

УДК 621.791.3.05.11:539.2:620

ПАЙКА В ВАКУУМЕ ЛИТОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС6У КОМПОЗИЦИОННЫМИ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ ВПр-36. Часть 1

И. С. Малашенко, В. Е. Мазурак, Т. Н. Кушнарева,
В. В. Куренкова, В. Г. Завидонов, Е. Ф. Явдошина

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@kiev.paton.ua

Рассмотрена возможность создания композиций паяльных смесей на базе промышленного припоя ВПр-36 путем добавки в него припоев эвтектического состава для снижения температуры пайки до 1225...1230 °С и уменьшения гетерофазности формирующихся швов. Исследованы микроструктура металла паяных швов и механические свойства соединений, выполненных с технологическими зазорами 10 и 100 мкм при температуре испытаний 20, 900 и 1000 °С. Получена удовлетворительная стабильность механических свойств при введении в промышленный припой ВПр-36 припоев Ni-12Si (НС12) и Ni-Co-Cr-Al-2,5 % В [#1] вместе с порошками жаропрочных сплавов ЖС-32 или Rene 142 в качестве наполнителя. Библиогр. 15, табл. 4, ил. 7.

Ключевые слова: ремонтная пайка; литейные сплавы ЖС6К и ЖС6У; высокотемпературный припой ВПр-36; припой Ni-Co-Cr-Al-2,5В; припой НС12; наполнитель; депрессант; паяное соединение; прочность; пластичность; долговечность; металл шва; упрочняющая γ' -фаза; силицидная фаза; гетерофазность

Сплав ЖС6У является одним из наиболее широко применяемых в авиационном газотурбостроении жаропрочных никелевых сплавов. Он относится к классу трудносвариваемых сплавов и практически не подвергается аргонодуговой сварке ввиду склонности к растрескиванию металла шва и зоны термического влияния при кристаллизации из-за протекания процессов дисперсионного твердения. Высокотемпературная пайка может служить альтернативным способом соединения деталей в случае изготовления узлов сложной конфигурации.

Максимально возможная (из-за опасности роста зерна) температура нагрева лопаток турбин из сплава ЖС6У согласно работе [1] составляет 1220 °С. Однако имеются данные [2], когда при ремонтно-восстановительных операциях лопаток, эксплуатировавшихся более 6000 ч, она достигает 1230 °С (4 ч) без ухудшения функциональных свойств сплава ЖС6У и опасности роста зерна.

Для промышленного припоя ВПр-36, широко применяемого в авиационном турбостроении в ЗМКБ «Прогресс», температура пайки равняется 1250...1265 °С. При довольно высокой температуре пайки (до 1265 °С) и времени выдержки 20 мин в высоколегированном растворе формируемых швов

выделяются крупные карбоборидные фазы Me(C, B) на основе ниобия, титана, вольфрама кубической формы, стабильные при высокой температуре, а также дискретные частицы неправильной формы Me₆C, значительное место занимают центрально-осевые сложнолегированные борсодержащие эвтектики (рис. 1). Центральноосевые эвтектические фазы при дальнейшей термической обработке расплавляются и протекают из междоусных пространств, нарушая сплошность и качество паяного шва, а выделение крупноразмерных карбоборидных фаз способствует хрупкому разрушению паяных соединений (ПС) при малых нагрузках, что недопустимо в условиях эксплуатации.

В работах [3–6] рассмотрены и обоснованы условия повышения технологической пластичности ПС никелевых жаропрочных соединений (ЖС), выполненных борсодержащими припоями, путем дополнительного использования в присадочных композиционных смесях порошка эвтектического сплава Ni-12 % Si (НС12). Как показала практика введения 15...20 мас. % кремнийсодержащей эвтектики в припой Ni-Co-Cr-Al-2,5В [#1] + 40 % сплава Rene 142, при пайке сплавов ВЖЛ12У [3], ЖС26ВИ [4] и ЖС6У [5] существенно повышается

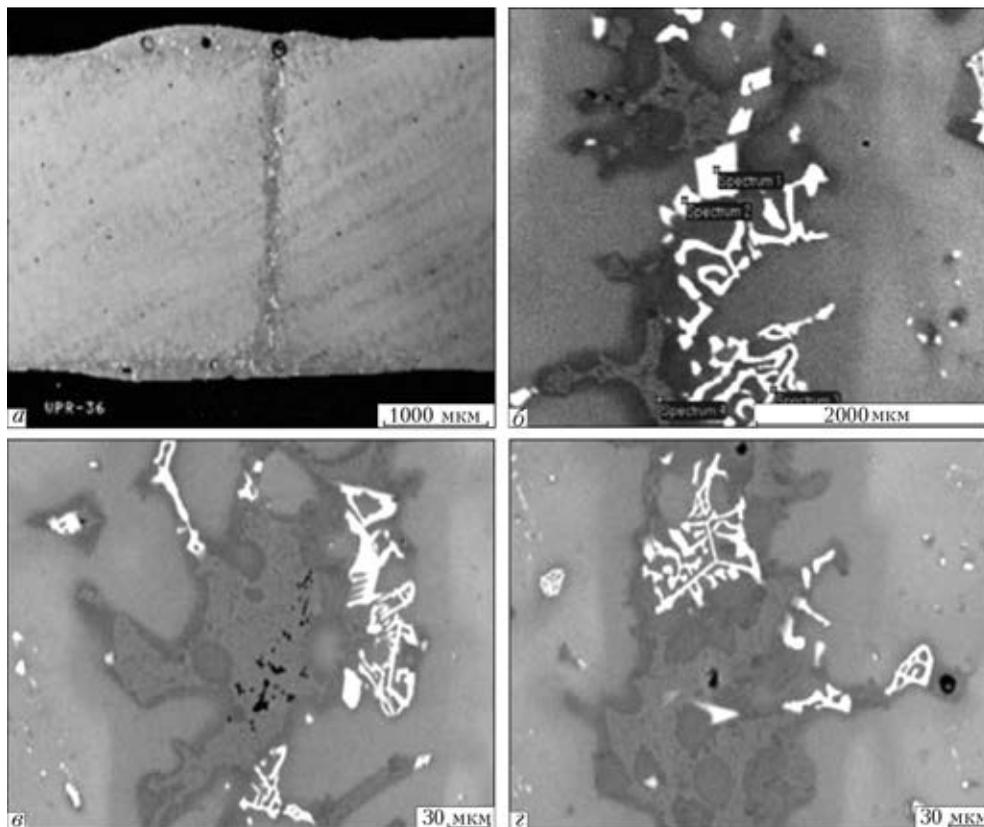


Рис. 1. Микроструктура соединения сплава ЖС26, выполненного в ЗМКБ «Прогресс» с использованием промышленной технологии пайки припоем ВПр-36 при $T_{\max} = 1265^\circ\text{C}$ в течение 20 мин: а — общий вид шва; б-г — структура закристаллизовавшегося припоя ВПр-36

вязкость разрушения и расширяется возможность деформационного упрочнения, благодаря чему можно избежать хрупкого разрушения ПС по достижению им предела упругости.

