

УДК 621.791.3

Бугаенко Б. В., Бутурля Е. А., Костин А. М., Макаренко Н. О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИПОЯ ВПр36 ДЛЯ ПАЙКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ СУДОВЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Основным материалом для изготовления морских и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС). Использование сварки плавлением для соединения ЖНС не представляется возможным из-за возникновения горячих трещин, что связано с резким падением пластичности сплавов при нагревании выше 1200...1220 °С. Восстановление пластичности при охлаждении происходит при температуре около 1100 °С. В этом интервале пластичность близка к нулю, а уровень сварочных напряжений при охлаждении постоянно растет [1]. Наиболее универсальным способом соединения и исправления литейных дефектов является пайка.

Литейные ЖНС относятся к классу дисперсионно-твердеющих высокотемпературных материалов [2]. Основное упрочнение в них достигается когерентными частицами ($\leq 0,5$ мкм) γ' -фазы, которые образуются при распаде пресыщенной γ -фазы в процессе охлаждения с температуры ниже γ' -сольвуса. Обе фазовые составляющие имеют изоморфные ГЦК решетки. Вместе с упрочнением γ' -фазой в ЖНС реализуется дисперсионное упрочнение частицами карбидов и боридов различного типа, суммарный объем которых 1,5–2 %. Таким образом, фазовый состав ЖНС состоит из легированного γ -твердого раствора на основе никеля, интерметаллидной γ' -фазы, карбидов и боридов.

Отличие работы морских и авиационных ГТД состоит в том, что морские используют тяжелое топливо с примесями серы, а авиационные используют чистый авиационный керосин. Поэтому морские ГТД работают в условиях высокотемпературной солевой коррозии (ВСК), действие которой в десятки и сотни раз интенсивнее, чем в стандартных условиях работы авиационных турбин [3]. В авиационных турбинах концентрация хрома составляет до 8 %, а в судовых ГТД, учитывая ВСК, сплавы имеют концентрацию хрома до 18 %. С повышением содержания Cr снижается жаропрочность сплавов. Для повышения жаростойкости сплавов их легируют рядом элементов [3, 4], но рабочие температуры судовых ГТД ниже авиационных. Припой ВПр36, разработанный в ФГУП «ВИАМ» [5, 6], имеет высокую температуру пайки. Для его использования при пайке судовых ГТД необходимо понизить температуру плавления припоя. Это возможно путем ввода в ВПр36 дополнительно депрессантов, например, добавления в состав припоя Si. Кремний вводился путем добавления, разработанного в НУК, припоя НС-12 [7].

В работах [5, 6] исследовали различные припои, в том числе и ВПр36 для пайки монокристаллического сплава ВКНА-4У на основе Ni_3Al с деформируемым сплавом ЭП 975 в условиях соединения диска с лопатками, работа которых происходит при температуре 1000–1200 °С. Исследуемые припои обеспечивают хорошее смачивание и заполнение зазоров, однако имеют высокую температуру пайки и не пригодны для пайки жаропрочных сплавов судовых турбин. Поэтому снижение температуры пайки авиационных припоев и повышение их стойкости против ВСК является актуальным для судового газотурбостроения.

Температура пайки припоем ВПр36 является высокой и для некоторых авиационных сплавов. Так в работе [7] исследовали снижение температуры пайки жаропрочного сплава ЖС6У. Для этого к припою ВПр36 добавляли припой НС12, жаропрочный сплав Рене 142 и припой, содержащий 2,0–3,0 % мас. бора.

В работе [7] отмечается, что ВПр36 широко применяется в авиационном турбостроении в ЗМКБ «Прогресс» при температуре пайки 1250–1265 °С и времени выдержки 20 мин. При этом в шве выделяются крупные карбоборидные фазы Me (С, В) на основе Nb, W, стабильные при высокой температуре, частицы неправильной формы карбида Me₆C, помимо этого наблюдаются и борсодержащие эвтектики. Это является причиной хрупкого разрушения. В работе исследователи предложили способы повышения технологической пластичности паяных соединений, выполненных борсодержащими припоями, однако эти припои подвержены катастрофической коррозии в судовых турбинах. Суть данной работы состоит в легировании припоем НС12, имеющим более высокую стойкость против ВСК [1]. В работе [7] применялся припой ВПр36 в чистом виде для пайки пластин из сплава ЖС6К. При температуре 1230 °С положительного результата получить не удалось по причине не полного расплавления припоя и затекания в зазор 100 мкм. При увеличении температуры до 1245 °С и выдержке в 15 мин удалось добиться удовлетворительного результата по прочности и ограниченной пластичности. Так же отмечается, что при добавлении эвтектических составляющих, таких как НС12, удается не только снизить температуры ликвидуса, солидуса и интервал кристаллизации, но и разбавить Ni большого количества карбидообразующих компонентов. Соединение с использованием смеси 80 % ВПр-36 + 20 % НС12 разрушились хрупко при растяжении ниже предела текучести. Причиной называется перелегирование матричного раствора кремнием, что вызвало образование хрупких силицидных фаз.

