

УДК 621.791.14

*М.Л. Саморуков¹, А.В. Свиридов¹, Л.И. Рассохина¹, О.Н. Битюцкая¹***РОТАЦИОННАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ ЛИТЫХ И ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ159**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23

Проведено исследование свариваемости однородных и разнородных сочетаний полуфабрикатов жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 ротационной сваркой трением. Получены сварные соединения литейных полуфабрикатов в однородном сочетании и литейных полуфабрикатов с деформируемыми. Для выбора оптимальных технологических параметров определены значения статического угла изгиба образцов, полученных без упрочняющей термической обработки. Сварные соединения, выполненные при выбранных оптимальных технологических параметрах и с упрочняющей термической обработкой после сварки, исследованы для определения комплекса механических свойств и структурных особенностей.

Ключевые слова: *сварка трением, ротационная сварка трением, жаропрочный никелевый сплав, газотурбинный двигатель.*

*M.L. Samorukov¹, A.V. Sviridov¹, L.I. Rassohina¹, O.N. Bityutskaya¹***ROTATIONAL FRICTION WELDING OF CAST AND DEFORMED NICKEL SUPERALLOY VG159 SEMIFINISHED PRODUCTS**

A study was made to analyze the rotational friction welding weldability of homogeneous and heterogeneous combinations of semi-finished products of nickel superalloy VZh159. Welded joints of cast semi-finished products in a homogeneous combination and cast semi-finished products with deformed ones were obtained. To select the optimal technological parameters, the values of the static bending angle of the samples obtained without hardening heat treatment were determined. Welded joints obtained at the selected optimal technological parameters and with hardening heat treatment after welding were investigated to determine the mechanical properties and structural features.

Keywords: *friction welding, rotational friction welding, nickel superalloy, gas turbine engine.*

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

Введение

При разработке перспективных изделий отечественного двигателестроения важной задачей является обеспечение их высоких технических характеристик, достижение которых невозможно без применения новых конструкционных материалов, обладающих более высокими прочностными характеристиками [1–3]. Применение таких материалов осложняется их более низкой технологичностью, в том числе ограниченной или низкой свариваемостью методами сварки плавлением [4–7]. Поэтому

для получения валов, роторов и цилиндрических корпусов компрессоров из современных материалов перспективно использовать ротационную или инерционную сварку трением [8–12]. Применение сварки трением позволяет не только соединять ограниченно свариваемые материалы, но и значительно снижать трудоемкость изготовления и уровень остаточных напряжений [13]. Отработанная технология сварки трением обеспечивает повторяемость геометрических характеристик сварных соединений, высокий уровень прочности и отсутствие дефектов в шве и околошовной зоне.

Таким образом, ротационная сварка выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла, выделяемого при трении, и может быть использована при соединении ограниченно свариваемых, разнородных и разноименных материалов как в термоупрочненном состоянии, так и с последующей термической обработкой [14–16].

Основными преимуществами сварки трением являются [13]:

- возможность получения разноименных и разнородных сварных соединений, в том числе материалов, не свариваемых методами сварки плавлением;
- минимальный объем зоны термического влияния при сварке;
- минимальные значения остаточных напряжений при сварке;
- экологическая чистота технологического процесса;
- низкая себестоимость технологического процесса.

Применение метода сварки трением, по сравнению со сваркой плавлением, обеспечивает:

- возможность получения сварных соединений с прочностью, близкой к прочности основного материала, в том числе материалов, не свариваемых методами сварки плавлением;
- отсутствие в процессе сварки загазованности и ультрафиолетового излучения;
- отсутствие необходимости применения присадочного материала, защитного газа, вакуумной среды;
- низкий уровень остаточных напряжений;
- возможность автоматизации процесса сварки.

Материалы и методы

Для проведения упрочняющей термической обработки до сварки образцы исследуемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 механически обрабатывали до диаметра 18 мм и длины 80 мм. Для выбора оптимальных технологических режимов ротационной сварки трением исследуемого материала в сочетаниях «отливка + отливка» и «отливка + деформированный полуфабрикат» образцы после термической обработки механически обрабатывали до диаметра 16 мм и длины 70 мм.