Одновременное использование бора и кремния в качестве депрессантов в присадочных материалах при высокотемпературной пайке позволяет получать ПС с улучшенными технологическими и механическими характеристиками, в частности вязкостью разрушения. Примером таких припоев с двумя депрессантами является NiCoBraz 130 (BNi-3) с $T_{\text{sol}} = 1055^\circ\text{C}$, который содержит 2,7...3,0 % кремния и 1,5...3,5 % бора [7].

Введение в качестве второго депрессанта кремния обеспечивает не только коррозионную стойкость швов, но и гарантирует надежную смачиваемость припоем материала подложки ($\theta = 3...5^\circ$), хорошую жидкотекучесть расплава для наиболее полного заполнения зазоров; создание структуры металла шва с минимальным количеством (до 5...7 об. %) вторичных боридных и карбидных фаз; уменьшение ликвационной неоднородности шва, ограничение количества межосевых боридных эвтектик; торможение диффузии бора из припоя в паяемый металл. Дополнительным положительным фактором введения второго депрессанта в борсодержащий припой является снижение характеристических температур припоя (температуры пайки) и сужение интервала кристаллизации расплава. При этом кремний нейтрализует активное эрозионное воздействие бора на паяемую основу [8, 9].

Цель данной работы заключалась в поиске рациональных составов композиционных систем при-

поев на основе припоя ВПр-36, обеспечивающих снижение температуры пайки соединений сплава ЖС6У и гарантирующих формирование высокопрочных ПС с достаточной технологической пластичностью. Задача состояла в получении паяльной композиции, обеспечивающей запас пластичности (работы разрушения ПС) в твердом состоянии.

Материалы и методы исследования. Для пайки использовали литые пластины сплава ЖС6У, полученные по выплавляемым моделям из ЗМКБ «Прогресс». Перед пайкой заготовки отжигали в вакууме при 1220°C в течение 2 ч для выравнивания структуры литого металла. Заготовки собирали встык с «нулевым» зазором или с зазором шириной 100 мкм путем конденсаторной сварки, используя сеточку из технического чистого никеля с размером ячейки около 100 мкм.

На противоположную (по отношению к сеточке) поверхность наносили припой, замешанный на органическом связующем. Поверхность предварительно зачищали абразивной бумагой на основе SiC для лучшего смачивания припоем [10]. Высота валика припоя равнялась 1,5...2,0 мм, ширина достигала 3 мм. Валик наносили вдоль соединительного зазора.

Температура пайки в вакууме обычно составляла 1230°C . По желанию заказчика температуру пайки снижали до 1225°C при времени ведения процесса 18...20 мин.

Гомогенизацию образцов ПС проводили при 1160°C в вакууме в течение 2...4 ч для достижения максимального растворения карбидных и интерме-



Таблица 1. Содержание компонентов (паспортные данные) в жаропрочных никелевых сплавах и отдельных составляющих композиционного припоя на основе ВПр-36

Материал	Массовая доля элементов, %						
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Al
Припой ВПр-36	Основа	0,15...0,20	8...10	8...10	1,4...2,0	2...6	2,5...6,0
Сплав ЖС6У	»	0,13...0,20	9,0...10,5	8...9	1,2...2,4	9,5...11,0	5,1...6,0
Сплав ЖС6К	»	0,13...0,20	10,5...12,5	4...5	3,5...4,5	4,5...5,5	5...6
Сплав ЖС-32	62,2	0,13	5,0	9,4	1,4	8,1	4,2
ВИ (паспорт)	Основа	0,12	4,9	9,0	1,0	8,5	5,9
Rene 142	»	0,10...0,14	6,6...7,0	11,7...12,3	1,3...1,7	4,7...5,1	5,9...5,3
Припой [#1]	»	–	9,0	14,0	–	–	3,8
Припой НС12	»	–	–	–	–	–	–
<i>Окончание табл. 1</i>							
Материал	Массовая доля элементов, %						
	Ti	Nb	Ta	Re	Si	B	Комментарии
Припой ВПр-36	–	2...5	–	–	–	0,8...1,1	–
Сплав ЖС6У	2,0...2,9	–	–	–	–	–	–
Сплав ЖС6К	2,5...3,0	–	–	–	–	–	≤2,0 Fe
Сплав ЖС-32	0	1,97	3,63	3,77	–	–	0,1 V
ВИ (паспорт)	6	1,60	4,0	3,5...4,5	–	0,01	–
Rene 142	<0,02	<0,02	6,2...6,5	2,6...3,0	–	–	1,3...1,7 Hf
Припой [#1]	»	–	–	–	–	2,5	Импортный Ni-377-2
Припой НС12	»	–	–	–	12	–	$T_e = 1143 \text{ }^\circ\text{C}$

таллидных фаз в матричном растворе. Для получения удовлетворительной технологической пластичности образцы ПС, испытываемые при 20 °С, после гомогенизации отжигали по режиму высокотемпературного старения при 1050 °С, 4 ч. (Так отжигают лопатки с жаростойкими конденсационными покрытиями Me–Cr–Al–Y).

Механические испытания образцов ПС сплавов ЖС6К и ЖС6У выполняли при 20 и 900...1000 °С на образцах с рабочей частью длиной 10 и 25 мм и сечением 3,0×1,6 мм. Скорость деформации составляла 1,6...10⁻³ 1/с.

Установлено, что на результаты испытаний ПС существенно влияет качество используемого в экспериментах металла, зависящее от способа отливки и типа шихты (чистая первичная или вторичная). Литейная микропористость, примеси, присутствующие в готовом продукте, снижают физико-механические свойства металла, и образцы ПС могут разрушаться по дефектам основы. Для обеспечения максимального выхода годной рабочей части образцов ПС перед испытаниями утоняли (делали шейку) с целью получения максимальных приложенных напряжений в окрестности полученных швов.

Для формирования качественных ПС сплавов ЖС6К и ЖС6У припоем ВПр-36 использовали подход [11], связанный с введением в борсодержащий припой [#1] + 60 % Rene 142 20 мас. %. эвтектики Ni–12Si с $T_{liq} = 1143 \text{ }^\circ\text{C}$. Вначале в базовый припой ВПр-36 добавляли эвтектической порошок НС12 ($d_3 < 100 \text{ мкм}$). В табл. 1 приведен химический

состав припойных материалов, входящих в состав композиционных припоев на основе порошка сплава ВПр-36. Введение эвтектических составляющих в ВПр-36 позволило не только снизить значения температуры ликвидуса и солидуса и интервал кристаллизации, а также частично разбавить никелем высоколегированную композицию припоя с большим количеством карбидообразующих компонентов (вторичных фаз).