Цель работы – исследование возможности применения припоя ВПр36 при пайке жаропрочных никелевых сплавов в судовых ГТД.

Задача работы – исследовать поверхностные свойства припоя и его химическое взаимодействие с основным металлом.

Для выполнения проверки возможности использования припоя ВПр36 при пайке судовых ГТД применялась механическая смесь ВПр36 и предлагаемого припоя НС-12, содержащего в качестве депрессанта кремний, повышающего стойкость против ВСК. Химический состав представлен в табл. 1, добавляли НС-12 в количестве 10, 20 и 30 %. Данные смеси испытывались на растекание при различных режимах для определения наиболее оптимального. Растекание смеси припоев выполнялось на пластине сплава СМ96, а установка навески припоя общей массой в 100 мг осуществлялась при помощи бутакриловой смолы, которая не влияла на химический состав и свойства материалов, позволяла надежно закрепить припой на образце, и испарялась в процессе нагрева до температуры пайки.

Таблица 1

Химический состав используемых припоев

Компоненты	Химический состав, % мас											
	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Re	Si	B	Ni
ВПр36	8,0–10,0	8,0–10,0	1,4–2,0	2,0–6,0	2,5–6,0	–	2,6–5,0	–	–	–	0,8–1,1	осн.
НС 12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	12,1	–	осн.

Нагрев образцов происходил в вакуумной печи СНВ-1.3.1/20И1, в которой установлены термопары платинородий-платина на дисках из армкожелеза диаметром 10 мм и толщиной 2 мм.

Исследования проводились с планированием эксперимента, представленным в табл. 2, при $T_{\text{пайки}} = 1200–1240$ °С. Количество НС-12 было 10, 20 и 30 % в смеси порошков (табл. 2).

Таблиця 2

План проведення експеримента

Номер опыта	x_1	x_2	x_{12}	y_1	y_2
1	1	1	1	y_1	y_2
2	-1	1	-1	y_1	y_2
3	1	-1	-1	y_1	y_2
4	-1	-1	1	y_1	y_2

где: x_1 – количество НС-12; x_2 – температура пайки; x_{12} – совместное влияние x_1 и x_2 ; y_1 – площадь растекания; y_2 – угол смачивания.

После выполнения растекания смеси припоев выполнялось фотографирование поверхности образцов (рис. 1, а) для определения площади растекания, затем изготавливался шлиф по диаметральной части капли припоя для измерения угла смачивания (рис. 1, б).

