	9	853	18,5		79		0,78	119	
	10	892	19,0		81		0,78	110	
	11	862	19,0		80		0,78	112	
Сварное соединение, выполненное ЭЛС по состаренной основе, после локальной термодиффузионной обработки	12	999,5	21	По линии сплавления	113	По надрезу, по границе сплавления металла шва	0,95	130	Без разрушения
	13	995	24		113		0,98	122,5	
	14	999,5	24		92		1,00	126,5	
	15	1009	28		80		1,02	124	
	16	960	21		117		0,92	120	
	17	980	21		90		0,87	118	

* Угол изгиба до образования первой трещины.

Локальная циклическая обработка сварного шва с использованием электронного луча в подобранном режиме позволила достичь не только уровня 0,95 прочности основного металла (равной основному металлу) и пластичности без перестаривания структуры, но при этом не потребовалось проведения дополнительной стандартной ТО (закалка+старение). Проведены металлофизические исследования сварных соединений, механические испытания на изгиб, растяжение и ударную вязкость образцов исследуемых сплавов. Результаты этих исследований представлены в табл. 1 и 2. Следует отметить, что равномерное относительное удлинение (δ) для шва значительно занижено, а наиболее объективным параметром пластичности сварного шва при испытании на статический изгиб считается угол изгиба (α).

Заключения

Химический состав, структура и напряженно-деформированное состояние сварных швов жаропрочной стали зависят от погонной энергии сварки. Сварка электронным лучом приводит к существенному улучшению структуры сварного соединения. Подобраный термоциклический режим обработки шва локальным источником тепла обеспечивает формирование высоких прочностных свойств сварного шва без дополнительной ТО.

Установлено, что для получения стабильных прочных сварных швов рассматриваемых сталей выполненных ЭЛС, режим сварки должен соответствовать следующим параметрам: сила тока луча 13 мА, ускоряющее напряжение 60 кВ, скорость сварки 6 мм/с.

Отработаны режимы ЭЛС сплавов марок ХН45МВТЮБР и ХН50ВМТЮБ, обеспечивающие получение сварного соединения, которое (после применения в дальнейшем штатной ТО) отвечает требованиям первой категории прочности по ОСТ ВЗ-2491–90, т. е. $\sigma_{в.св}=0,9\sigma_{в}$ для сплава:

– ХН45МВТЮБР – $\sigma_{в(ЭЛС+ТО)}=\sigma_{в}$;

– ХН50ВМТЮБ – $\sigma_{в(ЭЛС+ТО)}=\sigma_{в}$.

На образцах сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой и подвергнутых локальной циклической ТО, получена прочность сварного соединения, отвечающая требованиям первой категории прочности по ОСТ ВЗ-2491–90 при обеспечении равной (с основным металлом) пластичности для сплава:

– ХН45МВТЮБР – $\sigma_{в(ЭЛС+ЛТО)}=0,92\sigma_{в}$;

– ХН50ВМТЮБ – $\sigma_{в(ЭЛС+ЛТО)}=\sigma_{в}$.

Проведенные металлофизические исследования сварных соединений, выполненных электронным лучом, показали, что химический состав металла сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) обеспечивает способность закаливаться и стариться в ходе локальной циклической ТО, а также определены временные и температурные параметры процесса локального упрочнения (старения).

Расчет напряженно-деформированного состояния сварных швов показал, что ТО (как штатная, так и локальная циклическая) обеспечивает снятие остаточных напряжений после сварки до безопасного уровня.

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. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.

3. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сварка и безопасность: матер. Всерос. науч.-практич. конф., 11–12 окт. 2012 г. Якутск, 2012. Т. 1. С. 21–30.
4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. М.: ВИАМ, 2013. 543 с.
5. 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: 31.08.2016).
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
7. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокоренингового никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
8. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
9. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
10. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
11. Шалькевич А.Б., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Маркова Е.С. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для самолетов нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 142–150.
12. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
13. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Оптимизация сварочной ремонтной технологии деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов // Сварочное производство. 1997. С. 19–23.
14. Лукин В.И., Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // Сварочное производство. 1997. №6. С. 12–17.
15. Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов // Митом. 2007. №12. С. 7–14.
16. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. Л.: Наука, 1992. 400 с.