

УДК 621.791.14

В.И. Лукин¹, С.В. Овсепян¹, В.Г. Ковальчук¹, М.Л. Саморуков¹**ОСОБЕННОСТИ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ
ВЫСОКОЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ175**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-1-1

Проведены исследования влияния технологических схем сварки (последовательности операций сварки и термической обработки) на комплекс механических свойств и структуру сварных соединений. Исследовано влияние технологического нагрева длительно-стью 300 ч при температуре 650°C на структуру и прочностные характеристики сварных соединений. Определены технологические параметры и последовательность сварки и термической обработки (технологическая схема), позволяющие получать требуемый уровень прочностных характеристик сварных соединений.

Ключевые слова: сварка трением, параметры режимов сварки, статический изгиб, кратковременная прочность, длительная прочность, ударная вязкость, структура.

The research of technological schemes (the sequence of welding and heat treatment operations) influence on the mechanical properties and the structure is carried out. The influence of technological heatings with a 300 hours duration and 650°C temperature on the weld's structure and mechanical properties is studied. Friction welding parameters and optimal sequence of welding and heat treatment that allow getting the most high mechanical properties are determined.

Keywords: friction welding, welding regime parameters, static bend, short-term durability, long-term durability, impact strength, structure.

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

Жаропрочные никелевые сплавы используются при производстве широкой номенклатуры деталей и узлов газотурбинных двигателей, обеспечивая возможность их длительной работы под нагрузкой при повышенных температурах. С учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденных указом Президента РФ №899 от 7 июля 2011 г., высокожаропрочные никелевые сплавы входят в список приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий. Эти материалы с высокими служебными характеристиками необходимы для создания изделий авиационной техники нового поколения [1–8].

При создании современных конкурентоспособных изделий отечественного двигателестроения помимо решения главных задач по повышению КПД и ресурса работы современных двигателей не менее важным является снижение трудоемкости, повышение КИМ при изготовлении сложных сварных конструкций [9].

Для соединения различных деталей, изготовления узлов и конструкций используются методы сварки плавлением. Свариваемость никелевых сплавов в большой степени определяется их склонностью к образованию горячих трещин при сварке и зависит от количества упрочняющей γ' -фазы. Хорошо свариваемые сплавы, не склонные к

образованию горячих трещин, содержат не более 10–12% γ' -фазы. Удовлетворительно свариваемые сплавы, обладающие умеренной склонностью к образованию горячих трещин, – от 13 до 20% γ' -фазы. Трудносвариваемые жаропрочные никелевые сплавы содержат 20–25% γ' -фазы. Высокая склонность к образованию трещин определяется дополнительно высокой скоростью выделения упрочняющей фазы [10, 11]. Новый высокожаропрочный деформируемый сплав на никелевой основе марки ВЖ175 содержит не менее 50% упрочняющей γ' -фазы и является несвариваемым методами сварки плавлением [12, 13].

Сварка трением – как технологический процесс получения неразъемных соединений в твердой фазе – выполняется за счет тепла, выделяемого при трении, без объемного плавления в зоне сварки и может быть использована при соединении трудносвариваемых, разнородных и разноименных материалов [14].

Применение 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 дуговыми или лучевыми методами сварки;
- отсутствие в процессе сварки выделений паров металлов и ультрафиолетового излучения;
- отсутствие необходимости применения присадочного материала и защитной атмосферы (инертные газы, вакуум);
- низкий уровень остаточных напряжений;
- возможность автоматизации процесса сварки.

За рубежом данный вид сварки широко применяется при изготовлении деталей типа вал–вал, вал–диск, диск–диск для узлов двигателей. Предельные габариты свариваемых деталей определяются максимальным усилием установки, конструкцией оснастки и соединяемым материалом. Это сужает как номенклатуру выпускаемых изделий, так и сферу применения этого метода [15].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.7. «Ресурсосберегающие технологии сварки в твердой фазе трудносвариваемых конструкционных и функциональных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Работа велась с новым высокожаропрочным деформируемым дисперсионно-твердеющим сплавом системы Ni–Cr–Co марки ВЖ175, упрочняемым интерметаллидной γ' -фазой сложного состава и карбидами. Сплав предназначен для изготовления дисков и других деталей ГТД и ГТУ, работающих при температурах до 750°C.