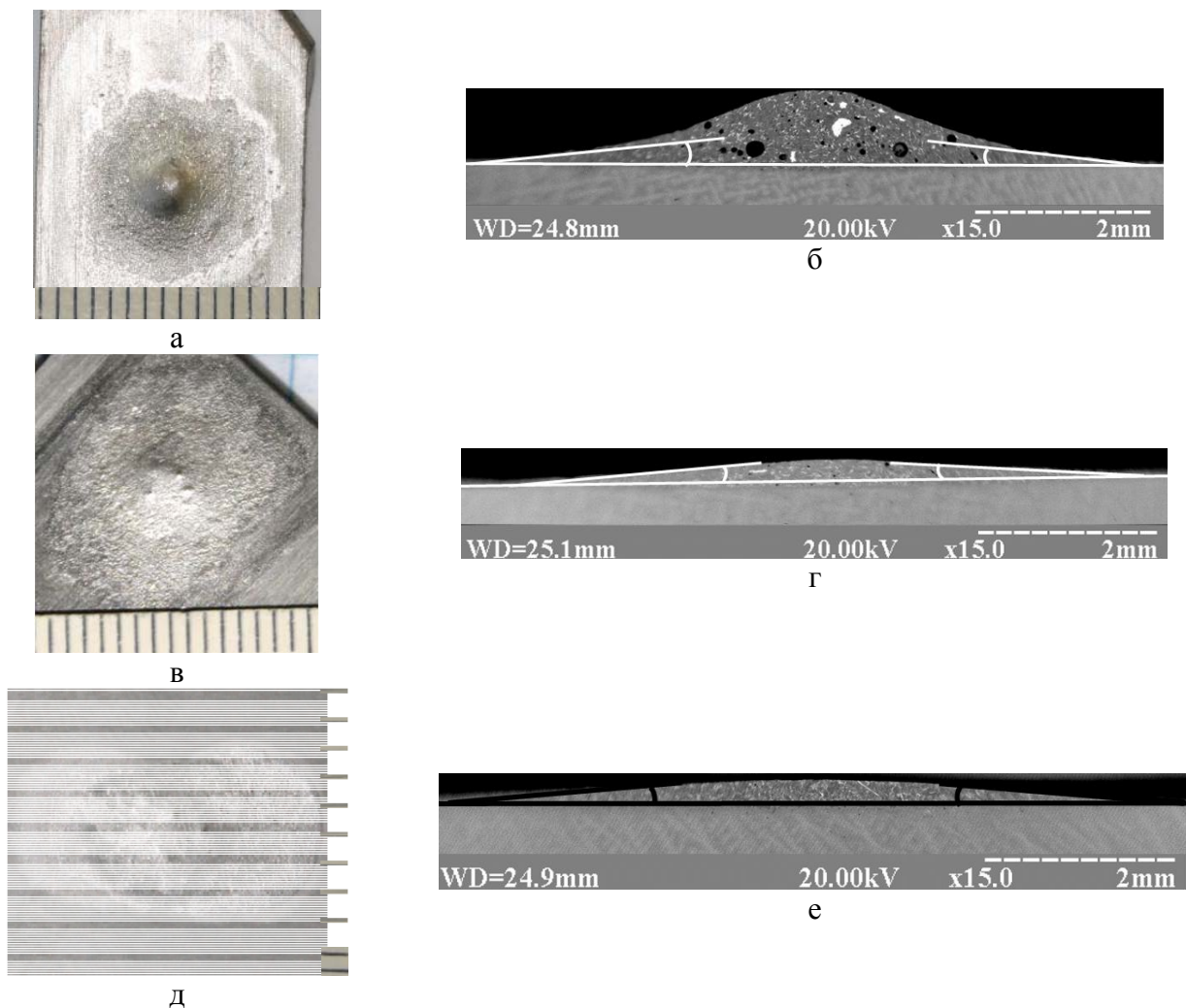


Рис. 1. Внешний вид образцов после пайки во время измерения площади растекания (а, в, д) и угла смачивания (б, г, е) при режимах 1200 °С, 1220 °С, 1240 °С соответственно

Для статистической обработки сравнительного анализа влияния факторов эксперимента, построены зависимости площади и угла смачивания от температуры и от количества НС-12 (рис. 2).

