

УДК 621.791.4
DOI: 10.12737/18078

В.И. Лукин, д.т.н.,
О.Г. Оспенникова, к.т.н.,
В.Г. Ковальчук, инженер
(ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов», г. Москва, ул. Радио, 17),
С.Х. Даутов, инженер, **А.В. Супов**, инженер
(ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение»,
Башкортостан, г. Уфа, ул. Ферина, 2),
М.Л. Саморуков, инженер
(ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов», г. Москва, ул. Радио, 17)
E-mail: veld_lab@viam.ru

Метод линейной сварки трением сочетания жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР с ЭП975-ИД

Рассмотрена свариваемость методом линейной сварки трением сочетания жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР и ЭП975-ИД. Выявлены оптимальные параметры линейной сварки трением. Проведен рентгенографический контроль сварных соединений, исследованы механические свойства при изгибе и растяжении, исследована структура сварных соединений. Установлен характер разрушения образцов. Проведен качественный и количественный микрорентгеноспектральный анализ и исследована микротвердость образца сварного соединения.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый деформируемый сплав; жаропрочный никелевый интерметаллидный литейный сплав; ВКНА; ЭП975; линейная сварка трением.

V.I. Lukin, D.Eng.,
O.G. Ospennikova, Can.Eng.,
V.G. Kovalchuk, Engineer
(FSUP "All-Russian Research Institute of Aircraft Materials" Moscow, Radio Str., 17),
S.Kh. Dautov, Engineer, **A.V. Supov**, Engineer
("Engine Works Co" of Ufa, Bashkortostan, Ufa, Ferin Str., 2),
M.L. Samorukov, Engineer
(FSUP "All-Russian Research Institute of Aircraft Materials" Moscow, Radio Str., 17).

Method of seam friction welding for composition of high-temperature nickel alloys (VKNA-1VP with ЭП975-ИД)

The bondability by the method of seam friction welding of the combinations of heat resistant nickel VCNA-1VP alloys and EP975-ID is considered. The optimum parameters of seam friction welding are determined. The radiographic control of welds is carried out, The stress-strain properties at a bend and stretching are analyzed, a weld structure is investigated. The character of sample destructions is determined. The qualitative and quantitative micro-X-ray analysis is carried out and sample micro-hardness of a weld is examined.

Keywords: heat resistant nickel deformable alloy; heat resistant nickel inter-metallide casting alloy; VCNA; EP975; seam welding by friction.

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 в силу того, что имеют ключевое значение для достижения требуемых эксплуатационных характеристик перспективных образцов газотурбинных двигателей [1 – 2].

Условия работы рабочих колес турбины газотурбинных двигателей отличаются высоким уровнем термомеханического нагружения. Уровень нагрузок на рабочих колесах турбины является одной из характеристик, определяющих мощность двигателя. Высокие эксплуатационные характеристики и долговечность конструкции колеса турбины обеспечиваются различными методами изготовления рабочего колеса и применяемыми материалами.

Один из способов изготовления конструкций типа «блиск» и «блинг» – фрезерование детали из цельного полуфабриката. В этом случае диск и лопатки изготавливаются из одного сплава. Выбор материала заготовки обусловлен высокой рабочей температурой, воспринимаемой конструкцией. Таким образом, происходит нерациональное использование материала, так как большая часть конструкции работает при более низких температурах, чем те, на которые рассчитан используемый материал.

Альтернативой фрезерованию детали из цельного полуфабриката является линейная сварка трением (ЛСТ) – метод сварки в твердой фазе, когда соединение свариваемых заготовок происходит по активированным поверхностям. Активация происходит под действием сил трения, образующихся при относительном возвратно-поступательном линейном перемещении свариваемых заготовок и под действием осевых сжимающих сил [5–10].

Применение этой технологии для изготовления рабочего колеса турбины позволяет использовать оптимальные материалы для диска и лопаток, отвечающие условиям работы элементов сварного узла. В конструкции рабочего колеса турбины для изготовления диска используют высокожаропрочные дисковые сплавы с повышенной надежностью и ресурсом с рабочими температурами на ободке диска до 850 °С, а для лопаток – жаропрочные никелевые сплавы с рабочими температурами

свыше 1150 °С.