Пайка пластинок сплава ЖС6К, используемого в данной работе в качестве модельного материала, чистым припоем ВПр-36 при 1230 °С не дала положительного эффекта ввиду неполного расплавления припоя и затекания расплава в зазор шириной 100 мкм. Увеличение температуры пайки до 1245 °С (15 мин) позволило получить удовлетворительный результат по прочности и ограниченную пластичность (табл. 2).

ПС, полученные при помощи бинарной системы 80 % ВПр-36 + 20 % НС12, разрушались хрупко при растяжении ниже предела текучести. Наиболее объективной причиной этого результата могло быть перелегирование матричного раствора кремнием с образованием хрупких силицидных фаз в металле шва.

Введение в композицию ВПр-36 + НС12 припоя [#1] вызывало некоторое увеличение массовой доли бора, однако способствовало тому, что разрушение образцов ПС наступало выше уровня предела упругости, а относительное удлинение соединений при 20 °С составило 0,5...0,7 %.



Таблица 2. Механические свойства образцов соединений сплава ЖС6К, выполненных модифицированными припоями на основе ВПр-36 при температуре 1230 °С (15 мин) с шириной технологического зазора 100 мкм при 20 °С*

№ образца	Состав припоя, мас. %				$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ε , %	Версия припоя
	ВПр-36	НС12	#1	ЖС-32				
X12	100	–	–	–	795,3 809,0	795,3 848,0	0 1,0	ВПр-36
X0					–	610,5	0	
X1	80	20	–	–	–	613,0	0	21-01
X2					–	742,0	0	
X3					765,7	799,0	0,7	
X4	65	20	15	–	–	730,3	0	21-02
X5					779,5	808,3	0,5	
X6					775,5	783,6	0,5	
X7					801,4	854,3	1,2	
X8	45	20	15	20	708,0	738,3	0,7	21-03
X9*					788,3	818,3	1,0	
X13					–	706,3	0	
9					722,3	975,6	6,7	–
10	Исходный металл после отжига по режиму термообработки ПС				713,2	830,0	9,0	–
11					740,3	898,7	10,7	–
121					763,3	930,5	10,2	–

*Термообработка ПС – отжиг 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (4 ч).

Обеспечение технологической пластичности и получение стабильного уровня прочности (800...854 МПа) при 20 °С (табл. 2) за счет добавки 10...15 мас. % борсодержащей эвтектики [#1] в комплексный припой оказалось важным положительным моментом в технологическом процессе пайки. Таким образом, определен способ оптимизации химического состава припойного материала.

Следующий этап заключался во введении в припой порошковых наполнителей суперсплавов Rene 142 или ЖС-32 для обеспечения максимально возможного уровня высокотемпературной прочности, термической стабильности и долговечности. Именно такие компоненты сплавов, как тантал и гафний, повышают термическую стабильность γ' -фазы и делают более благоприятной морфологию выделяющейся карбидной фазы, а рений обеспечивает дополнительное твердорастворное упрочнение и позволяет увеличить содержание алюминия и, следовательно, γ' -фазы в сплаве, уменьшить скорость коагуляции ее под нагрузкой.

В ходе работы выполнялись эксперименты с вариациями химического состава композиционных припоев, т. е. количества вводимых в припой составляющих НС12, [#1], ЖС-32 и Rene 142, а также с различной шириной технологического зазора при пайке образцов.

Экспериментальные результаты. Первый вариант пайки при введении в ВПр-36 10 мас. % НС12 и 30 мас. % наполнителя ЖС-32 показал низкие результаты, что, скорее всего, определялось режимом термической обработки паяных образцов с широким

технологическим зазором. Старение при 900 °С после гомогенизации ПС оказалось не совсем подходящим режимом в случае испытаний образцов в условиях 20 °С. В ходе исследования свойств литого металла шва у образцов с технологическими зазорами 10 и 100 мм финальная термообработка должна выполняться при соблюдении условий получения ненапряженной структуры литого металла с повышенной пластичностью твердого раствора и наличием в шве меньшего количества вторичных упрочняющих фаз. Это реализуется путем проведения после гомогенизации (1160 °С, 2 ч) высокотемпературного старения при (1050 °С, 4 ч) для «пластифицирования» материала шва способом частичного растворения вторичных хрупких фаз.

Такой режим термообработки применим для соединений, испытываемых при высокой температуре, что реализовали в дальнейшем.

В экспериментах по пайке сплава ЖС6У содержание ВПр-36 достигало 50...60 мас. %, а количество введенных в присадочный материал легкоплавких компонентов бор- [#1] и кремнийсодержащего НС12 составляло приблизительно по 10 мас. %. При 20 °С и высокой температуре полученные данные кратковременной прочности были вполне удовлетворительными, однако долговечность при 900 °С оставалась низкой. Это можно объяснить наличием в закристаллизованном металле швов грубых карборидных составляющих (на основе ниобия, вольфрама, хрома) и сложнoleгированных эвтектик, которые, располагаясь в междендритных областях, охрупчивают границы и снижают длительную прочность.

На рис. 2 отражено соотношение прочностных характеристик сплава ЖС6К и его соединений, полученным способом пайки композиционными припоями на основе ВПр-36 при 1230 °С (20 мин) после двухстадийной термообработки при 1160 °С (4 ч) + 900 °С (4 ч). Температура испытания на растяжение на воздухе составляла 900 °С [12]. Уровень прочности ПС совпадал со значением предела текучести базового металла – 542...562 МПа. Возможно, пластическое течение (сдвиг), происходящее в основном металле, провоцирует разрушение соединений по диффузионной зоне в основном материале. Испытывали образцы с технологическим зазором около 20 и 100 мкм.