Упрочняющую термическую обработку выполняли также после сварки для обеспечения высоких прочностных характеристик зоны сварного шва. Термическую обработку сварных заготовок и полуфабрикатов основного материала проводили по стандартным режимам.

Выбор оптимальных технологических параметров ротационной сварки трением производили на установке с гидравлическим приводом ПСТ-50-2М, которая обеспечивает максимальное осевое усилие 50 тс и предназначена для сварки цилиндрических заготовок сплошного и трубчатого сечения.

Для выбора параметров ротационной сварки трением получены сварные соединения исследуемых сочетаний в широком диапазоне технологических параметров. Диапазон исследуемых технологических параметров определяется техническими характеристиками оборудования и видом свариваемого материала. Критерием выбора режима для продолжения дальнейших исследований является достижение продольной

осадки, обеспечивающей требуемую степень деформации, объемное взаимодействие и минимальное тепловложение.

Для исследования влияния термомеханического цикла сварки и упрочняющей термической обработки на механические характеристики по зонам сварных соединений определяли микротвердость HV 0,05 в основном материале, околошовной зоне и зоне сварного шва в диапазоне от -3,5 до 3,5 мм от плоскости сварного шва. Микротвердость по зонам сварных соединений определяли вдоль продольной оси симметрии образцов.

Проведено исследование микроструктуры сварных швов исследуемых сочетаний на инвертированном микроскопе Olympus GX51, определены ударная вязкость (КСУ) стандартных образцов с U-образным надрезом, нанесенным в плоскости сварного шва, и предел кратковременной прочности.

Результаты и обсуждение

Для выбора оптимальных режимов сварки получены сварные соединения в широком диапазоне технологических параметров. Основными технологическими параметрами ротационной сварки трением являются: давление нагрева P_n , время нагрева t_n , давление проковки $P_{пр}$, время проковки $t_{пр}$. Выбор исследуемых диапазонов значений параметров определялся научно-техническим заданием ФГУП «ВИАМ» [1–3]. Для получения сварных соединений применяли установку ротационной сварки трением ПСТ-50-2М. Параметры процесса варьировали в следующих диапазонах: $P_n=170–280$ МПа, $P_{пр}=280–450$ МПа, $t_n=10–18$ с – для обоих сочетаний. Время проковки установлено постоянным – $t_{пр}=10$ с. Значения осадки для всех исследуемых режимов составили не менее 8 мм – для того, чтобы обеспечить объемное взаимодействие приконтактных объемов свариваемых полуфабрикатов с целью достижения требуемой прочности сварных соединений (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные режимы сварки трением сплава ВЖ159

Условный номер режима сварки	Сочетание материалов в сварном соединении	Характеристика режима сварки – диапазон значений	Время нагрева t_n , с	Осадка $\Delta_{срел}$, мм
1	Отливка + отливка	Низкий	18	9,4
2		Средний	15	12,3
3		Высокий	10	13,6
4	Отливка + деформированный полуфабрикат	Низкий	18	8,0
5		Средний	15	10,3
6		Высокий	10	10,7

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показал, что для одноименных сочетаний материалов на всех режимах значения осадки больше, чем для разноименных, полученных на аналогичных режимах. При визуальном осмотре сварных образцов обнаружено, что со стороны деформированных заготовок грат пластичный и гладкий, а со стороны отливок – хрупкий и растрескавшийся. На поверхности всех отливок со стороны грата видны следы деформации, площадь которой становится больше при увеличении параметров P_n и $P_{пр}$ (рис. 1). При проведении рентгенографического контроля сварных соединений, полученных на исследуемых режимах, дефектов не выявлено [17].