Применение технологии ЛСТ для получения рабочих колес турбины позволяет значительно снизить вес «блиска» за счет оптимизации геометрии замковой части диска. Одной из задач при создании сварного ротора является обеспечение надежного неразъемного соединения литых лопаток и деформируемого диска. Существуют различные способы создания неразъемного соединения диск–лопатка: электронно–лучевая, вакуумная пайка. Однако современные внедряемые в промышленность высокожаропрочные никелевые сплавы являются трудносвариваемыми методами сварки плавлением, склонными к образованию горячих трещин. Перспективной группой сплавов для изготовления термически нагруженных деталей двигателей для авиационной техники являются интерметаллидные сплавы, обладающие лучшими, по сравнению с обычными сплавами, рабочими характеристиками [3–4].

Жаропрочный литейный никелевый интерметаллидный сплав ВКНА-1ВР является перспективным материалом для изготовления деталей горячего тракта ГТД, работающих длительно в интервале температур 900...1250 °С. Отличается от обычных никелевых сплавов, упрочненных γ' -фазой тем, что γ' -фаза является основой сплава. Содержание ее в сплаве составляет 80...90 %, остальное γ -твердый раствор. Структура сплава ВКНА-1ВР термостабильна до 1200 °С и не требует термообработки. Плотность сплава ВКНА-1ВР (7,9 г/см³) ниже, чем у обычных литейных жаропрочных никелевых сплавов (8,4 ...8,8 г/см³) за счет более низкого содержания тяжелых элементов (W, Mo). Это снижает динамические нагрузки на соединение диск–лопатка и увеличивает срок службы соединения. Поэтому, применение такого сплава для рабочих и сопловых лопаток в изделиях ГТД является перспективным, а задача соединения интерметаллидного лопаточного сплава ВКНА-1ВР с дисковыми сплавами становится актуальной.

Сплав ЭП975 – высокожаропрочный деформируемый, работающий при температуре 850...975 °С. Предназначен для изготовления дисков турбин современных и перспективных ГТД.

В настоящей работе показаны исследования качества сварных соединений сочетания сплавов ВКНА-1ВР (материал лопатки) и ЭП975-ИД (материал диска), полученных ЛСТ.

Методы проведения исследований. Испытания полученных сварных образцов на статический угол изгиба и ударный изгиб проведены по ГОСТ 6996–66. Испытания на определение кратковременного предела прочности при температуре +20 °С проведены по ГОСТ 1497-84. Структура сварных соединений исследована на оптическом микроскопе OlympusGX51 по ГОСТ 22838. Микротвердость по зонам сварных соединений измерена на микротвердомере Durascan по ГОСТ 9450-76. Микрорентгеноспектральный анализ зон сварных соединений проводился на аппарате «Суперпроб-733» с использованием энергодисперсионного микроанализатора IncaEnergy. Фрактографический анализ проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV.

В работе исследованы режимы ЛСТ-сочетания сплавов ВКНА-1ВР и ЭП975-ИД. Сварку образцов сплава ЭП975-ИД осуществляли в закаленном состоянии, сплава ВКНА-1ВР – после отжига. Размеры образцов – 13x26x35 мм с рабочей поверхностью 13x26 мм. Работы по ЛСТ проводили на установке АСВМДС (Франция), установленной на участке предприятия ОАО «УМПО». Основными параметрами процесса линейной сварки трением являются: сила трения P ; сила проковки $P_{пр}$; время разогрева t ; время проковки $t_{пр}$; величина осадки h ; частота f и амплитуда A осцилляции. Параметры процесса подбирали экспериментально, изменяя в следующих интервалах: $P = 70...160$ кН; $P_{пр} = 90...180$ кН; $t = 5,55...12$ с; $A = 0,75...1,25$ мм (табл. 1). Были установлены постоянными параметры: время проковки – 10 с; общая осадка – 2 мм; частота осцилляции – 75 Гц.

Внешний вид сварных образцов, выполненных на опытных режимах, представлены на рис. 1 (см. обложку).

Из рис. 1 видно, что на режиме 3 при минимальных параметрах $P = 70$ кН; $P_{пр} = 90$ кН; $t = 5,55$ с имеет место минимальное количество грата. Несколько большее его количество наблюдается при сварке на режиме 2 ($P = 100$ кН; $P_{пр} = 120$ кН; $t = 5,85$ с). При дальнейшем повышении параметров P до 130, 160 кН и $P_{пр}$ до 150, 180 кН на режимах 4 и 5, соответственно, а также времени разогрева t до 11...12 с на режимах 6–10, количество грата значительно увеличивается. Наибольшее его количество на режиме 5 с максимальными параметрами P и $P_{пр}$.