В работе использованы следующие методы исследований: определение статического угла изгиба при 20°C, предела кратковременной прочности при растяжении при комнатной и рабочей температурах, предела длительной прочности на базе 100 ч при рабочей температуре; фрактографический анализ; металлографические исследования структур сварных соединений. Рабочей температурой принята 650°C. Определение свойств сварных соединений проводили по ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

Результаты

В работе рассматривали следующие варианты сочетаний сварки и термической обработки:

- 1 – закалка+сварка+старение;
- 2 – закалка+старение+сварка;
- 3 – закалка+сварка+закалка+старение.

Основными параметрами режима сварки трением являются: давление нагрева P_n , давление проковки $P_{пр}$, время нагрева t_n , время проковки $t_{пр}$. Выбор параметров сварки цилиндрических заготовок из сплава ВЖ175 диаметром 18 мм осуществляли на установке ПСТ50-2М. Величину параметров выбирали согласно предварительным исследованиям по сварке трением деформируемых жаропрочных никелевых сплавов [16]. Значения продольной осадки обеспечивались в пределах 3,1–7,0 мм.

Испытания на статический изгиб позволили определить диапазон оптимальных параметров, на которых получены партии образцов для исследований.

Испытания на растяжение при температурах 20 и 650°C показали, что сварные соединения, выполненные по технологическим схемам 1 и 3 (табл. 1), имеют высокие средние значения кратковременной прочности. Коэффициенты ослабления сваркой ($K = \sigma_{св.с} / \sigma_{в.}$) при этом больше 0,95. Сварка образцов в термоупрочненном состоянии обеспечивает значения кратковременной прочности при температурах 20 и 650°C соответственно 0,75 и 0,83 от прочности основного металла.

Таблица 1

Механические свойства* сварных соединений сплава ВЖ175

Вариант (технологическая схема)	$\sigma_{в.}^{20^\circ}$, МПа	K^{**}	$\sigma_{в.}^{650^\circ}$, МПа	K^{**}	$\sigma_{100}^{650^\circ}$, МПа	K^{**}	KCU^{20° , Дж/см ²
1 (закалка+сварка+старение)	1530–1570 1550	0,95	1440–1500 1470	0,94	940	0,88	18–29 23
2 (закалка+старение+сварка)	1225–1235 1230	0,75	1290–1300 1295	0,83	640	0,60	26–30 28
3 (закалка+сварка+ +закалка+старение)	1550–1570 1560	0,96	1490–1530 1510	0,97	850	0,80	23–29 26

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

** Коэффициент ослабления сваркой $K = \sigma_{св.с} / \sigma_{в.}$.

Максимальные значения длительной прочности $\sigma_{100}^{650^\circ} = 940$ МПа (0,88 от прочности основного металла) имеют сварные соединения, выполненные по варианту 1. Минимальный предел длительной прочности $\sigma_{100}^{650^\circ} = 640$ МПа (0,60 от прочности основного металла) имеют сварные соединения, выполненные по варианту 2.

Испытания сварных образцов на ударный изгиб при температуре 20°C показали значения ударной вязкости в 1,5–2 раза ниже ($KCU^{20^\circ} = 18–30$ Дж/см²), чем для образцов основного материала, вырезанных из штамповки. Изломы образцов имели малопластичное строение.

Исследована микроструктура сплава и сварных соединений, выполненных по вариантам 1 и 2. Структура сплава в термически упрочненном состоянии мелкозернистая – с 7–8 баллом зерна (рис. 1, а). При исследовании сварных соединений в зоне, примыкающей к сварному шву, прослеживаются следы деформационного воздействия (рис. 1, а–в). Ширина зоны шва узкая и составляет 175–250 мкм, околошовной зоны: 200–300 мкм (рис. 1, г, д). При исследовании структуры сварных швов после травления выявлено, что размер зерна в 2–2,5 раза мельче, чем в основном материале. Это является следствием термомодеформационного измельчения структуры в процессе сварки.