Рис. 1. Сварные образцы при сочетании материалов «отливка + деформированный полуфабрикат», выполненные на экспериментальных режимах 4 (а), 5 (б) и 6 (в) (отливки справа)

Для выбора технологических параметров сварки для последующей обработки определены значения статического угла изгиба сварных соединений (табл. 2). На исследуемых режимах получены сварные образцы и проведены испытания по определению статического угла изгиба [4–6] без упрочняющей термической обработки. Испытания на статический угол изгиба и характерная диаграмма испытания в координатах «нагрузка–удлинение» представлены на рис. 2. Результаты испытаний сварных соединений сплава ВЖ159 на статический изгиб, включая измеренные углы изгиба, представлены в табл. 2.

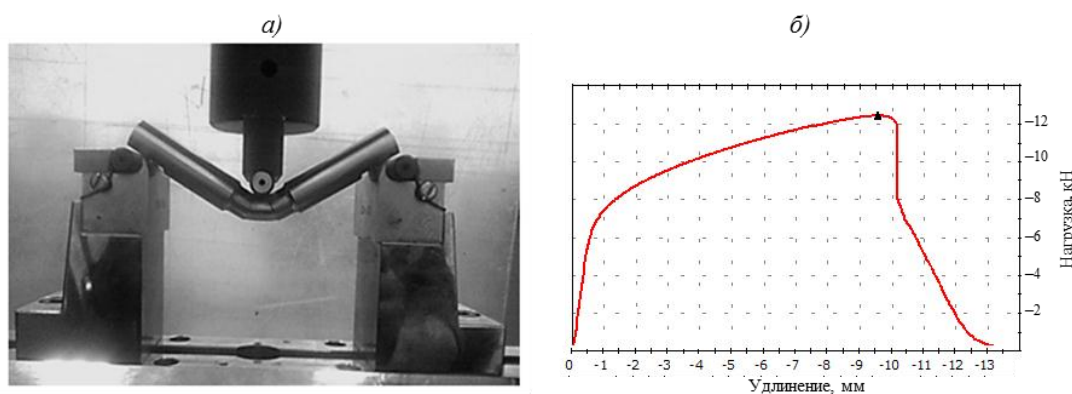


Рис. 2. Испытание на статический изгиб (а) и типичная диаграмма испытания в координатах «нагрузка–удлинение» (б)

Таблица 2

Результаты испытаний* сварных соединений сплава ВЖ159 на статический изгиб

Сочетание материалов в сварном соединении							
отливка + отливка				отливка + деформированный п/ф			
условный номер режима сварки	напряжение при изгибе, МПа	удлинение, мм	угол изгиба, градус	условный номер режима сварки	напряжение при изгибе, МПа	удлинение, мм	угол изгиба, градус
1	$\frac{1030-1340}{1185}$	$\frac{3,0-9,0}{6,0}$	$\frac{8-32}{20}$	4	$\frac{1180-1505}{1340}$	$\frac{4,5-10,5}{7,5}$	$\frac{15-31}{23}$
2	$\frac{1250-1340}{1295}$	$\frac{6,0-8,5}{7,0}$	$\frac{22-31}{26}$	5	$\frac{1435-1590}{1510}$	$\frac{7,5-11,5}{9,5}$	$\frac{20-32}{26}$
3	$\frac{1440-1510}{1475}$	$\frac{9,5-11,0}{10,0}$	$\frac{22-29}{25}$	6	$\frac{1480-1550}{1515}$	9,5	28

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

На основании результатов испытания на статический угол изгиба выбраны технологические параметры для дальнейшей отработки с целью определения комплекса механических характеристик и исследования структуры сварного шва и околошовной зоны. Результаты испытаний по определению статического угла изгиба позволили установить, что увеличение значений давления на этапах нагрева и проковки приводит к повышению значений прочности при изгибе, относительного удлинения и максимальных углов изгиба, при которых происходит разрушение сварных образцов исследуемых сочетаний. Однако при одинаковых параметрах сварки более высокие значения показаны сочетанием материалов «отливка + деформированный полуфабрикат». Для сочетания материалов «отливка + отливка» максимальные значения прочности при изгибе и относительного удлинения получены на образцах, сваренных на режиме 3. Для сочетания материалов «отливка + деформированный полуфабрикат» максимальные значения механических характеристик, фиксируемых при испытании на статический угол изгиба, получены на образцах, сваренных на режимах 5 и 6. Разрушение всех образцов происходило по околошовной зоне со стороны литого полуфабриката.