Проведенный рентгенографический контроль сварных соединений, выполненных на

вышеуказанных режимах сварки, показал наличие несплошностей различной длины (от 14 до 26 мм) по краям всех сварных стыков в местах выхода грата. Минимальную длину несплошностей имеют образцы, сваренные на режимах 5 и 9.

Проведены испытания сварных соединений на статический изгиб (рис. 2, см. обложку) (табл. 2), кратковременную прочность и ударный изгиб (табл. 3) в состоянии после сварки без проведения упрочняющей термической обработки.

Установлено, что сварные образцы, выполненные на опытных режимах 2–10, при испытаниях на статический изгиб, имеют прочность $\sigma_{\text{визг}}^{+20} = 1240...1480$ МПа, углы изгиба $\alpha = 13...37^\circ$, удлинение $\delta_{\text{изг}} = 4,0...6,2$ мм. Наиболее высокие значения прочности при изгибе имеют образцы режимов 3, 4, 5, 10. Однако образцы режима 5 имеют минимальные углы изгиба – 13° и прогиб до разрушения – 3,5 мм.

Прочность при растяжении образцов, выполненных на режимах 2–10, составляет $\sigma_{\text{в}}^{+20} = 600...700$ МПа, что соответствует прочности сплава ВКНА-1ВР, по которому и происходят разрушения при испытаниях. Ударная вязкость образцов, $KCU^{+20} = 14...21$ Дж/см². Наиболее высокие значения прочности имеют образцы режимов 4, 5. Прочность образцов режима 5 имеет близкие значения. Разброс значений прочности образцов режима 4 составляет 100 МПа.

Проведены металлографические исследования микрошлифов сварных соединений сочетания ВКНА-1ВР + ЭП975-ИД (рис. 3). На рис. 3, а видна четкая граница между свариваемыми материалами. В области соединения со стороны литого сплава имеет место некоторое уплотнение дендритной структуры (на расстоянии около 15 мкм от стыка), со стороны деформированного сплава – измельчение структуры и деформация в направлении перемещения материала при сварке, измельчение плотности структурных выделений в матрице (на расстоянии около 20 мкм от стыка). Оплавление и дефекты в виде трещин и пор в центральной части стыков не обнаружены (рис. 3, б). Несплошность имеется в месте выхода грата (рис. 3, в).

Для определения микротвердости HV по зонам сварного соединения выбраны образцы, полученные на режимах 5 и 7. Выбор обусловлен высокими значениями кратковременной прочности и ударной вязкости образцов, полученных на этих режимах. Исследования

1. Технологические параметры линейной сварки трением сочетания сплавов ВКНА-1ВР + ЭП975-ИД

№ режима	Амплитуда осцилляции A , мм	Сила трения P , кН	Сила проковки $P_{пр}$, кН	Время загрева t , с
2	1,0	100	120	5,85
3		70	90	5,55
4		130	150	6,15
5		160	180	6,45
6	0,75	100	120	11,0...12,0
7			120	
8			120	
9			100	
10			140	

2. Результаты испытаний сварных соединений на статический изгиб

№ режима	№ образца	Прочность при изгибе $\sigma_{в}^{+20}$ изг., МПа	Удлинение при изгибе $\delta_{изг}$, мм	Прогиб при испытании на статический изгиб, α , °
2	(1; 2)	<u>1255...1350</u> 1300	<u>4,5...8,0</u> 6,2	<u>34...40</u> 37
3	(3; 4)	<u>1445...1460</u> 1450	<u>5,0...7,0</u> 6,0	<u>20...40</u> 30
4	(5; 6)	<u>1425...1530</u> 1480	<u>4,5...6,0</u> 5,2	<u>25...30</u> 27
5	(7; 8)	<u>1430...1495</u> 1460	<u>3,5...3,5</u> 3,5	<u>12...14</u> 13
6	(9; 10)	<u>1370...1390</u> 1380	<u>5,2...5,5</u> 5,3	<u>19...25</u> 22
7	(11; 12)	<u>1170...1400</u> 1285	<u>3,2...5,0</u> 4,1	<u>22...24</u> 23
8	(13; 14)	<u>1260...1405</u> 1330	<u>4,8...6,0</u> 5,4	<u>20...27</u> 23
9	(15; 16)	<u>1210...1265</u> 1240	<u>4,0...7,0</u> 5,5	<u>29...30</u> 29
10	(17; 18)	<u>1450...1470</u> 1460	<u>5,0...6,0</u> 5,5	<u>22...25</u> 23