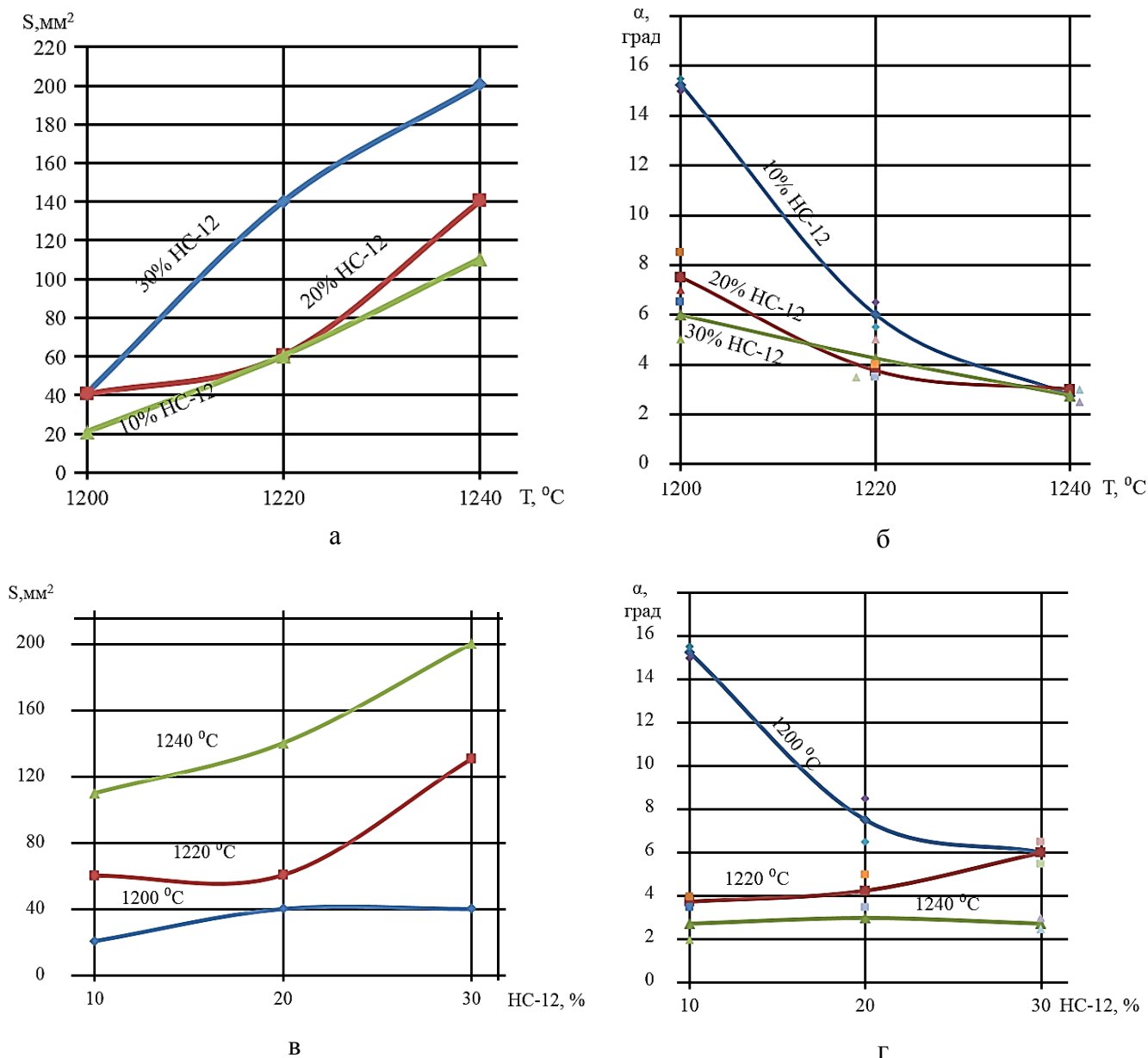


Рис. 2. Влияние температуры и концентрации HC-12 на площадь растекания (а, в) и угол смачивания (б, г)

Из полученных зависимостей видно, что при увеличении температуры площадь растекания капли припоя с добавкой 10 % HC-12 (а) увеличивается с 28 мм^2 при угле растекания 15° (б), для режима пайки при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, до 113 мм^2 с углом растекания 3° . При добавлении 20 и 30 % HC-12 площадь смачивания начинается от 40 мм^2 , с углами растекания 6° и $7,8^\circ$ соответственно, при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, и достигает значений в 140 и 200 мм^2 , соответственно, с углами в 4° , при температуре $1240 \text{ }^\circ\text{C}$. В то же время, рассматривая зависимости параметров растекания от количества HC-12 (в, г), видно, что его добавление при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивает площадь растекания раза, с 28 до 40 мм^2 , а угол смачивания падает с 15° до 6° , при этом добавление депрессанта больше 20 % не приносит никакого результата в увеличении площади растекания. В случае температуры $1220 \text{ }^\circ\text{C}$, при 10 и 20 % HC-12 площадь растекания остается в пределах 60 мм^2 с углом смачивания около 4° , однако при добавлении 30 % площадь растекания резко увеличивается 116 мм^2 , при этом на 2 градуса увеличился угол смачивания, в сравнении с меньшим количеством HC-12. Для температуры $1240 \text{ }^\circ\text{C}$

добавление НС-12 на угол смачивания почти не влияет, однако площадь растекания увеличивается в 1,8 раза, с 113 мм² до 200 мм². Следует отметить, что влияние концентрации НС-12 при температуре 1200 °С минимально, в сравнении с параметрами капли припоя при более высоких температурах. Также наблюдается более сильное влияние температуры на параметры капли припоя, в сравнении с добавлением НС-12. Для подтверждения этого были выполнены расчеты в рамках двухфакторного дисперсионного анализа с повторения, с использованием инструмента для дисперсионного анализа, встроенного в программе MS Excel 2016 (рис. 3).