Рис. 3 иллюстрирует удовлетворительную плотность значений предела текучести и временного сопротивления ПС сплава ЖС6У, испытанного при высокой температуре. Комбинация добавок НС12

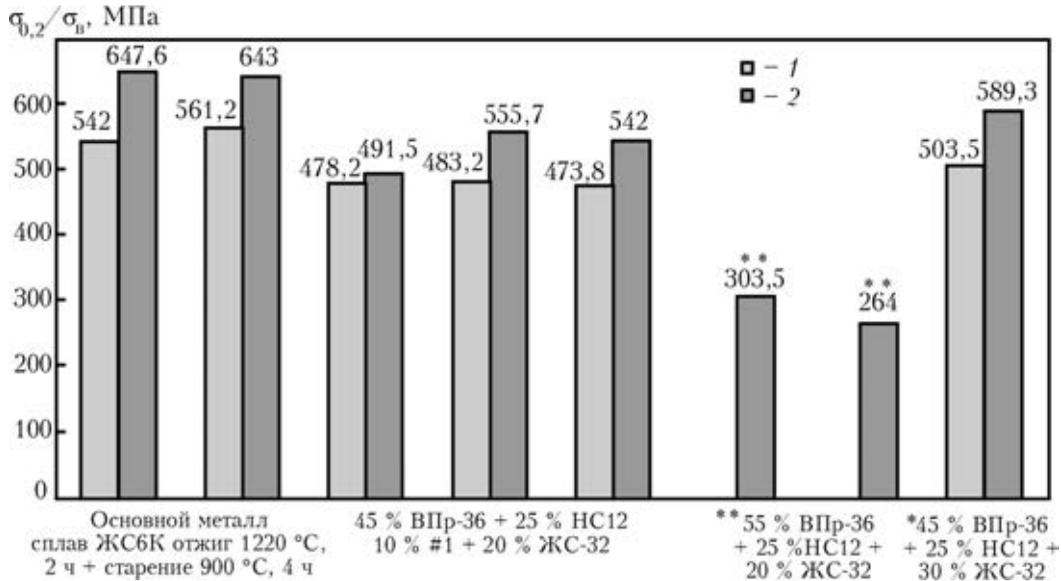


Рис. 2. Значения предела текучести и временного сопротивления соединений ЖС6К и его ПС, выполненных с технологическим зазорами 20 и 100 мкм (** и *), композиционными припоями на основе ВПр36 с добавками при $T = 1225\text{ }^{\circ}\text{C}$ (18 мин) после двухстадийной термообработки ($1160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч + $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч). Одноосное растяжение при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе [12]: 1 — предел текучести; 2 — временное сопротивление

и [#1] в металле шва оказалось рациональной, а увеличение массовой доли наполнителя ЖС-32 до 30 мас. % дало возможность получить повышенный уровень временного сопротивления при 900 и $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также относительное удлинение соединений до 3 %. Это достигнуто благодаря низкотемпературному старению при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч непосредственно после гомогенизации при $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Согласно данным работы [13], более высокие значения предела текучести и временного сопротивления получают после старения при $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2...4 ч), которое выполняют после гомогенизации.

Введение 10...15 % НС12 в припой ВПр-36 способствовало обеспечению удовлетворительного протекания зазоров, минимальной пористости и не снизило значений кратковременной прочности соединений сплава ЖС6У. Массовая доля порошка ЖС-32 в припое, равная 30 мас. %, дала наиболее высокий уровень временного сопротивления готового соединения за счет наполнителя. Высокий уровень временного сопротивления при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигнут благодаря режиму термообработки $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч + $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч, позволившему получить относительно дисперсную и регулярную упрочняющую γ' -фазу. Повышение температуры испытаний до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызвало заметное разупрочнение металла ПС с 20 мас. % порошка ЖС-32, однако увеличение его содержания в композиции припоя до 30 мас. % обеспечило получение наиболее высокого значения предела временного сопротивления ПС при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При значениях температуры $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше, а также неизменной скорости деформации преобладающую роль в пластическом течении металла начинают иг-

рать границы зерен, а не их тело [14]. Характер разрушения изменяется от внутри- (сдвиг) к межзеренному. Это определяется прежде всего фазовым составом основного металла, а в случае ПС — размером ячейки (зерна) металла шва как более слабой в прочностном отношении составляющей испытываемого материала.

Влияние ширины технологического зазора. Факторами, определяющими свойства ПС, являются химический состав припоя, паяемого сплава, режимы процесса пайки и термообработки, ширина технологического зазора. В испытаниях на длительную прочность при использовании образцов с шириной зазора более 100 мкм фактически определяется прочность закристаллизовавшегося металла шва соединения. В процессе механических испытаний

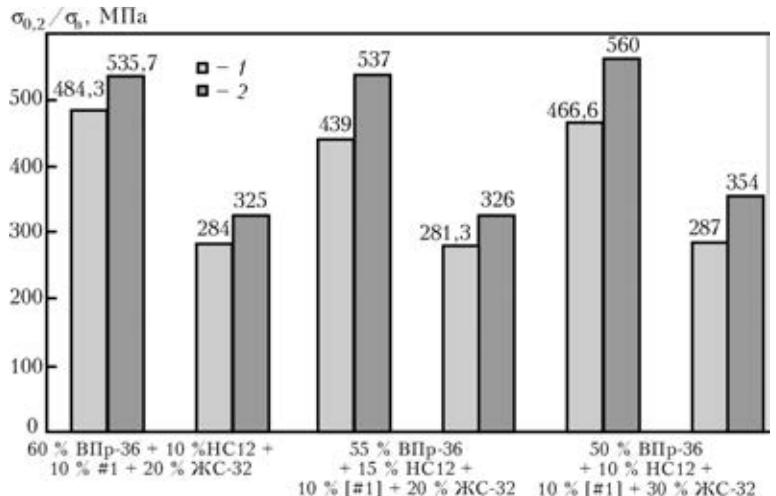


Рис. 3. Значения предела текучести и временного сопротивления соединений сплава ЖС6У с зазором около 100 мкм, выполненных композиционными припоями из сплава ВПр-36 с добавками НС12 и [#1] при $T = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 мин) после двухстадийной термообработки ($1160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч + $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 ч). Одноосное растяжение при 900 и $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе: 1 — предел текучести; 2 — временное сопротивление



ПС с минимальным зазором разрушение образцов происходит преимущественно по основному металлу, прочность стыковых соединений слабо зависит от ширины шва.

По химическому составу выбранный в качестве основы композиции припой ВПр-36 подобен базовому сплаву ЖС6У, однако отличается дополнительным содержанием ниобия (2...5 мас. %) и депрессанта бора (0,8...1,1 мас. %). При пайке процесс кристаллизации на подложке характеризуется активным взаимодействием между расплавленным припоем и основным металлом. Однако в случае рассматриваемой системы процесс растворения припоем основы ослабевает, и спай формируется при избирательной взаимной диффузии компонентов припоя и основного металла. Наиболее активным элементом в припое ВПр-36 является депрессант бор, скорость диффузии которого в никеле составляет $6,22 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а скорость диффузии кремния — $3,09 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, т. е. на три порядка выше. Это объясняется малым значением атомного радиуса бора, у которого $r_b = 0,087 \text{ нм}$.

Наличие активного карбидообразующего элемента ниобия при достаточном содержании углерода приводит к формированию в металле шва большого количества грубых карбидных фаз при штатной температуре пайки припоя ВПр-36, т. е. фаз, значительно снижающих запас пластичности формируемых швов. При температуре пайки примерно 1220...1230 °С происходит неполное расплавление припоя и формирование некачественных швов, особенно это проявляется при широком зазоре, когда кристаллизующийся расплав имеет ячеисто-дендритную структуру, междендритные области которой обогащены легкоплавкими эвтектическими и карбоборидными включениями, действующими ослабляюще на металл шва и способствующими преждевременному разрушению соединений как при комнатной, так и при рабочей температуре (выше 800 °С).