Для обеспечения эффективности технологического процесса и повышения КИМ при сохранении уровня прочностных характеристик сварных соединений проведена корректировка времени на этапе нагрева ($t_{\text{н}}$) с целью уменьшения значений осадки, а также снижения деформации литых заготовок: на режимах 2 и 5 – до 13 с; на режимах 3 и 6 – до 8 с. На режимах 1 и 4 время нагрева оставлено без изменений.

На скорректированных режимах проведена ротационная сварка трением заготовок для оценки кратковременной прочности при растяжении при температуре испытания 20 °С. Для обеспечения высокого уровня прочности после сварки проведена *упрочняющая термическая обработка* (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний сварных соединений сплава ВЖ159 на растяжение

Сочетание материалов в сварном соединении					
отливка + отливка			отливка + деформированный п/ф		
условный номер режима сварки	σ_b^* , МПа	K^{**}	условный номер режима сварки	σ_b^* , МПа	K^{**}
1	$\frac{530-720}{630}$	0,9	4	$\frac{590-700}{655}$	0,9
2-1	$\frac{490-620}{535}$	0,75	5-1	$\frac{650-820}{740}$	1,0
3-1	$\frac{500-700}{630}$	0,9	6-1	$\frac{540-860}{715}$	1,0
Требование по ТЗ		$\geq 0,9$	Требование по ТЗ		$\geq 0,9$
* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.					
** Коэффициент ослабления сварного соединения: $\sigma_{b,св}/\sigma_b$.					

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что:

- разброс показателей прочности сварных соединений, полученных на одном технологическом режиме сварки, достигает 35%. Возможно, причиной является структурная неоднородность литого полуфабриката свариваемого материала;
- разрушение сварных соединений происходит по материалу литого полуфабриката;
- одноименное сочетание материалов исследуемого сварного соединения характеризуется более низкими значениями прочностных характеристик сварных соединений одноименного сочетания в сравнении с разноименным сочетанием;
- прочность сварных соединений сочетания материалов «отливка + отливка» на режимах 1 и 3-1 составляет 0,9 от прочности литого сплава ВЖ159;
- прочность сварных соединений сочетания материалов «отливка + деформированный полуфабрикат» на всех режимах сварки трением (4, 5-1, 6-1) составляет 0,9-1,0 от прочности литого сплава ВЖ159.

По результатам испытаний сварных образцов на прочность при изгибе и растяжении при 20 °С выбраны режимы, обеспечивающие наиболее высокие значения механических характеристик для проведения дальнейших исследований.

На выбранных режимах получены сварные соединения для определения длительной прочности, ударной вязкости и проведения металлографических исследований сварных соединений.

Проведены испытания на длительную прочность при температурах 650 и 1000 °С на базе 100 ч с нагрузкой 0,9 от соответствующего значения для литого полуфабриката из сплава ВЖ159. Время до разрушения большей части образцов превосходило 100 ч. Анализ результатов испытаний показал, что длительная прочность сварных образцов исследуемых сочетаний материалов составляет $\sigma_{100}^{650} = 470$ МПа, $\sigma_{100}^{1000} = 22,5$ МПа.

Проведены металлографические исследования сварных образцов без упрочняющей термической обработки после сварки. Установлено, что структура литого полуфабриката более крупнозернистая, чем структура деформированного. Величина зерна деформируемого полуфабриката не превышает 4 балла (рис. 3, а, б).