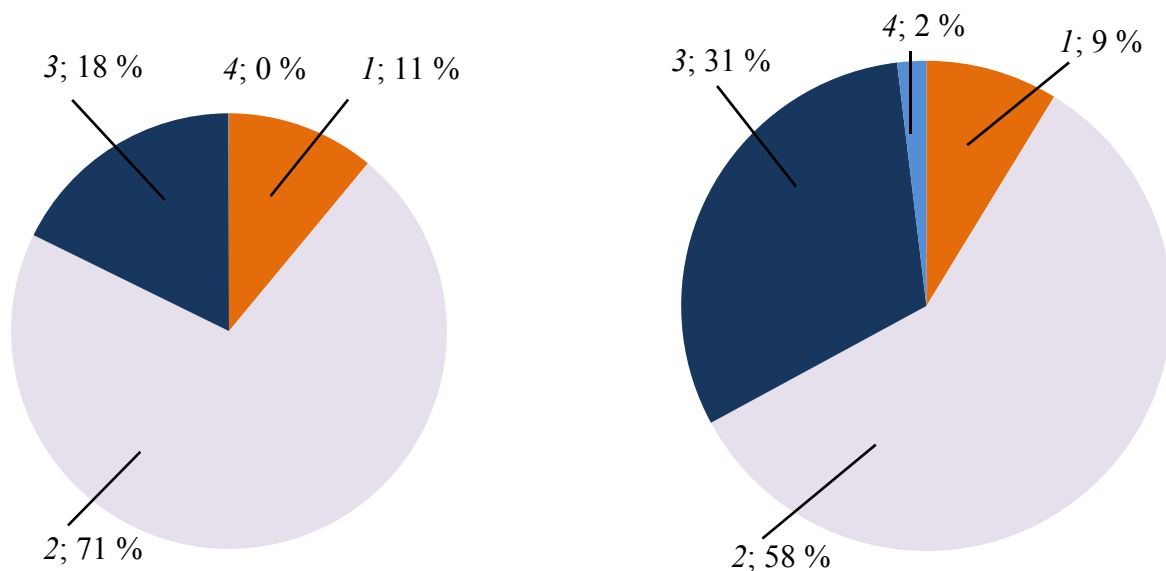


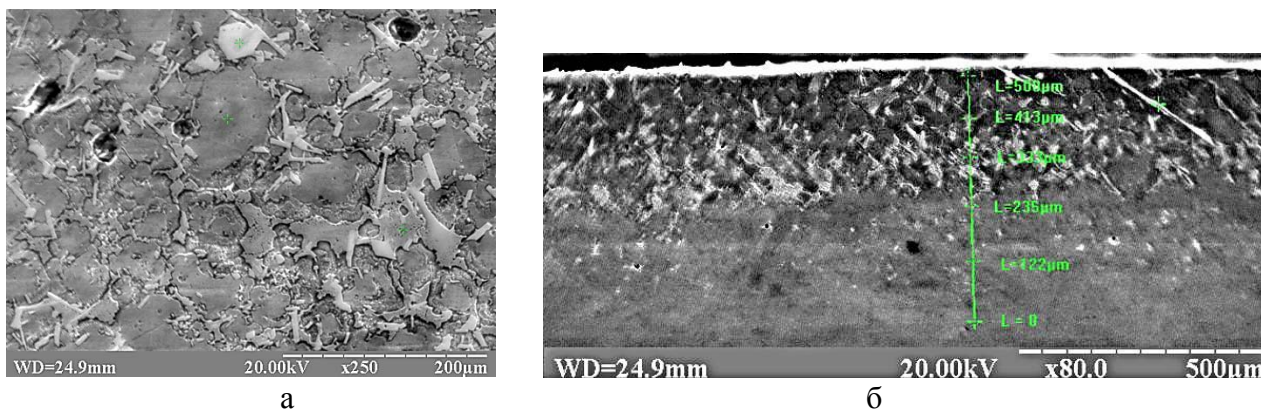
Рис. 3. Результаты расчета значимости коэффициентов для площади растекания (а) и угла смачивания (б), где:

1 – НС12; 2 – Температура; 3 – Совместное взаимодействие; 4 – Погрешность

По результатам дисперсионного анализа видно, что наибольшее влияние на площадь растекания и угол смачивания имеет температура, влияние которой составляет 71 % и 58 % соответственно. На втором месте по влиянию на параметры капли припоя для площади растекания является совместное взаимодействие температуры и количества припоя НС12 в подготовленной смеси и составляет 18 % для площади растекания, и 31 % для угла смачивания. Влияние количества НС12 на площадь растекания и угол смачивания в сравнении с температурой минимально и принимает участие в процессе на 11 % для площади растекания и 9 % для угла смачивания. Четвертой позицией расчета стоит погрешность проведения пайки, которые для площади растекания имеют ничтожно малое воздействие, а для угла смачивания составляют 2 %.

Дальнейшим этапом работы было исследование взаимодействия припоя с основным металлом и распределение химических элементов припоя по высоте и поверхности капли путем локального рентгеноспектрального микроанализатора РЕММА-102-02А. Для этого были подготовлены соответствующие шлифы.

Химический анализ микроструктуры припоя в зоне его сплавления с основным металлом показано на рис. 4, а и 4, б, соответственно. Исследование химического состава припоя по высоте капли в отдельных точках (рис. 4, б) показали, что в зоне сплавления концентрация кремния изменяется не равномерно, составляя в отдельных включениях до 4,0...5,0 %.



а

б

Рис. 4. Микроструктура припоя ВПр36, содержащего 10 % Ni12 при температуре пайки 1200 °С (а) и в зоне сплавления при температуре пайки 1240 °С при содержании 30 % Ni12 (б)

Распределение бора по объему припоя не установлено в связи с его малой атомной массой, но установлено наличие отдельных включений боридов тугоплавких металлов.

По результатам исследований рекомендован припой ВПр36 с добавлением 20 % припоя Ni12, температура пайки не должна превышать 1220 °С.

ВЫВОДЫ

Жаропрочные сплавы на никелевой основе в морских ГТД работают в более агрессивной среде в сравнении с авиационными турбинами, что вызывает необходимость применять сплавы и припои, способные противостоять ВСК, на уровне основного металла и с более низкой температурой пайки.

При использовании авиационного припоя ВПр36 температура пайки может быть снижена введением дополнительного депрессанта кремния, повышающего стойкость против ВСК.

По результатам экспериментов рекомендован припой ВПр36, содержащий 20 % припоя Ni12, при температуре пайки до 1200 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении / В. Ф. Квасницкий. – Л. : Судостроение, 1986. – 224 с.
2. Симс Ч. Т. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель. – М. : Металлургия, 1995. – Т. 1. – 384 с.
3. Вибір легуючого комплексу нового корозійного сплаву для соплових лопаток ГТД / Г. П. Мьяльниця, І. І. Максюта, Ю. Г. Квасницька, О. В. Михнян // Металознавство та обробка матеріалів. – 2013. – № 2. – С. 29–34.
4. Обеспечение фазово-структурной стабильности высокохромистых жаропрочных сплавов для лопаток ГТУ / Мьяльниця, Максюта, Нейма // Метал и литье. – 2012. – № 11. – С. 16–20.
5. Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП 975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-4У применительно к конструкции «Блиск» / В. И. Лукин, В. С. Рьльников, А. Н. Афанасьев-Ходыкин, О. Б. Тимофеева // Сварочные производства. – 2013. – № 7. – С. 19–25.
6. Афанасьев-Ходыкин А. Н. Технология получения неразъемных соединений из сплава ЖС 36 / А. Н. Афанасьев-Ходыкин, В. И. Лукин, В. С. Рьльников // Сварочное производство. – 2010, № 7. – С. 27–31.
7. Пайка в вакууме литого никелевого сплава ЖС6У композиционными припоями на основе ВПр36. Часть 1. / И. С. Малащенко, В. Е. Мазурак, Т. Н. Кушнарєва и др. // Современная электрометаллургия. – 2014. – № 4. – С. 49–58.

Статья поступила в редакцию 25.03.2019 г.