Сравнение результатов испытаний (рис. 4) показало взаимосвязь ширины технологического зазора и прочностных характеристик соединений сплава ЖС6У, в первую очередь гарантированных применением легирующего комплекса сплава-наполни-

теля ЖС-32. Образцы, полученные способом контактной пайки с исходным зазором 10...20 мкм, были более прочными (примерно на 180 МПа) при 900 °С, чем соединения с зазором 100 мкм. Уменьшение зазора и, следовательно, количества затвердевшего металла, приводит к образованию плоских границ зерен при пайке как одно-, так и многокомпонентными припоями. С уменьшением зазора содержание основного металла в зоне сплавления возрастает, т. е. уширяется область прикристаллизованных слоев (прослойка шва, непосредственно прилегающая к основному металлу) с образованием пересыщенного твердого раствора. При узком зазоре скорость кристаллизации v_k и температурный градиент G выше, что способствует возникновению плоского фронта кристаллизации. При снижении отношения G/v_k в широком зазоре фронт кристаллизации (при достаточно большом интервале кристаллизации) приобретает ячеистую либо дендритную форму, что вызывает значительную структурную неоднородность осей и междендритных областей с образованием большого количества вторичных фаз и эвтектик, снижающих долговечность ПС.

Соединения, показанные на рис. 5, получены способом контактной пайки с минимальным исходным соединительным зазором между сопрягаемыми пластинами. Расплав припойного материала проникал в капилляр при температуре 1230 °С (20 мин), смачивал поверхность и взаимодействовал со стенками сопрягаемых пластин. При введении 10 мас. % эвтектики Ni-12 % Si достигали удовлетворительного затекания припоя в зазор. Соединения подвергали «мягкой» термообработке: после гомогенизации при 1160 °С (4 ч) применяли отжиг при 1050 °С (4 ч). В качестве наполнителя использовали порошки (25...30 мас. %) сплавов ЖС-32 или Rene 142. Существенного изменения механических свойств соединений при этом не отмечено.

Прочностные свойства соединений сплава ЖС6У при использовании различных соотношений компонентов в композиционных припоях мало отличались (рис. 5): содержание компонентов в припоях приближалось к оптимальному (табл. 3).

Введение в качестве наполнителя порошка Rene 142 в припой дало стабильный уровень прочности на уровне 831...834 МПа, что определяется легирующим комплексом суперсплава, содержащим тантал и гафний. Разрушение спаянных соединений преимущественно происходило по основному металлу между швом и галтелью перехода к головке образца. Разброс результатов испытаний связан с микронеднородностью металла литой пластины и качеством подготовки рабочей части образцов перед испытаниями. В целом повторяемость значений предела текучести и временного сопротивления образцов оказалась высокой.

Микроструктура ПС, выполненных с применением различных припоев, приведена на рис. 6. В металле швов соединений, сформированных с капиллярным зазором, зафиксирована минимальная

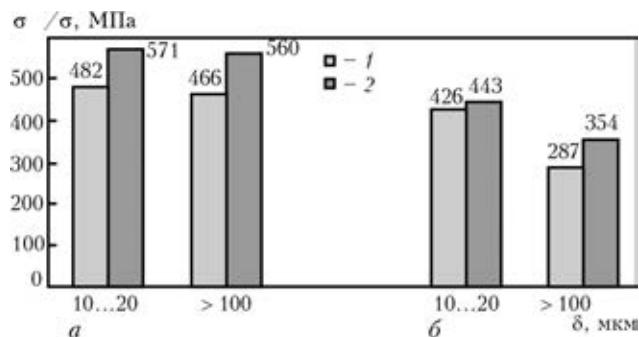


Рис. 4. Влияние ширины зазора на кратковременную прочность ПС сплава ЖС6У, выполненных 50 % припоем ВПр-36-10 НС12-10 % [#1]-30 % ЖС-32: а — предел текучести при $T_{исп} = 900 \text{ °С}$; б — временное сопротивление при $T_{исп} = 1000 \text{ °С}$; δ — шкала зазора

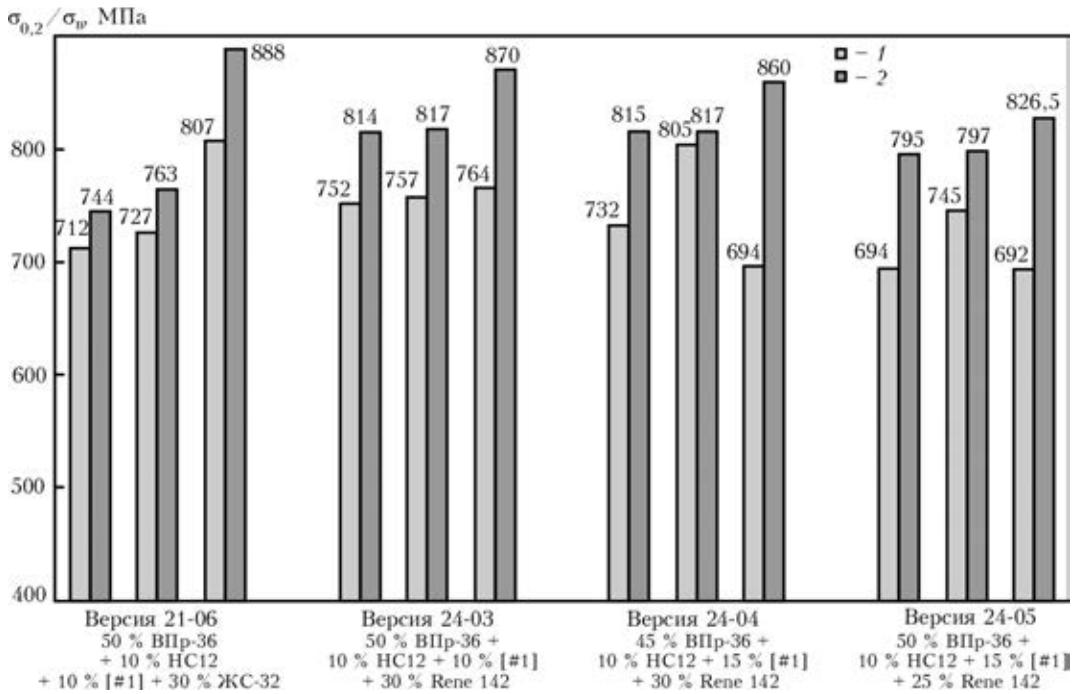


Рис. 5. Прочность ПС сплава ЖС6У на растяжение при 20 °С, выполненных при 1230 °С, 20 мин, с исходным «нулевым» технологическим зазором композиционными припоями на основе ВПр-36: 1 – предел текучести; 2 – временное сопротивление

гетерофазность металла шва без грубых карбидных фаз, дискретно выделяющихся в виде центрально-осевых фаз в верхней части шва. Высокотемпературная прочность соединений с узким соединительным зазором, выполненных с использованием аналогичных припоев, выше полученной ранее на образцах с зазором 100 мкм, что полностью объясняется законами кристаллизации расплава.