Исследование структуры околошовной зоны и зоны сварного шва показало, что в околошовной зоне наблюдается характерное для ротационной сварки трением термомодеформационное изменение материала, выражающееся в «закручивании» материала в направлении его выхода в грат при сварке. Дефекты в структуре сварного шва и околошовной зоны не обнаружены (рис. 3, в). Зона шва – узкая, ширина составляет около 1 мм, ширина околошовной зоны со стороны литого полуфабриката – около 3 мм, со стороны деформированного полуфабриката – до 1,5–2,0 мм. Структура сварного шва – мелкозернистая, что является следствием термомодеформационного воздействия в процессе сварки (рис. 3, г).

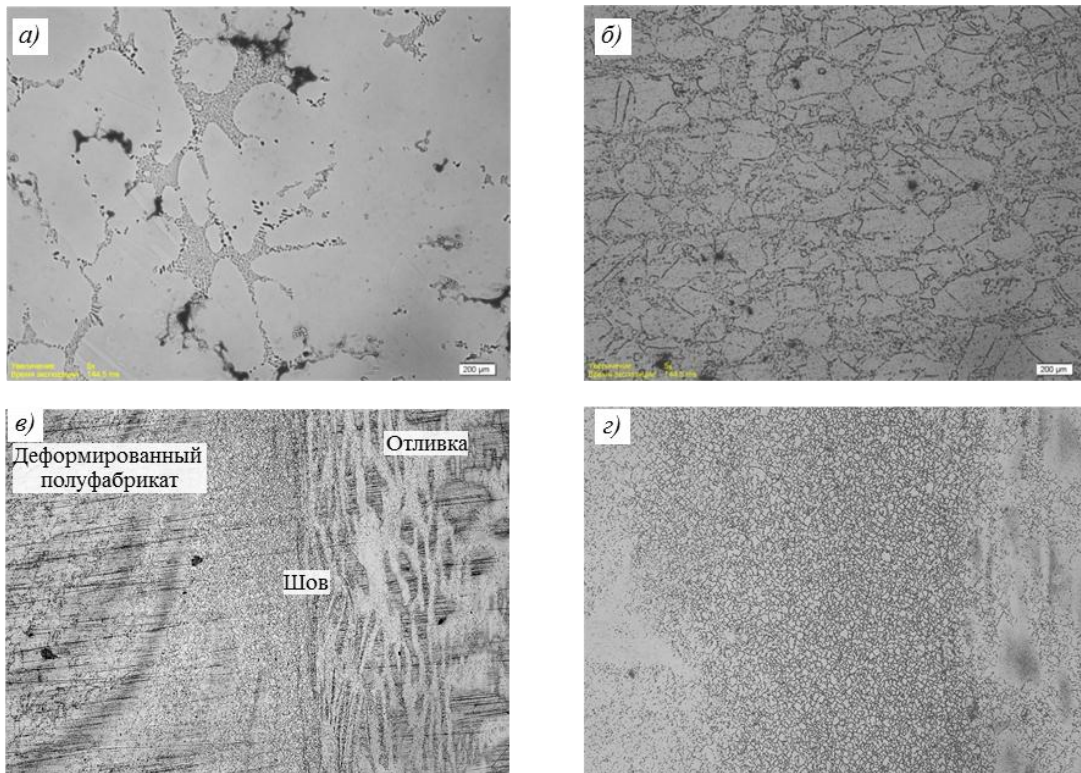


Рис. 3. Структура сварных соединений полуфабрикатов без упрочняющей термической обработки:

а, б – свариваемые материалы ($\times 200$); в – общий вид сварного соединения ($\times 100$); г – сварной шов ($\times 200$)

Исследование изломов сварных соединений показало, что термическая обработка незначительно изменяет структуру литого полуфабриката. Разрушение всех образцов при кратковременных и длительных испытаниях происходило по отливке и характеризуется грубым дендритным изломом (рис. 4).