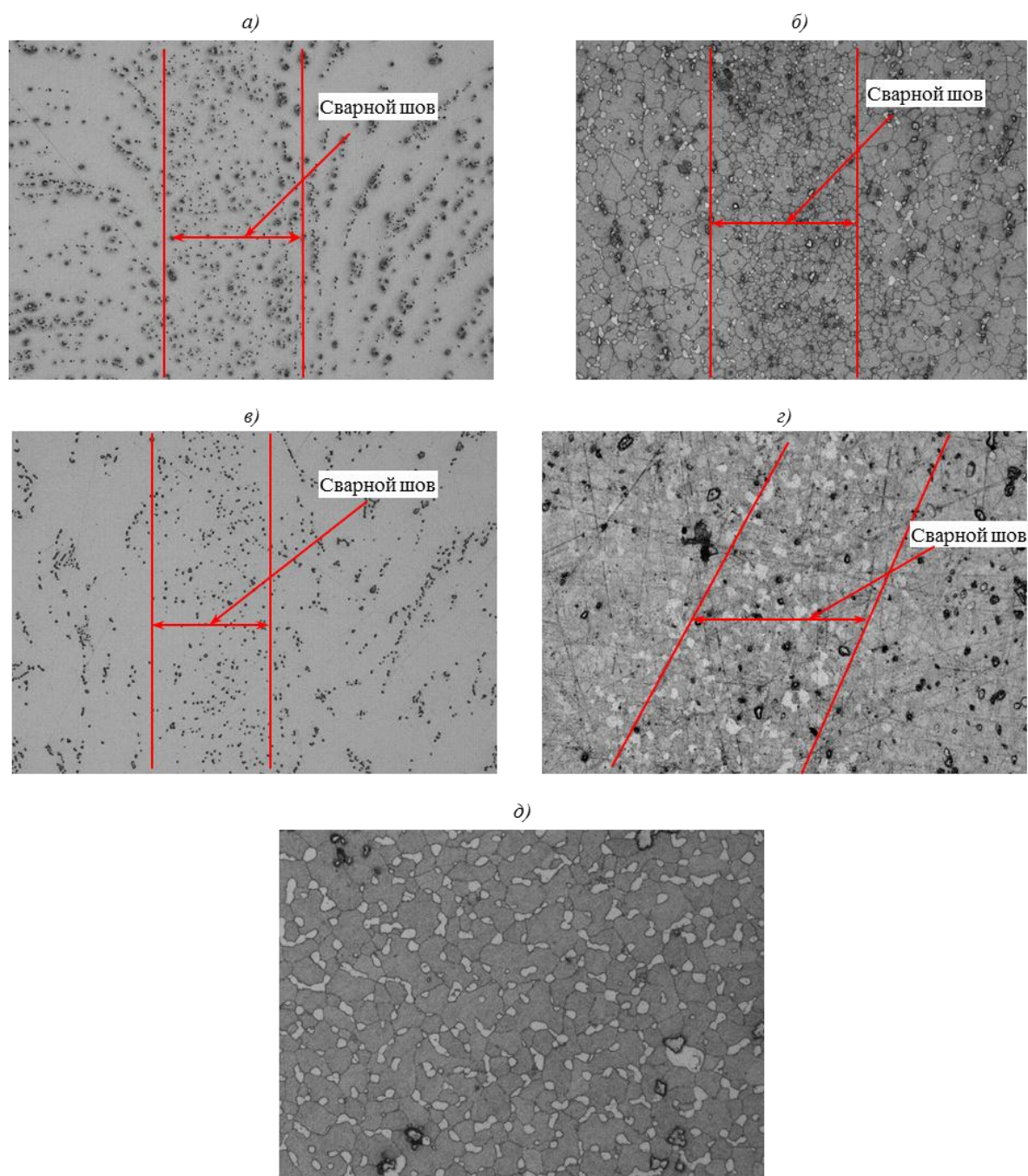


Рис. 1. Микроструктура сплава ВЖ175 и сварных соединений ($\times 200$):
 а, б – вариант 1 без травления и после травления; в, г – вариант 2 без травления и после травления; д – сплав ВЖ175 (закалка+старение)