Поскольку лучшими функциональными свойствами при 20 °С и высокой температуре отличаются соединения, выполненные с применением припойных материалов 50 % ВПр-36–10 % НС12–10 % [#1]–30 % Rene 142, следует признать, что порошок наполнителя Rene 142 является более эффективной дисперсионноупрочняющей добавкой в композиционном припое на основе сплава ВПр-36, чем ЖС-32. Уменьшение содержания Rene 142 от 30 до 25 мас. % привело к снижению прочности ПС сплава ЖС6У (и одновременному росту их технологической пластичности).

Припой с 30 мас. % ЖС-32 определял структуру практически однофазного шва с единичными карбидными включениями типа $Me_{23}C_6$. Повышенное

содержание углерода в порошке сплава ЖС-32 способствовало выделению при кристаллизации шва изолированных карбидов на основе вольфрама, молибдена, никеля (33...30...16...6,7 %, рис. 6, а, б), но они не вызывали заметного охрупчивания соединения в условиях растяжения при 20 °С ($\epsilon = 1,0...3,5$ %). Так, несмотря на присутствие карбидов в шве, образец ПС (рис. 6, а, б) имел высокие значения прочностных характеристик после старения при 900 °С, 4 ч: $\sigma_{0,2} = 807,4/\sigma_B = 888$ МПа при относительном удлинении 3,5 %.

При пайке с технологическим зазором требовалось обеспечить качественное прилегание друг к другу контактируемых поверхностей. Незначительные перекосы при формировании стенок сопрягаемых пластинок вызывали уширение зазора. В таких участках изменялись условия кристаллизации расплава припоя, в результате чего по оси шва возникали центральноосевые сложнелегированные эвтектики (рис. 6, в). Ввиду этого относительное удлинение образца ПС после старения составило 0,5 % при несущественной разнице значений предела текучести (805 МПа) и временного сопротивления

Таблица 3. Усредненные результаты механических испытаний ПС сплава ЖС6У, полученных способом контактной пайки при $T = 1230$ °С (20 мин) с минимальным исходным зазором*

Версия припоя	Состав припойного материала, мас%					$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ , %
	ВПр-36	НС12	#1	ЖС-32	Rene 142			
21-06	50	10	10	30	–	720,0	753,6	1,0...1,5
24-04	45	10	15	–	30	744,0	830,7	0,5...2,0
24-03	50	10	10	–	30	758,0	834,0	1,7...4,5
24-05	50	10	15	–	25	710,3	806,4	2,4...6,2

*После двухстадийного отжига: 1160 °С (4 ч) + высокотемпературное старение при 1050 °С (4 ч).

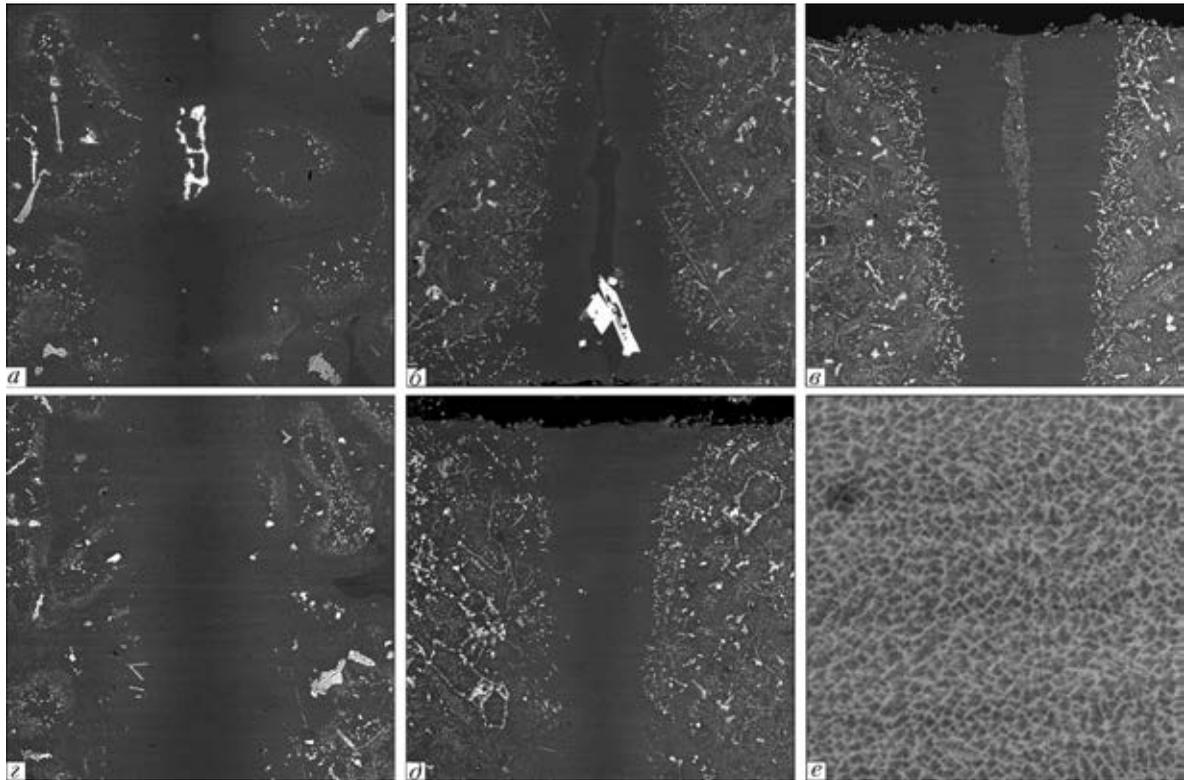


Рис. 6. Микроструктура металла шва ПС сплава ЖС6У: *a, б* – типичная форма выделения карбидов в металле шва, выполненного припоем с 30 мас. % ЖС-32, $\times 400$ (*a*) и $\times 200$ (*б*); *в, г* – верхняя и средняя части шва, сформированного с применением припоя 45 % ВПр-36 + 10 % НС12 + 15 % [#1] + 30 % Rene 142, старение 900 °С, 4 ч; $\times 200$, $\times 400$; *д* – стандартный шов, выполненный припоем оптимального химического состава 50 % ВПр-36 + 10 % НС12 + 10 % [#1] + 30 % Rene 142, $\times 200$; *е* – (γ - γ') тонкая структура металла шва, $\times 20000$

(817 МПа). Повышенное (до 15 мас. %) содержание борсодержащего припоя [#1] в композиционном припое оказалось нерациональным ввиду большого разброса значений предела текучести (при достаточно высоких значениях временного сопротивления – 815...869 МПа после старения при 1050 °С, 4 ч (рис. 6, *г*)). Скорее всего, увеличение содержания депрессанта бора в системе композиционного припоя при зазоре, отличном от капиллярного, может приводить к образованию борсодержащих центральноосевых фаз в сформированном шве и охрупчивать соединение.