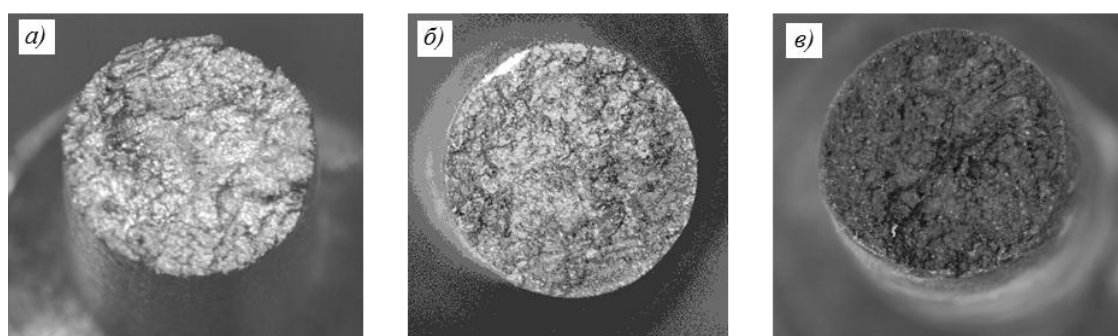


Рис. 4. Изломы сварных образцов с сочетанием литого и деформируемого полуфабрикатов при температурах 20 (а), 650 (б) и 1000 °С (е)

Исследовано распределение микротвердости (HV 0,05) по зонам сварных соединений с упрочняющей термической обработкой после сварки. Установлено, что микротвердость структуры в деформируемом полуфабрикате больше, чем структуры в литом полуфабрикате, но протяженность околосшовной зоны со стороны литого полуфабриката, характеризующаяся более высокими значениями микротвердости, больше (до 3,0–3,5 мм), чем со стороны деформируемого (до 1,5 мм) (табл. 4).

Таблица 4

Распределение микротвердости (HV 0,05) по зонам сварных соединений сплава ВЖ159

Место измерения	Микротвердость при расстоянии от плоскости сварного шва, мм									Основной материал
	0	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	
Литой полуфабрикат	400	390	395	390	395	395	410	380	375	365
Деформированный полуфабрикат		390	450	420	445	410	410	415	400	

Определение значений ударной вязкости (KCU) сварных соединений показало низкую пластичность структуры исследуемых сочетаний материалов вследствие крупнозернистой структуры литого металла. Значения ударной вязкости незначительно изменяются после проведения упрочняющей термической обработки: $KCU_{\text{сред}}=6,6$ Дж/см² (отливка + отливка); $KCU_{\text{сред}}=10,9$ Дж/см² (отливка + деформируемый полуфабрикат). Показано, что ударная вязкость структуры сварного шва при одноименном сочетании материалов меньше, чем значения ударной вязкости для сварного шва при сочетании литого полуфабриката с деформируемым.

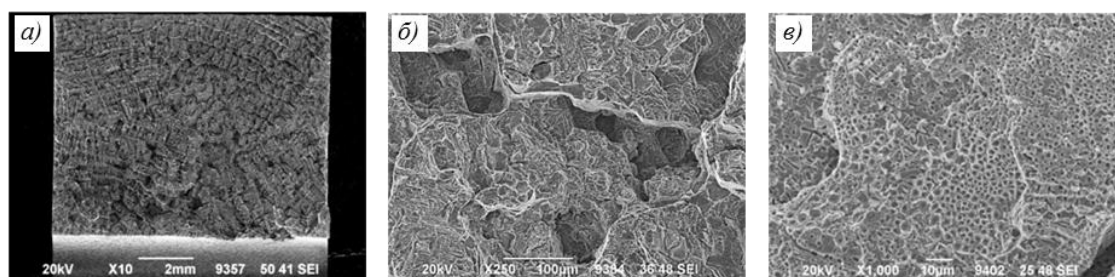


Рис. 5. Строение излома образца при сочетании материалов «отливка + отливка»:

а – общий вид излома; б – рыхлое строение излома, междендритная пористость; в – внутризеренное разрушение, мелкоячеистый рельеф

Проведен фрактографический анализ изломов сварных соединений, полученных после определения статического угла изгиба [18]. Показано, что разрушение происходит по структуре литого полуфабриката. Общий вид излома сварного соединения исследуемого одноименного сочетания материалов показан на рис. 5, *а*. Излом имеет рыхлое строение, присутствует междендритная пористость (рис. 5, *б*). Разрушение произошло по телу и ветвям дендритов с формированием мелкоямочного рельефа (рис. 5, *в*).