Микроструктура сварных образцов исследована также методом растровой электронной микроскопии с увеличением – до $\times 10000$. Вдали от шва микроструктура характерна для данного сплава (рис. 2, а) и представляет собой зерна γ -твердого раствора, внутри которых наблюдаются мелкодисперсные выделения вторичной γ' -фазы; по границам зерен расположены крупные частицы первичной γ' -фазы. Границы зерен упрочнены частицами карбидов и зернограничной γ' -фазой. Размер зерен ~ 20 мкм (7–8 балл) [17].

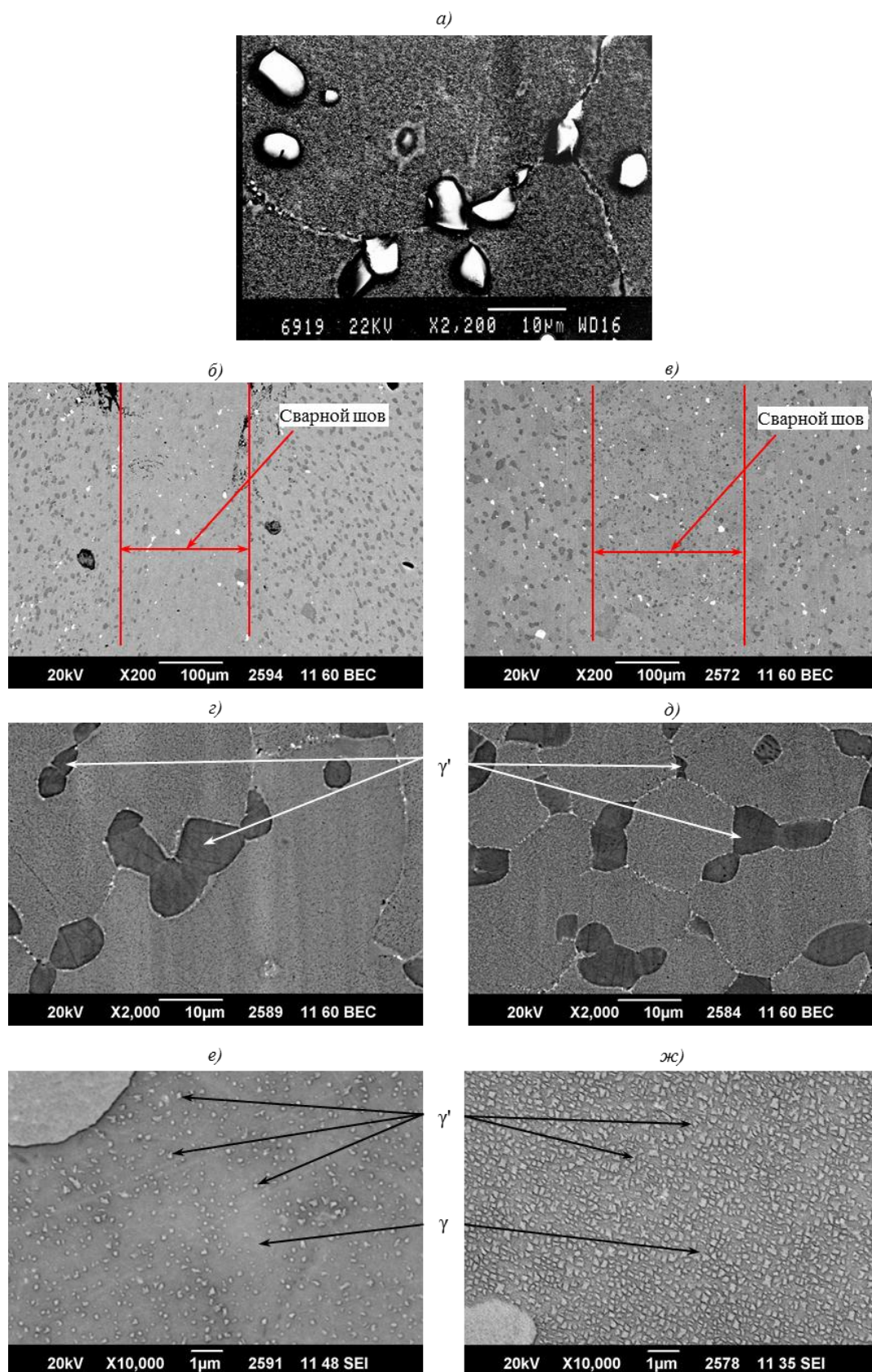


Рис. 2. Микростроение сплава ВЖ175 (а) и сварных соединений:

б, в – структура сварного шва; з, д – границы зерен около шва; е, жс – морфология частиц γ' -фазы в шве

В образцах, полученных по варианту 2 (рис. 2, б, г, е), в сварном шве наблюдается меньше выделений упрочняющих фаз, что обуславливает пониженные значения свойств сварных соединений – особенно длительной прочности. В околошовной зоне наблюдаются более крупные зерна, чем в основном материале вдали от шва. Границы зерен, также как в основном материале, упрочнены карбидами и частицами зернограничной γ' -фазы. В образце после сварки и последующего старения по стандартному режиму (вариант 1, рис. 2, в, д, ж) в сварном шве, околошовной зоне и в материале вдали от шва наблюдается практически одинаковая структура. Наблюдается различие в размере зерен: самые мелкие зерна – в сварном шве (~7 мкм, 10–11 балл), самые крупные – в околошовной зоне (7 балл). Имеет место большое количество выделений γ' -фазы в шве.

Фрактографические исследования сварных соединений проводили на образцах с близкими значениями ударной вязкости ($KCU^{20^\circ} \approx 28\text{--}30 \text{ Дж/см}^2$) [18]. Излом образца (вариант 1) имеет однородное волокнистое строение с равномерным распределением карбидов, участками с мелкоямочным рельефом между ними, а также редкими хрупкими фасетками (рис. 3, а). В изломах образцов варианта 2 наблюдаются вторичные трещины, часто связанные с выкрашиванием карбидов. Развитие разрушения происходит преимущественно путем образования различного размера и пластичности ямочного рельефа и фасеток скола (рис. 3, б). В изломе образца варианта 3, термически обработанного после сварки, пластичность ямочного рельефа выше, чем в образцах, термически обработанных до сварки, фасетки значительно крупнее (рис. 3, в).