Паяный шов (рис. 6, *д*) шириной не более 120 мкм получен с использованием припоя 50 % ВПр-36 + 10 % НС12 + 10 % [#1] + 30 % Rene 142 (версия 24-03). При практически однофазной структуре металла сформированного шва удлинение образца ПС составило 3,8 %, а временное сопротивление – 814,5 МПа.

Полученные значения предела текучести и временного сопротивления рассмотренных образцов показали достаточно высокую однородность свойств ПС, выполненных с использованием композиционных припоев на основе ВПр-36. Рабочие характеристики ПС определялись не только надежным контактным взаимодействием металла шва и сопрягаемых поверхностей паяемых пластин, но и тонкой (γ - γ')-структурой металла шва, дисперсностью и гомогенностью распределения γ' -фазы в матричном твердом растворе. Размер частиц γ' -фазы в шве после старения при 1050 °С (4ч) составил 0,5...

...0,6 мкм, что обеспечило надежные функциональные параметры ПС (рис. 6, *е*).

Все образцы при растяжении (20 °С) разрушались по основному металлу между швом и галтелью перехода к головке (рис. 7). Упрочнение шва обеспечивалось в результате более сложного легирования металла шва по сравнению с основным металлом (сплав ЖС6У). Применение в качестве наполнителя порошка сплава Rene 142 дало некоторое преимущество в свойствах соединений по сравнению с порошком сплава ЖС-32. Максимально достигнутая прочность ПС сплава ЖС6У с использованием бор- и кремнийсодержащих припоев получена в случае применения в припойном материале 60 % наполнителя Rene 142 [15].

Лучшей по механическим свойствам из рассмотренных композиционных припоев была версия 24-04, состоящая из ВПр-36 + 10 % НС12 + 10 % [#1] + 30 % Rene 142, которая обеспечила удовлетворительное сочетание прочностных характеристик ($\sigma_B = 814...870$ МПа) и технологической пластичности ($\epsilon = 3,8...4,5$ %). Структура металла шва практически однофазная, т. е. отмечено отсутствие хрупких концентраторов напряжений, провоцирующих возникновение трещин.

Для сравнительной оценки реальной долговечности образцов ПС, выполненных композиционными припоями на основе ВПр-36, использовали приложенное напряжение 147...157 МПа (15...16 кг/мм²). Очевидно, напряжение в 147 МПа является пороговым значением, когда при больших

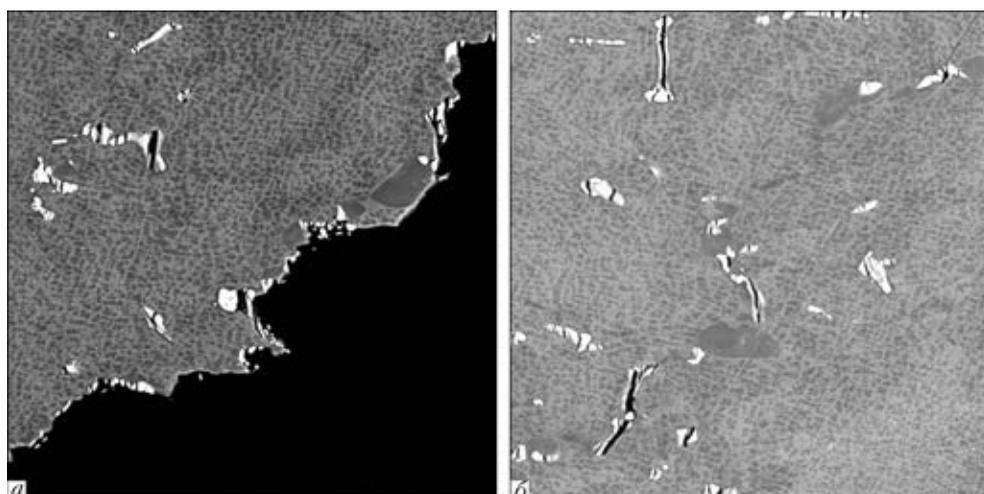


Рис. 7. Типичные картины разрушения основного металла в образцах ПС сплава ЖС6У, выполненного композиционным припоем оптимального состава при 20 °С: *а* – траектория распространения трещины; *б* – растрескивание единичных карбидов в базовом сплаве, $\times 1000$

Таблица 4. Долговечность паяных соединений сплава ЖС6У* на воздухе при температуре 900 °С и ширине технологического зазора 100 мкм

Версия припоя	Содержание компонентов в припойном материале, мас. %				σ , МПа	τ , ч	ϵ , %
	ВПр-36	НС12	#1	ЖС-32			
21-04	60	10	10	20	196	6 ⁴⁵	1,87
21-05	55	15	10	20	176	5 ¹⁵	6,18
21-06	50	10	10	30	20	8 ³⁰	2,45
					176	4 ³⁵	1,1
					176	9	–
					176	>24	–
24-03	50	10	10	Rene 30	196	–	–
					176	1	–
					147	179	0,6
25-02**	48	12	10	30	157	260	0,94
					196	132	0,9

*Пайка выполнена при 1230 °С в течение 20 мин с последующей двухстадийной термообработкой в вакууме при 1160 °С, 4 ч + старение при 900 °С, 4 ч.
 **Исходная ширина зазора 10...20 мкм.

приложенных нагрузках происходит разупрочнение металла шва вследствие повышенной диффузионной активности бора как по границам зерен, так и по субграницам ячеистой структуры, что приводит к снижению длительной прочности.

Долговечность ПС сплава ЖС6У, полученных на образцах из литых пластин (поставка ЗМКБ «Прогресс»), выполненных с использованием припоев ВПр-36 с добавками при 900 °С на воздухе при ширине технологического зазора 10...20 и примерно 100 мкм, обобщена в табл. 4.

Как видно из приведенных результатов, в случае ширины технологического зазора 100 мкм долговечность ПС под нагрузкой была существенно ниже долговечности соединений, выполненных с узким соединительным зазором.