3. Механические свойства сварных соединений

№ режима	Прочность $\sigma_{в}^{+20}$, МПа	Ударная вязкость КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²	№ режима	Прочность $\sigma_{в}^{+20}$, МПа	Ударная вязкость КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²
2	<u>590...610</u> 600	<u>18...24</u> 21	7	<u>655...695</u> 675	<u>14...19</u> 16
3	<u>640...735</u> 675	<u>16...17</u> 16	8	<u>630...695</u> 665	<u>14...18</u> 16
4	<u>655...755</u> 700	<u>14...15</u> 14	9	<u>640...670</u> 655	<u>14...20</u> 16
5	<u>675...685</u> 680	<u>18...19</u> 18	10	<u>600...665</u> 630	<u>14...16</u> 15
6	<u>645...705</u> 665	<u>15...21</u> 18	–	–	–

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее значение.

4. Микротвердость HV по зонам сварного соединения

№ режима	Сплав ВКНА-1ВР				Шов	Сплав ЭП975-ИД			
	200	150	100	50		50	100	150	200
Расстояние от шва, мкм	200	150	100	50	0	50	100	150	200
5	385	398	405	413	415	409	413	426	420
7	380	382	384	393	411	410	410	407	415

показали плавное снижение микротвердости от деформированного сплава к литому (табл. 4), причем, на режиме 7 микротвердость в данном интервале измерений несколько ниже, чем на режиме 5, что, возможно, связано с более низкими силами нагрева и проковки P и $P_{пр}$ и более длительным временем нагрева t .

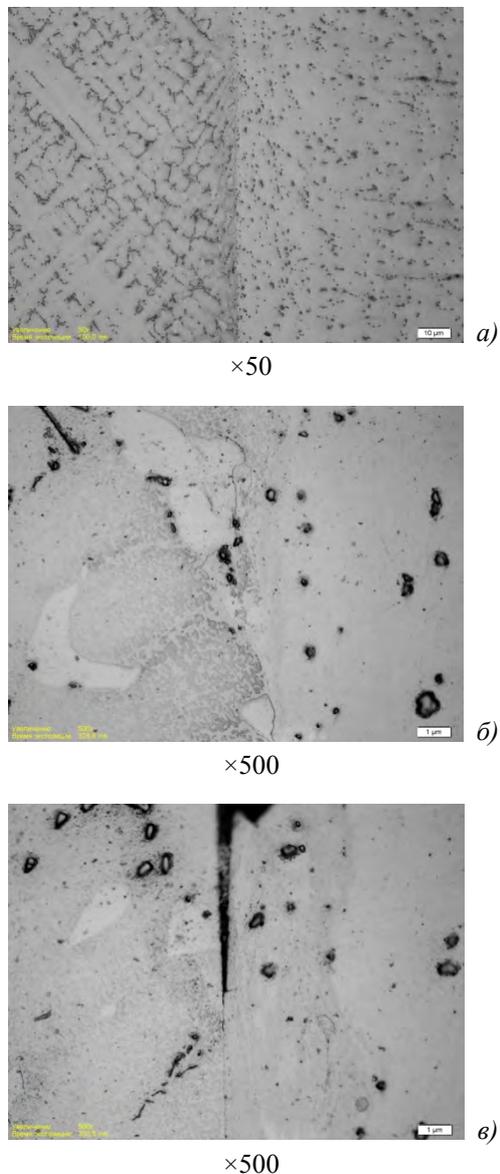


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения ВКНА-1ВР + ЭП975-ИД, выполненного на режиме 5

На основании проведенного фрактографического анализа образцов после испытаний на ударный изгиб установлено, что разрушение происходит по литому материалу (рис. 4). Изломы практически всех образцов однотипны и имеют дендритное строение (рис. 4, а). Разрушение происходит как по телу дендрита с образованием мелкочечного рельефа (рис. 4, б), так и по ветвям дендритов. В изломах присутствует большое количество крупных хруп-

ких выделений, по которым проходят вторичные трещины (рис. 4, в). В некоторых образцах обнаружены несоединения, характеризующиеся наличием цветов побежалости (рис. 4, г).