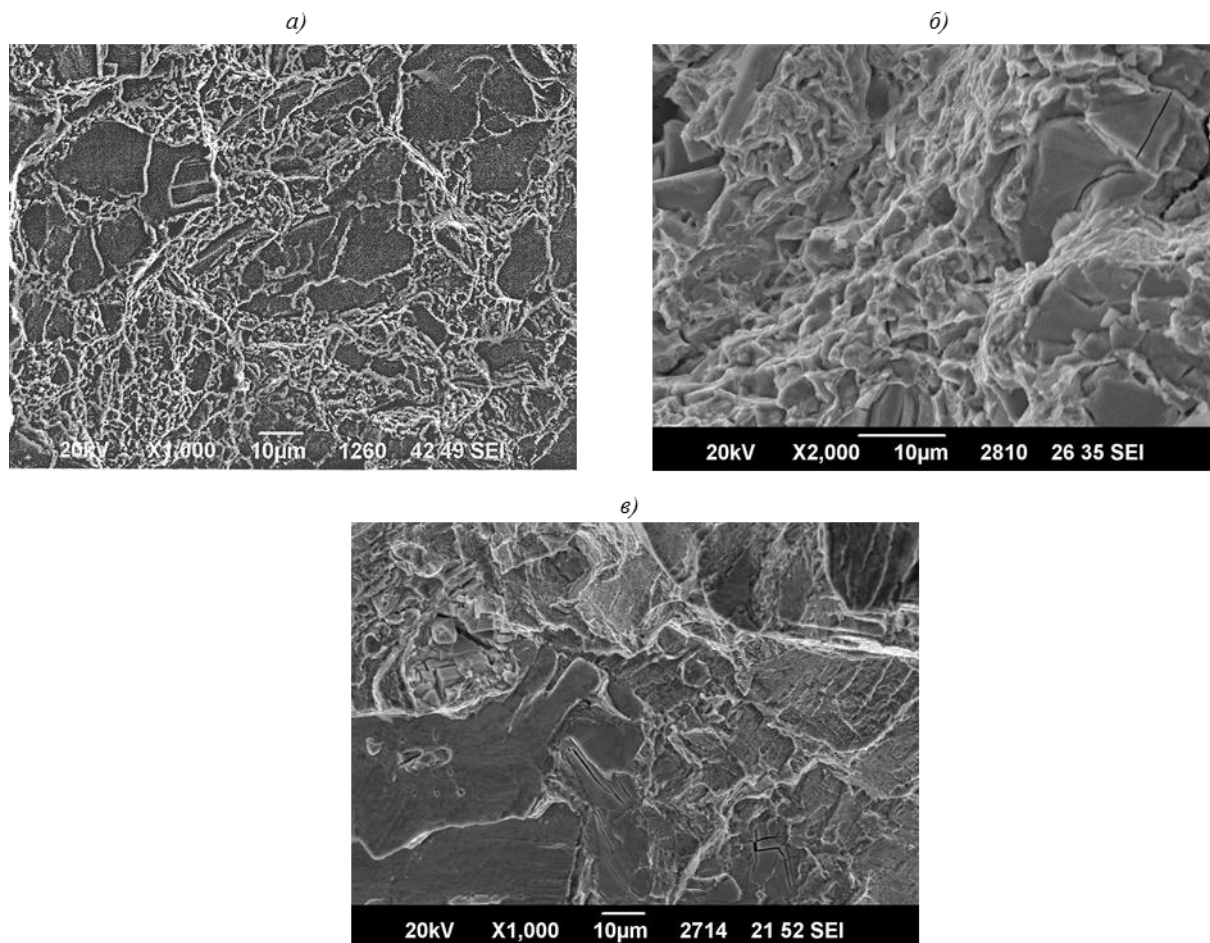


Рис. 3. Фрактография изломов сварных соединений сплава ВЖ175

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно констатировать, что варианты получения сварных соединений 1 и 3 обеспечивают наиболее высокие значения прочностных характеристик.

Для исследования влияния длительных выдержек (300 ч) при температуре 650°C на свойства сварных соединений проведена сварка трением по варианту 1 заготовок из штамповок дисков. Анализ механических испытаний показал, что кратковременная прочность сварных соединений без выдержки составляет 0,93–0,94 от прочности основного металла, после выдержки значения прочности ниже и составляют 0,86–0,88 от прочности сплава (табл. 2). Разрушения образцов происходили в основном по сварной зоне.

Таблица 2

Механические свойства* сварных соединений сплава ВЖ175

Состояние сварного соединения	$\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	K^{**}	$\sigma_B^{650^\circ}$, МПа	K^{**}
Сварка+старение	<u>1440–1620</u> 1530	0,94	<u>1420–1500</u> 1460	0,93
То же+отжиг в течение 300 ч при 650°C	<u>1430–1450</u> 1440	0,88	<u>1345–1355</u> 1350	0,86

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

** Коэффициент ослабления сваркой $K = \sigma_{B,св} / \sigma_B$.

Методом растровой электронной микроскопии исследована микроструктура сварных образцов из сплава ВЖ175, выполненных по вариантам 1 и 2, а также при дополнительной выдержке при температуре 650°C в течение 300 ч. Установлено, что после выдержки структура сварного шва практически не изменяется.