При повышенной (1000 °С) температуре испытаний образцов с технологическим зазором шириной 42...45 мкм прочность ПС достигала $\sigma_{0,2} = 436,8$ МПа; $\sigma_b = 533,5$ МПа, $\epsilon = 1,6$ %. Разрушение образцов происходило в основном по диффузионной зоне, где выделялись карбидные Me_6C и карборидные типа $Me_{23}C_6$ фазы. Данная зона на сплавах типа ЖС6У и ЖС6К была обычно довольно развитой, по сравнению с практически однофазной структурой металла паяного шва.

Выводы

1. Показана возможность формирования качественных ПС никелевых жаропрочных сплавов ЖС6У и ЖС6К с использованием борсодержащего припоя ВПр-36 при температуре 1220...1230 °С, что на 30...



...40 °С ниже штатной температуры пайки. Это достигается путем введения в композицию легкоплавких составляющих припоев Ni-12 % Si (НС12) и Ni-9Co-14Cr-3,8Al-2,5B (#1) вместе с 20...30 мас. % порошков-наполнителей сплавов ЖС-32 или Rene 142.

2. Установлено, что структура швов и механические характеристики соединений определяются размером технологического зазора и составом композиционного припоя. Гомогенное строение с минимальным количеством вторичных карборидных составляющих в металле шва при зазоре 20...50 мкм обеспечивало технологическую пластичность и дисперсионное упрочнение соединений.

3. Получены данные о прочности соединений после двухстадийной термообработки в вакууме, включающей высокотемпературную гомогенизацию при 1160 °С и старение при 900, 4 ч или 1050 °С, 4 ч. Наиболее высокие значения предела текучести/временного сопротивления имели соединения, выполненные композиционными припоями с 30 % Rene 142 в качестве наполнителя ввиду более совершенной системы легирования (тантал, гафний), по сравнению со сплавом ЖС-32.

4. Разрушение образцов ПС в процессе растяжения при 900 и 1000 °С происходит при напряжении, равном пределу текучести паяемого металла, по диффузионной зоне ПС или базовому сплаву ЖС6У.

5. Максимальное значение долговечности ПС сплава ЖС6У при напряжении 196 МПа (900 °С) на воздухе получено при исходном соединительном зазоре 10...20 мкм. Сопротивление ползучести ПС при 900 °С обеспечивается в результате ограничения диффузионной подвижности компонентов припоя по границам зерен и отсутствия выделений карборидных фаз в металле шва.

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). — М.: МИСИС, 2001. — 632 с.
2. Кузнецов В., Лесников В. Критерий ремонтпригодности и технологии восстановления рабочих лопаток турбин

ГТД // Газотурбинные технологии. — 2004. — № 1, 2. — С. 26–30.

3. *Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния* / И. С. Малащенко, В. В. Куренкова, А. Ф. Белявин, В. В. Трохимченко. // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 26–42.
4. *Механические свойства и структура паяных соединений литейного никелевого сплава ЖС26ВИ. Часть 1* / И. С. Малащенко, В. В. Куренкова, Е. В. Оноприенко и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 25–32.
5. *Прочность и микроструктура паяных соединений сплава ЖС6У, полученных с использованием бор- и боркремнийсодержащих припоев* / А. Ф. Белявин, В. В. Куренкова, И. С. Малащенко и др. // Там же. — 2010. — № 2. — С. 40–52.
6. *Куренкова В. В., Малащенко И. С.* Высокотемпературная пайка литейных жаропрочных никелевых сплавов борсодержащим припоем, легированным кремнием // Агезия расплавов и пайка материалов. — 2008. — Вып. 41. — С. 63–87.
7. *Хорунов В. Ф.* Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 2008. — 239 с.
8. *Tung S. K., Lim L. C., Lai M. O.* Solidification phenomena in nickel base brazes containing boron and silicon // Scripta Materialia. — 1996. — 34, is. 5. — P. 763–769.
9. *Variation in diffusion-induced solidification rate of liquated Ni-Cr-B insert during TLP bonding of Waspaloy superalloy* / K. Tokoro, N. P. Wikstrom, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi // Mater. Sci & Engineering A. — 2008. — 477, is. 1–2. — P. 311–318.
10. *Stankovski A.* Advanced thermomechanical cleaning procedures for braze repair techniques // Proc. ASME TURBO EXPO 2002 (Amsterdam, The Netherland, 2002). — 2002. — № 30535 — 10 p.
11. *Куренкова В. В., Дорошенко Л. К., Малащенко И. С.* Особенности кристаллизации комплекснолегированных припоев для высокотемпературной пайки жаропрочных никелевых сплавов // Автомат. сварка. — 2009. — № 6. — С. 17–27.
12. *Новый подход к ремонту створок сопла реактивного двигателя из жаропрочного никелевого сплава ЖС6К* / К. А. Ющенко, И. С. Малащенко, В. Е. Мазурак и др. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин. — Киев: ІЭС ім. Е. О. Патона НАНУ, 2012. — С. 494–499.
13. *Куренкова В. В.* Высокотемпературная пайка литых жаропрочных никелевых сплавов бор- и кремнийсодержащим припоем: Автореф. дис. ... канд. наук. — Киев: ІЭС ім. Е. О. Патона, 2009. — 22 с.
14. *Диффузионные параметры границ фаз γ/γ' в сплаве на никелевой основе* / С. З. Бокштейн, Е. В. Болберова, С. Т. Кишкин и др. // Докл. АН СССР. — 1980. — 253, № 6. — С. 1377–1379.
15. *Смиалек Дж. Л., Мейлер Дж. Х.* Высокотемпературное окисление // Суперсплавы II. Жаропрочные материалы аэрокосмических и промышленных энергоустановок: В 2 кн. — М.: Металлургия, 1995. — Кн. 2. — С. 8–48.

The feasibility of development of compositions of brazing mixtures was considered on the base of industrial brazing alloy VPr-36 by adding of brazing alloys of eutectic composition to it for reducing the brazing temperature to 1225...1230 °С and decreasing the hetero-phasing of forming welds. Microstructure of brazed weld metal and mechanical properties of joints made with technological gaps of 10 and 100 μm at test temperature of 20, 900 and 1000 °С were investigated. The good stability of mechanical properties was obtained at adding of brazing alloys Ni-12Si (NS12) and Ni-Co-Cr-Al-2.5 % B (#1) together with powders of high-temperature alloys ZhS32 or Rene 142 as a filler into the industrial brazing alloy VPr-36. 15 Ref., 4 Tables, 7 Figures.

Key words: repair brazing; casting alloys ZhS6K and ZhS6U; high-temperature brazing alloy VPr-36; brazing alloy Ni-Co-Cr-Al-2.5B; brazing alloy NS12; filler; depressant; brazed joint; strength; ductility; durability; weld metal; hardening γ' -phase; silicide phase; hetero-phasing

Поступила 14.05.2014