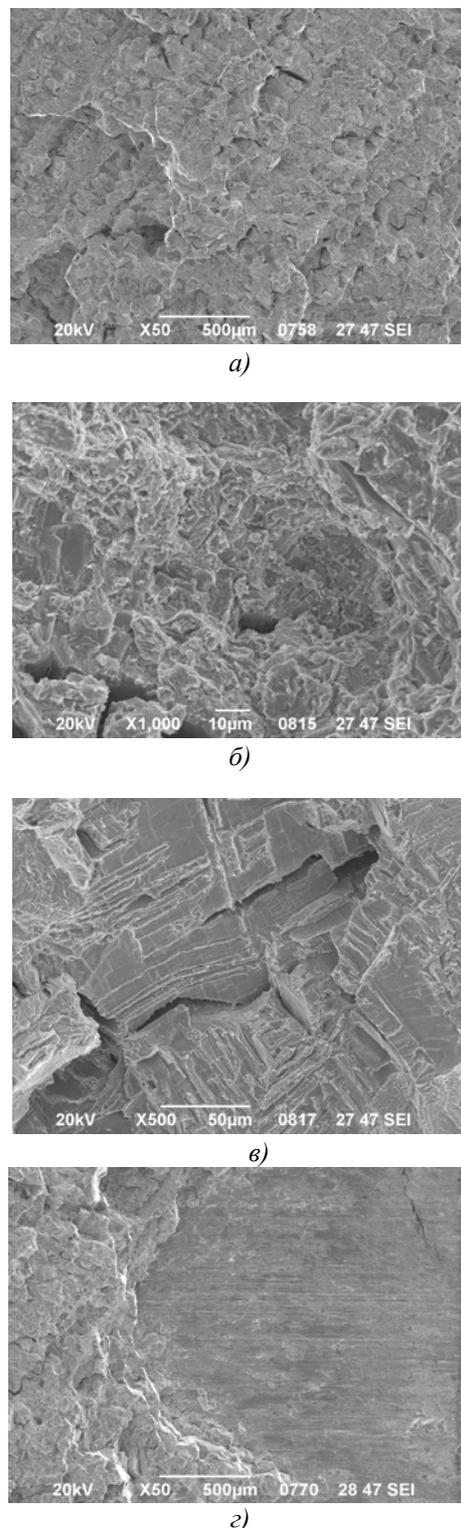


Рис. 4. Изломы сварных соединений, выполненных линейной сваркой трением:

а – дендритное строение излома; б – разрушение по телу дендрита, мелкочечный рельеф; в – хрупкие карбиды, вторичные трещины; г – несоединение

5. Локальный химический состав образцов

Место анализа		Содержание элементов, % масс.										Σ, %масс
		Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	Hf	W	
Зона сварного шва	+ 0 мкм	8,7	1,2	5,6	0,0	0,0	77,9	0,0	3,3		3,3	100,0
	+ 10 мкм	8,5	1,1	5,3			77,3		3,7		4,2	100,1
	+ 30 мкм	8,4	1,1	5,5			77,7		3,3		3,9	99,9
	+ 50 мкм	8,7	1,3	5,7			77,2		3,4		3,8	100,1
	Фаза 1	0,0	26,6	2,3			4,7		30,3	2,9	19,9	86,7
	Фаза 2	0,0	20,4	1,9			3,8		34,2	13,1	8,8	82,2
Вдали от сварного шва	Центр оси дендрита первого порядка	8,2	1,1	5,8	0,0	0,0	77,4	0,0	3,5		3,9	99,9
	Межосное пространство	8,7	1,5	5,2		0,0	79,4		3,4		1,8	100,0
	Эвтектическая γ'	10,2	2,2	3,2		0,0	80,5		2,2		1,7	100,0
	Фаза 1	0,7	5,0	2,0	0,0	0,0	11,2	1,1	9,6	57,1	3,6	91,1
	Фаза 2	0,0	26,6	1,4		0,0	2,9	0,0	31,8	6,1	13,9	82,7
Зона сварного шва	- 0 мкм	5,6	2,3	8,3	0,3	11,5	61,5	0,9	1,6		8,0	100,0
	- 10 мкм	4,8	2,3	8,8	0,6	15,3	55,6	1,4	1,6		9,6	100,0
	- 30 мкм	4,9	2,4	8,9	0,5	15,6	57,3	0,8	1,4		8,2	100,0
Вдали от сварного шва	Матрица	4,9	2,4	8,9	0,6	15,5	56,6	1,2	1,5		8,0	99,6
	Фаза 1	0,0	26,4	0,4	0,0	0,6	2,2	31,8	1,9		21,6	84,9