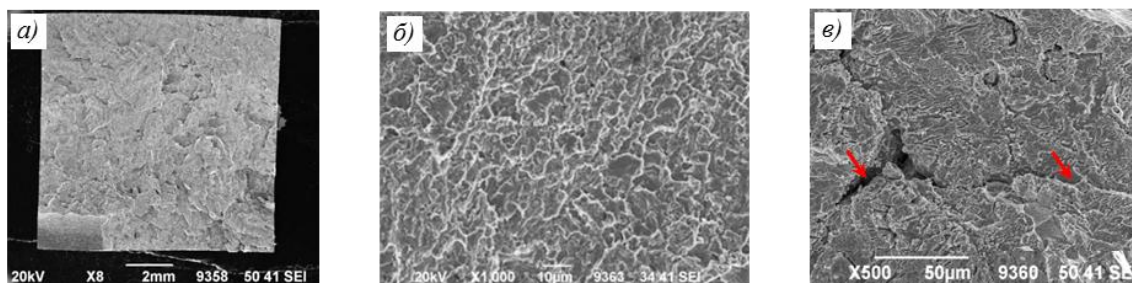


Рис. 6. Строение излома образца при сочетании материалов «отливка + деформируемый полуфабрикат»:

а – общий вид излома; *б* – внутризеренное разрушение, мелкоямочный рельеф; *в* – усадочная пористость (показана стрелками)

Общий вид излома сварного соединения литого и деформируемого полуфабрикатов приведен на рис. 6, *а*. Разрушение началось с вершины U-образного надреза и развивалось как по плоскости сварного шва, так и по материалу околошовной зоны. Поверхность излома имеет внутризеренный характер с формированием мелкоямочного рельефа (рис. 6, *б*). Фиксируется наличие усадочной пористости (рис. 6, *в*). В изломах образцов исследуемых сочетаний присутствуют поры, но в однородном сочетании пор значительно больше и они крупнее.

Заключения

Исследована свариваемость жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 ротационной сваркой трением в однородных и разнородных сочетаниях полуфабрикатов. Сварные соединения получены в термически упрочненном состоянии. После проведения сварки соединения термически упрочняли.

Выбор диапазона обрабатываемых параметров производили на основании полученных значений продольной осадки и статического угла изгиба. На выбранном режиме изготовлены сварные соединения для определения комплекса механических характеристик и проведения структурных исследований.

При определении механических характеристик установлено, что используемые режимы сварки позволяют получать сварные соединения с уровнем прочности не менее 0,9 от уровня прочности основного материала. Структурные исследования показали отсутствие дефектов в сварном шве и околошовной зоне, что позволило охарактеризовать околошовную зону и зону сварного шва с точки зрения зеренной структуры, микротвердости, вязкости изломов.

Библиографический список

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 высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP4. С. 13–19.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
4. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
5. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
6. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Антонова О.С. Малоцикловая усталость при заданной деформации жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-1-1.
7. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
8. 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.
9. Сорокин Л.И. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2005. №7. С. 29–33.
10. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч. 2 // Сварочное производство. 2004. №9. С. 3–7.
11. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
12. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
13. Вилль В.И. Сварка металлов в твердой фазе. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
14. Сварка трением: справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 235 с.
15. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Саморуков М.Л., Гриднев Ю.М., Жегина И.П., Котельникова Л.В. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА-25 и ЭП975 // Сварочное производство. 2010. №5. С. 28–33.
16. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
17. Степанов А.В. Методы рентгеновского неразрушающего контроля в производстве авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 28–32.
18. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Григоренко В.Б., Зимина З.Н. Особенности разрушения деформируемых никелевых сплавов и сталей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 455–465.