Определены размеры зерен в сварных образцах из сплава ВЖ175 после выдержки (в шве и вдали от шва) по ГОСТ 5639–82. Показано, что в основном материале размер зерен соответствует 7–8 баллу, в шве: 10–11 баллу. Выдержка при температуре 650°C в течение 300 ч не оказывает влияния на размер зерен в материале сварного соединения.

Исследовано влияние технологических параметров ротационной сварки трением на микротвердость структур сварных швов. Получены соединения в диапазоне давлений нагрева 20–50 ат (2–5 МПа), времени нагрева 5–10 с. Исследованы зоны сварного сечения:

- зона 0R – в точке пересечения оси симметрии заготовки с плоскостью стыка;
- зона 0,5R – на плоскости стыка и удаления от точки 0R на 0,5R;
- зона 0,95R – на плоскости стыка и удаления от точки 0R на 0,95R.

Исследования показали, что с увеличением давления нагрева уровень микротвердости в исследуемых зонах возрастает. Увеличение продолжительности нагрева также приводит к увеличению значений микротвердости. Наибольшие значения микротвердости характерны для зон 0,5R и 0,95R. В зоне 0R микротвердость не превышает 450 HV во всем исследуемом диапазоне параметров, тогда как в зоне 0,5R микротвердость составляет 500 HV в диапазоне давлений нагрева 30–50 ат (3–5 МПа) и продолжительности нагрева 7–10 с (рис. 4).

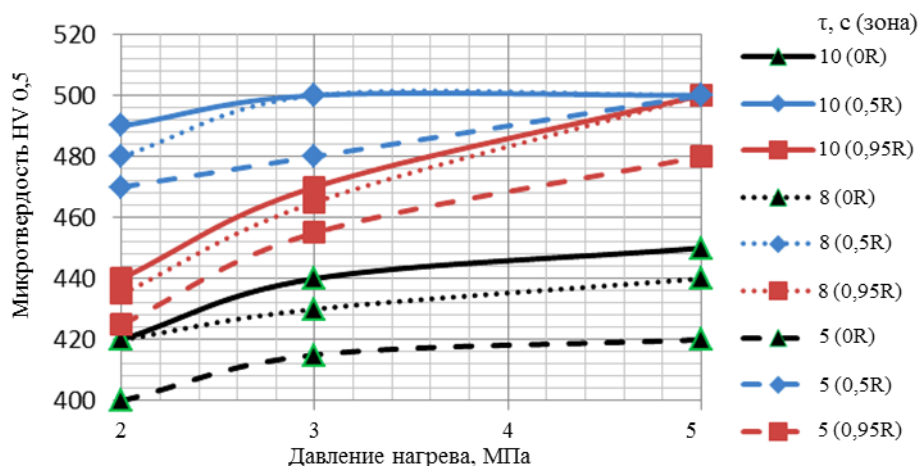


Рис. 4. Влияние параметров ротационной сварки трением (давление и продолжительность нагрева τ) на микротвердость (HV 0,5) в сварном шве

Исследование показало, что протяженность зоны с повышенными значениями микротвердости в полученных образцах составляет $\sim 2,0$ мм и с уменьшением времени на этапе нагрева снижается до 0,5 мм. В зонах 0R и 0,95R соединений, выполненных с продолжительностью нагрева 1 с и давлением нагрева 50 ат (5 МПа), значение микротвердости не отличается от аналогичного значения для основного материала и составляет 420 HV. С увеличением времени нагрева до 10 с микротвердость в этих зонах повышается до 450–500 HV, а протяженность зон с повышенными значениями микротвердости увеличивается до 2,0 мм (рис. 5).

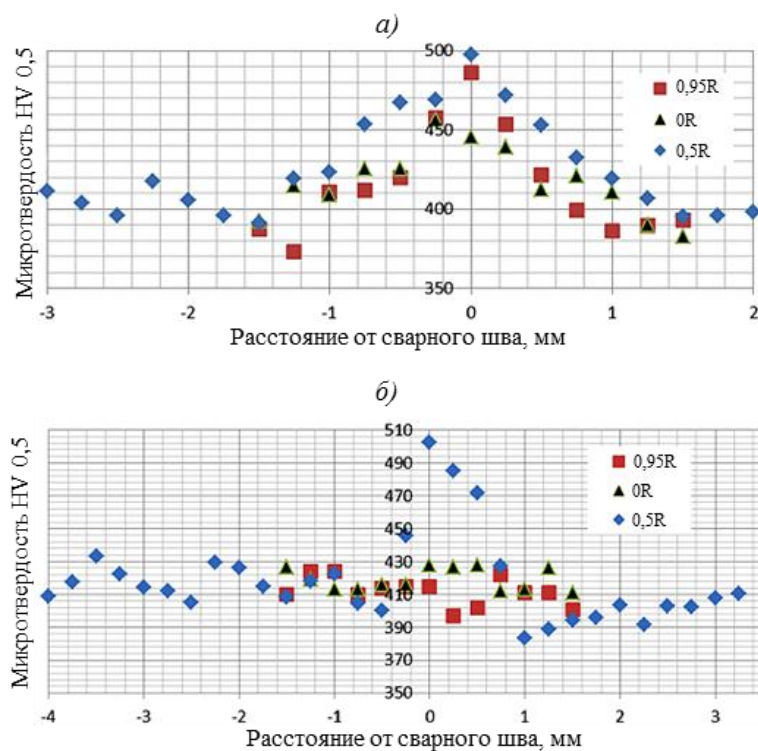


Рис. 5. Изменение микротвердости по зонам сварных соединений, выполненных при давлении 50 ат (5 МПа) в течение 10 (а) и 1 с (б)

Проведены испытания по определению малоциклового усталости при осевой нагрузке сварных соединений сплава ВЖ175, полученных на варианте 1 (по технологической схеме закалка+сварка+старение), на базе $N=10^4$ циклов при температуре 20°C. Испытания показали, что при напряжении $\sigma_0=1255$ МПа, что составляет 0,92 от значений прочности основного материала, образцы сварных соединений не разрушаются более 10^4 циклов.

Обсуждение и заключения

Проведенные исследования показали, что варианты получения сварных соединений, предполагающие термическое упрочнение после сварки, позволяют получать значения кратковременной прочности, превышающие 0,95 от прочности основного материала. При сварке образцов из сплава ВЖ175 в термоупрочненном состоянии без последующей термической обработки значения кратковременной прочности снижаются до уровня 0,75–0,83 от прочности основного металла. Похожие результаты получены при определении значений длительной прочности.

Изменение механических характеристик сварных соединений можно объяснить изменением количества упрочняющей γ' -фазы в шве и околошовной зоне. Так, в сварном шве образцов, полученных по варианту 2, наблюдается снижение количества выделений упрочняющих фаз, что обуславливает снижение механических характеристик. В образцах, полученных по вариантам 1 и 3, подразумевающим упрочняющую термическую обработку после сварки, в сварном шве, околошовной зоне и в материале вдали от шва наблюдаются практически одинаковая структура и выделения частиц γ' -фазы.

Анализ результатов применения длительной (300 ч) выдержки при температуре (650°C) показал, что происходит незначительное ослабление кратковременной прочности сварных соединений. При этом выдержка не влияет на локальный химический состав и структуру зон сварных соединений.

На основании проведенного комплекса исследований можно констатировать, что наиболее высокие прочностные характеристики обеспечиваются при сварке с последующей упрочняющей термической обработкой. Решение о целесообразности проведения после сварки полной термической обработки или старения может быть принято на основании конструктивных особенностей конкретной детали или узла.

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. №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.-технич. 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., Антонов О.С. Малоцикловая усталость при заданной деформации жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. 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. и др. 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. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Григоренко В.Б., Зимина З.Н. Особенности разрушения деформированных никелевых сплавов и сталей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 455–465.
18. Степанов А.В. Методы рентгеновского неразрушающего контроля в производстве авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 28–32.