* - остальное от 100,0 % – кислород, ** - остальное от 100,0 % – углерод.

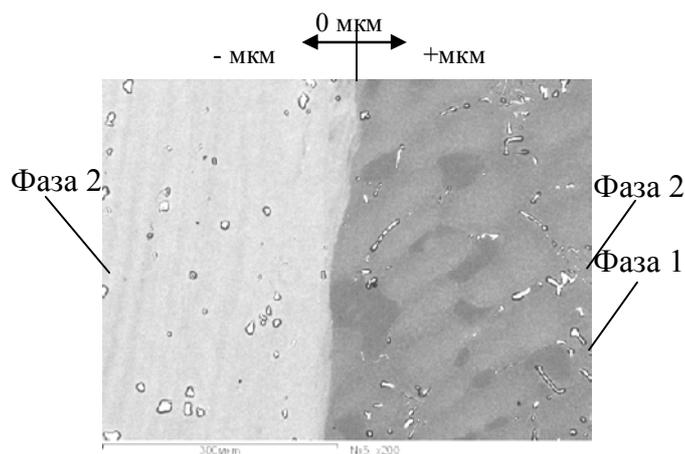


Рис. 5. Зоны исследования химического состава сварного соединения

Проведенный качественный и количественный микрорентгеноспектральный анализ соединения, выполненного на режиме 5, показал, что выравнивание химического состава

происходит на расстоянии 30...50 мкм от шва. Составы матриц шва, околошовной зоны и основного материала как со стороны литого, так и со стороны деформированного материала совпадают (табл. 5, рис. 5). В литом металле имеется эвтектическая фаза, в зоне соединения она отсутствует. В литом металле выявлены фазы двух типов: фаза 1 на основе гафния с небольшими количествами титана, никеля, молибдена, вольфрама; фаза 2 с большим содержанием титана, молибдена, с добавками гафния и вольфрама. В зоне шва со стороны литого сплава фаза 1 содержит большое количество титана, молибдена и вольфрама, мало гафния. Фаза 2 в зоне соединения близка по составу фазе 2 основного металла. В деформированном металле присутствует фаза с большим содержанием титана, ниобия и вольфрама. В зоне соединения фаза отсутствует.

Выводы

1. Экспериментально показана возможность соединения методом линейной сварки трением сочетания жаропрочного интерметаллидного никелевого сплава ВКНА-1ВР и жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭП975-ИД – сплавов являющихся не свариваемыми методами сварки плавлением.

2. Рентгенографический контроль сварных соединений показал наличие несплошностей различной длины по краям всех сварных стыков в местах выхода грата.

3. Исследования механических свойств сварных соединений показали, что максимальные значения прочности при изгибе ($\sigma_{B}^{+20}_{изг} = 1460...1480$ МПа) и растяжении ($\sigma_{B}^{+20} = 680...700$ МПа) обеспечиваются при технологических параметрах $P = 130...160$ кН; $P_{пр} = 150...180$ кН; $t = 6,15...6,45$ с; $A = 1,0$ мм.

4. На основании проведенного фрактографического анализа установлено, что разрушение всех образцов происходит по сплаву ВКНА-1ВР. В изломах присутствует большое количество крупных хрупких выделений, по которым проходят вторичные трещины.

5. Микрорентгеноспектральный анализ сварного соединения, выполненного на режиме 5, показал, что выравнивание химического состава происходит на расстоянии 30..50 мкм от шва.

6. Исследования микротвердости HV по зонам сварных соединений, выполненных на режимах 5 и 7, показали плавное снижение значений микротвердости от деформированного сплава к литому.

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. С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. *Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей* // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение"*. 2011. № SP4. С. 13–19.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. *Литейные конструкционные сплавы на основе алюминидов никеля* // *Двигатель*. 2010. №4. С. 24–25.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. *Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы* // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 57–60.
5. Effect of friction welding parameters and heat treatment on the quality of welded joints in creep-resisting deformable nickel alloys. V.I. Lukin, V.G. Koval'chuk, M.L. Samorukov, Yu.M. Gridnev, I.P. Zhegina and L.V. Kotel'nikova. *Welding International*, Vol. 26, No. 9, September 2012, 728–731.

International, Vol. 26, No. 9, September 2012, 728–731.

6. Special features of friction welding joints in creep-resisting nickel alloys VKNA-25 and EP975. . V.I. Lukin, V.G. Koval'chuk, M.L. Samorukov, Yu.M. Gridnev, I.P. Zhegina and L.V. Kotel'nikova. *Welding International*, Vol. 25, No. 10, October 2011, 800–804.

7. Виль В.И. *Сварка металлов в твердой фазе*, М.: Машиностроение, 1970. 176 с.

8. *Сварка трением: справочник* / В.К. Лебедев, И.А. Черненко и др. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.

9. Медведев А.Ю., Никифоров Р.В., Супов А.В. Определение составляющих энергетического баланса при линейной сварке трением // *Известия Самарск. науч. центра РАН*. 2012. Т. 14. № 1(2). С. 392–395.

10. Медведев А.Ю., Бычков В.М., Селиванов А.С., Павлинич С.П., Даутов С.Х., Супов А.В. Применение линейной сварки трением для соединения сплавов ВТ6 и ВТ8-1 // *Вестник УГАТУ*. Т.16. №7 (52). С. 63–67.

REFERENCES

1. Kablov, E.N. Innovation developments of FSEIP "VIAM" SSC RF for realization "Strategic Development Directions of Materials and Techniques Their Processing for the Period up to 2030" // *Aircraft Materials and Techniques*. 2015. №1. pp. 3–33.
2. Kablov, E.N., Ospennikova, E.N., Bazyleva, O.A. Materials for high-loaded parts of gas turbine engines // *Bulletin of Bauman MSTU. Series "Mechanical Engineering"*. 2011. № SP4. pp. 13–19.
3. Kablov, E.N., Ospennikova, O.G., Bazyleva, O.A., Casting structural alloys based on nickel aluminide // *Engine*. 2010. №4. pp. 24–25.
4. Bazyleva, O.A., Arginbayeva, E.G., Turenko E.Yu., Heat-resistant casting inter-metallide alloys // *Aircraft Materials and Techniques*. 2012. №5. pp. 57–60.
5. Effect of friction welding parameters and heat treatment on the quality of welded joints in creep-resisting deformable nickel alloys. V.I. Lukin, V.G. Koval'chuk, M.L. Samorukov, Yu.M. Gridnev, I.P. Zhegina and L.V. Kotel'nikova. *Welding International*, Vol. 26, No. 9, September 2012, 728–731.
6. Special features of friction welding joints in creep-resisting nickel alloys VKNA-25 and EP975. . V.I. Lukin, V.G. Koval'chuk, M.L. Samorukov, Yu.M. Gridnev, I.P. Zhegina and L.V. Kotel'nikova. *Welding International*, Vol. 25, No. 10, October 2011, 800–804.
7. Will, V.I., *Metal Welding in Solid Phase*, M.: Mechanical Engineering, 1970. pp. 176.
8. *Friction Welding: Reference-book* / V.K. Lebedev, I.A. Chernenko et al. L.: Mechanical Engineering, 1987. pp. 236.
9. Medvedev, A.Yu., Nikiforov, R.V., Supov, A.V. Definition of energy balance constituents at seam friction welding // *Proceedings of Samara Scientific Center RAS*. 2012. Vol. 14. № 1(2). pp. 392–395.
10. Medvedev, A.Yu., Bychkov, V.M., Selivanov, A.S., Pavlinich, S.P., Dautov, S.Kh., Supov, A.V., Seam friction welding for joining TT6 and TT8-1 alloys // *Bulletin of USA-TU*. Vol.16. №7 (52). pp. 63–67.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников