

В. В. Куренкова, И. С. Малашенко\*

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПАЙКА ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ БОРСОДЕРЖАЩИМ ПРИПОЕМ, ЛЕГИРОВАННЫМ КРЕМНИЕМ

Сущность работы заключается в нейтрализации негативного влияния бора в композиционном припое Ni—Co—Cr—Al—2,5% (мас.) В — наполнитель-сплав Rene-142 введением в него 15—25% (мас.) припоя Ni—12% Si эвтектического состава. Объемная доля дисперсных карбоборидных фаз после термообработки составляет  $f = 4,2—5,9\%$ , близкая к глобулярной форма карбидных частиц позволила повысить технологическую пластичность и прочность паяных соединений (ПС). Исследованы микроструктура, фазовый состав, прочность и пластичность металла ПС сплавов ЧС70ВИ, ВЖЛ12У, ЖС26ВИ и НК. Добротность ( $\sigma_b^{ПС}/\sigma_b^{ОМ}$ ) ПС, полученных с применением бор- и кремнийсодержащего припоя, при 20 °С в зависимости от вида паяемых сплавов составляла 0,92—1,0 при относительном удлинении  $\epsilon = 4—17\%$ .

### Введение

В процессе эксплуатации детали горячего тракта турбин, в первую очередь, направляющие и рабочие лопатки, подвергаются коррозионному, эрозионному и термоусталостному разрушению в условиях циклически изменяющихся температур, центробежных нагрузок и воздействия продуктов сгорания газотурбинного топлива. Для продления ресурса этих дорогостоящих деталей применяют ремонтные технологии, например пайку [1—5]. Она является прогрессивным методом восстановления деталей, выполненных из литейных никелевых жаропрочных сплавов (ЖС) современных газотурбинных установок, а также для создания нового типа конструкций [5—8]. Применение пайки исключительно важно и экономически оправдано.

В настоящее время перспективным для продления ресурса деталей турбин является использование композиционных припоев, состоящих из низкоплавкого припоя, содержащего различные депрессанты, и порошковых наполнителей из никелевых ЖС: ЧС70ВИ, IN-738, Rene-142, ЖС6У, ЖС32 и др. Такие припои способствуют приближению химического состава ремонтных зон к паяемому металлу и обеспечивают паяным соединениям (ПС) достаточную жаропрочность и жаростойкость. Широко известны системы припоев, в которых в качестве депрессантов выступают бор и кремний отдельно или совместно [2, 6]. Однако из-за тенденции образования в паяных швах боридных эвтектик или хрупких силицидных фаз при использовании одного депрессанта обеспечить сочетание нужных прочностных свойств и пластичности паяным соединениям затруднительно. Поэтому целесообразно детально рассмотреть совместное поведение бора и кремния в сложнолегированных композиционных припоях на структуру и служебные характеристики ПС.

\* В. В. Куренкова — младший научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев; И. С. Малашенко — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, там же.

С использованием композиционных припоев на основе жаростойкой системы Ni—Co—Cr—Al—2,5% (мас.) В\* (№ 1) с различным содержанием (40—60% (мас.)) наполнителя из порошкового сплава Rene-142 создана технология для ремонта пайкой деталей из никелевых ЖС. Изменяя состав борсодержащего припоя введением наполнителей в виде порошков Rene-142, ЧС70ВИ или ЖС6У и используя двухступенчатую термообработку в вакууме, удалось достичь удовлетворительных служебных свойств при испытании паяных соединений никелевых сплавов на растяжение при 20 и 800—1000 °С, однако при этом ПС разрушались хрупко. Поэтому необходимо было изучить возможное влияние на структуру паяных швов и, соответственно, на физико-механические характеристики ПС вводимого второго депрессанта. Важным являлось исследование совместного действия бора и кремния в металле шва и на границе сплавления при высокотемпературной пайке никелевых ЖС различного уровня легирования.

### *Материалы и методы исследования*

Образцы для механических испытаний изготавливали из соединений, полученных высокотемпературной пайкой в вакууме  $6,5 \cdot 10^{-3}$  Па. Паяные соединения формировались в специальной оснастке с исходными зазорами 100—200 мкм. Технологические зазоры шириной 300—850 мкм получали электроэрозионным способом, выполняя надрезы в плоских заготовках и в реальных лопатках для последующей запайки.

В состав композиционных припоев входил либо один низкоплавкий борсодержащий припой с наполнителями, либо припой, содержащие кремний — Ni—12% (мас.) Si (HC12) и бор одновременно. В качестве базового использовали припой Ni—9Co—14Cr—4Al—2,5B (№ 1) пр-ва фирмы “PRAXAIR Surface Technologies” (США). Уменьшение растворения основного металла в расплаве припоя обеспечивали введением в паяльную смесь наполнителей из порошков сплавов ЧС70ВИ, Rene-142, ЖС6У, ЖС32.

Базовым экспериментом выступал термический анализ, позволяющий оценить по тепловым эффектам структурные изменения в применяемых припоях в процессе плавления-кристаллизации. Дифференциальным термическим анализом (ДТА) определяли характеристические температуры — солидуса  $T_S$  и ликвидуса  $T_L$  композиционных припоев, а также влияние соотношения компонентов в комплексных припоях на их плавление-кристаллизацию. Термический анализ проводили на установке ВДТА-8М в среде гелия с постоянной скоростью нагрева—охлаждения, равной 80 К/мин. Заполнение камеры гелием до  $(0,8—0,9) \cdot 10^5$  Па производили после предварительной откачки камеры до разрежения не менее  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$  мм рт. ст.). При этом “промывку” камеры повторяли дважды.

Изучали процессы плавления-кристаллизации порошков низкоплавкого припоя № 1, порошка наполнителя Rene-142 и композиционных припоев с добавлением порошка эвтектического состава

---

\* Здесь и далее составы припоев приведены в % (мас.).

Ni—12Si, в котором кремний используется как депрессант. Рентгенодифракционные измерения выполняли в стандартной геометрии  $\vartheta$ — $2\vartheta$  на дифрактометре ДРОН-4 в  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении. Для исследования исходного состояния использовали образцы в виде слиточков припоев после кристаллизации. Для повышения точности определения межплоскостных расстояний применяли соль  $\text{CaF}_2$  в качестве стандарта. Соль, растворенная в лаке, наносилась на исследуемую поверхность образца.

Микроструктуру образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе CamScan-4, для анализа химического состава металла шва паяных соединений использовали энергодисерсионный спектрометр Energy-200 с программой INCA. Прочность и пластичность плоских паяных образцов при комнатной и высокой температурах исследовали при испытаниях на одноосное растяжение со скоростью перемещения захвата 1 мм/мин. Долговечность паяных соединений при 900 °С и напряжении 196 МПа определяли на установке МП-3Г.

### *Полученные результаты и их обсуждение*

Припой (№ 1) ( $T_L = 1170$  °С), содержащий в качестве депрессанта только один бор, при пайке характеризуется углом смачивания  $\theta \approx 9$ — $10^\circ$ . Проникающая способность компонентов расплава в никелевые сплавы составляла 850—1000 мкм с выделением на линии сплавления и в паяемой основе большого количества боридных фаз. Введение в припой порошкано-наполнителя увеличивает вязкость расплава и ограничивает его проникновение в основу. В случае применения композиционного припоя № 1—Rene-142 угол смачивания изменялся от 8,5— $9,5^\circ$  (при 40% (мас.) Rene-142) до  $21^\circ$  (при 60% (мас.) Rene-142). При этом глубина проникновения компонентов припоя в основу уменьшалась до 750—800 мкм.

Наибольшую смачиваемость паемых подложек обеспечивают эвтектические системы припоев, когда краевой угол смачивания расплава составляет  $\theta \leq 3^\circ$ . Оптимальной системой припоя по минимальному значению краевого угла смачивания ( $3^\circ$ ) и минимальному проникновению в паяемую основу оказалась композиция 20№ 1—20HC12—60Rene-142, рис. 1. Наличие кремния в предложенном составе комплексного припоя способствовало хорошему растеканию по поверхности подложки и затеканию в зазоры.

При содержании бора  $\geq 1,0\%$  (мас.) область фронтального образования боридов хрома ниже линии сплавления в паяемой основе находилась на уровне 150—300 мкм. В случае применения припоя № 1—20HC12—60Rene-142 проникновения бора в основу практически не наблюдали даже вблизи линии сплавления, а количество карбоборидных эвтектических фаз в шве существенно уменьшалось.

Когда в борсодержащую композицию № 1—Rene-142 вводили второй депрессант Si в виде эвтектики Ni—12Si (HC12), содержание бора и кремния в расплаве припоя оказывалось на нижнем уровне, а именно: 0,35—0,5B, 2—2,4Si. Использование припоя HC12 базируется на ряде особенностей, присущих эвтектическим сплавам. Сужение интервала

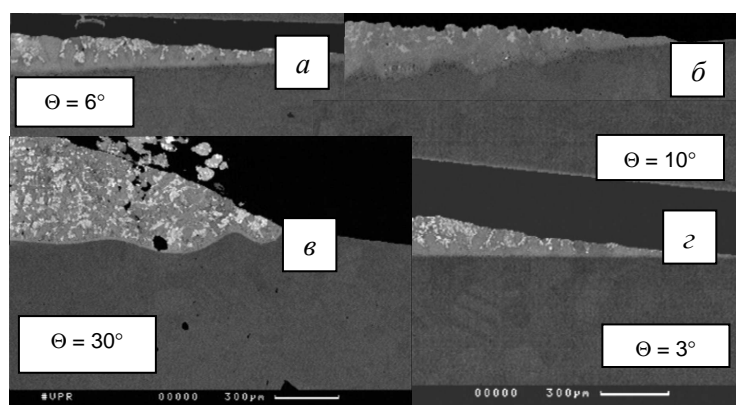


Рис. 1. Растекание припоев: *a* — 70ВПр11—30Rene-142; *б* — № 1—40Rene-142; *в* — ВПр-24; *г* — № 1—20HC12—60Rene-142

Fig. 1. Spreading of braze alloys: *a* — 70ВПр11—30Rene-142; *б* — № 1—40Rene-142; *в* — ВПр-24; *г* — № 1—20HC12—60Rene-142

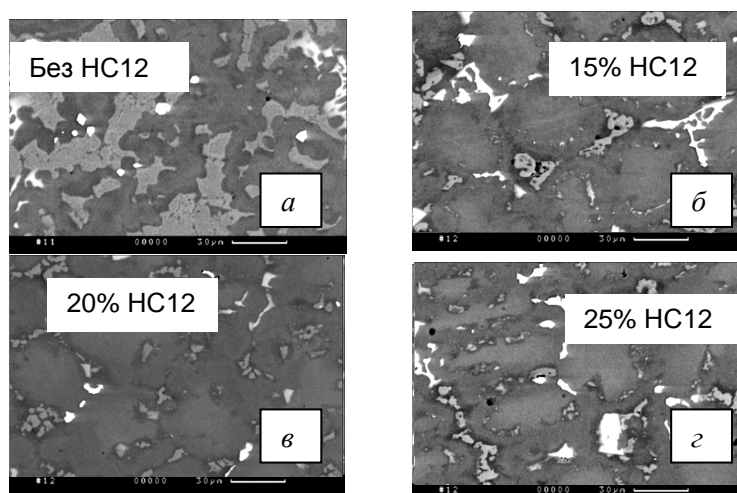


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла закристаллизовавшихся образцов комплексных припоев № 1—60Rene-142 (*a*) с различным содержанием HC12: *б* — 15; *в* — 20; *г* — 25

Fig. 2. Microstructure ( $\times 500$ ) of metal of solidified samples of complex braze alloys № 1—60Rene-142 (*a*) with different content of HS12: *б* — 15; *в* — 20; *г* — 25



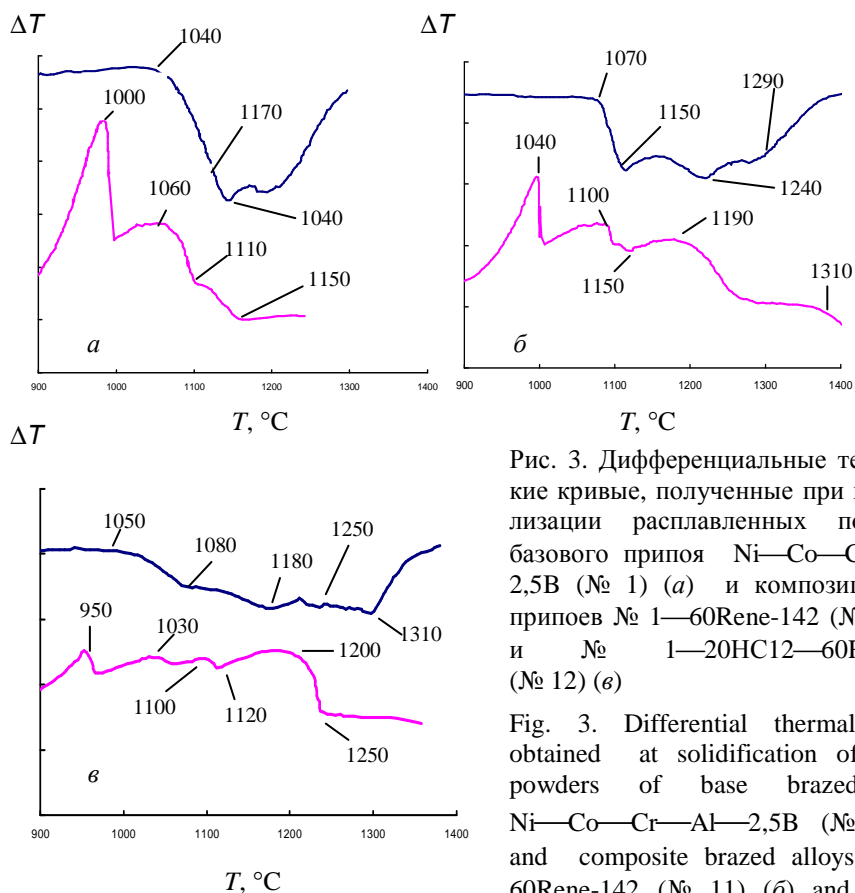


Рис. 3. Дифференциальные термические кривые, полученные при кристаллизации расплавленных порошков базового припоя Ni—Co—Cr—Al—2,5B (№ 1) (а) и композиционных припоев № 1—60Rene-142 (№ 11) (б) и № 1—20HC12—60Rene-142 (№ 12) (в)

Fig. 3. Differential thermal curves obtained at solidification of molten powders of base brazed alloy Ni—Co—Cr—Al—2,5B (№ 1) (a) and composite brazed alloys № 1—60Rene-142 (№ 11) (b) and № 1—20HC12—60Rene-142 (№ 12) (c)

кристаллизации эвтектических сплавов способствует повышению жидкотекучести, уменьшению усадки, склонности к ликвации и ограничивает образование пор и кристаллизационных трещин.

По структуре закристаллизовавшегося припоя № 1 (рис. 2) и интенсивности пиков на кривой ДТА (рис. 3) видно, что в ГЦК никелевом матричном растворе содержится большое количество эвтектик типа  $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>B и  $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>B + CrB. Боридные эвтектики, особенно содержащие CrB, негативно влияют на пластические и прочностные характеристики паяных соединений. Образуя бориды и карбобориды, бор охрупчивает кристаллизующийся припой, а наличие легкоплавких боридных эвтектик повышает риск оплавления ПС при их финишной термообработке. Интенсивно диффундируя в основной металл, бор вызывает эрозию паяемой основы [9].

При введении в исходный низкоплавкий припой № 1 (Ni—Co—Cr—Al—2,5B) в качестве наполнителя порошка сплава Rene-142 наблюдали увеличение температур  $T_S$  и  $T_L$  (табл. 1) и расширение интервала кристаллизации композиционных припоев (рис. 3, в). Массовая доля бора в расплаве уменьшалась до 1%, вследствие чего низкотемпературный пик, соответствовавший образованию тройной низкотемпературной эвтектики  $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>B + CrB, на кривой ДТА практически отсутствовал.

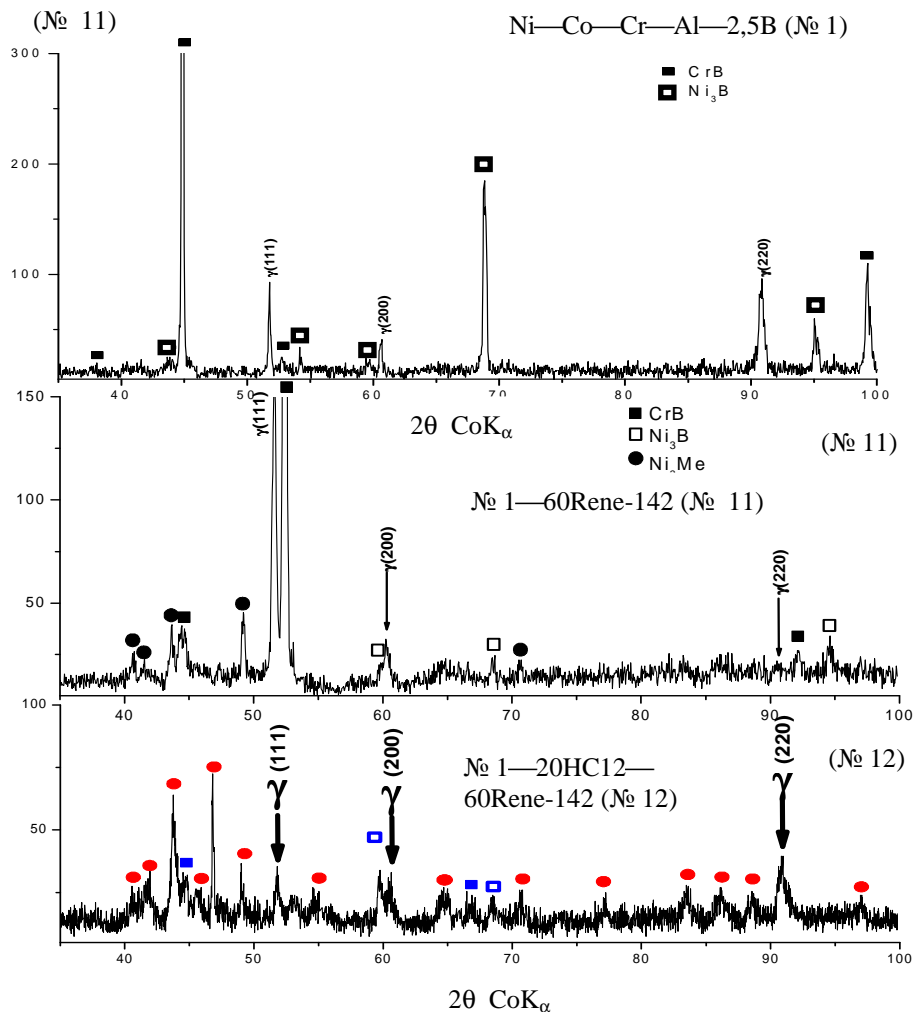


Рис. 4. Диффрактограммы припоев № 1—60Rene-142 без и с добавкой кремния 20НС12

Fig. 4. Diffractograms of braze alloys of № 1—60Rene-142 without silicon with addition of 20NS12

Вместе с тем доля вторичных составляющих (квазибинарных эвтектик на основе Cr в виде  $\gamma$ -твердого раствора и интерметаллидов на основе хрома с частичным замещением W, Mo, Re и междендритных сложнолегированных эвтектик, основой которых выступает  $\gamma + \text{Ni}_3\text{B}$ ) в твердом растворе припоя сохраняется достаточно большой, достигая ~40% (об.) (рис. 2, а, рис. 3, б). Окончательная термообработка не обеспечивала необходимого запаса пластичности паяным соединениям с большим количеством боридных фаз — все образцы при растяжении хрупко разрушались.

Благодаря легированию припоя 40№ 1—60Rene-142 (№ 11) порошком HC12 изменялась структура и фазовый состав металла формируемых

Т а б л и ц а 1. Исследованные комплексные припои и их основные характеристические температуры (в соответствии с данными ДТА)

T a b l e 1. Systems of studied composite braze alloys and their main characteristic temperatures (in keeping with DTA data)

Припой	Химический состав	Температуры, °С		
		Солидус $T_s$	Ликвидус $T_L$	Интервал кристаллизации и $\Delta T$
1	Ni—Co—Cr—Al—2,5B	1040	1170	130
Ni—365—3	Rene-142	1310	1410	100
НС-12	Ni—12Si	1140	1160	20
11	40№ 1—60Rene-142	1070	1310	240
12	20№ 1—20НС12—60Rene-142	1050	1250	200
13	25№ 1—15НС12—60Rene-142	1030	1260	230
14	15№ 1—25НС12—60Rene-142	1050	1250	200

паяных швов. Кремний уменьшал объемную долю и размер вторичных упрочняющих фаз в затвердевшем припое, способствовал дискретному характеру их распределения по границам дендритов (рис. 2, в). Кристаллизация бор- и кремнийсодержащего припоя протекает с меньшей скоростью в результате сужения интервала кристаллизации на 40—50 °С. Ввиду увеличения относительной концентрации никеля в шве при добавлении припоя НС12 содержание бора в расплаве уменьшается до 0,5% (мас.), поэтому объемная доля выделяющихся в шве боридов снижается. В закристаллизованной структуре штриховые эвтектики  $\gamma$ -Ni + CrB не выявлялись, а остаточные эвтектики типа  $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>B обнаруживались в виде изолированных включений в матрице шва. Уменьшение объемной доли боридных эвтектик до 5—7% (об.) в припое № 12 по сравнению с 35—40% в борсодержащем припое № 11 является положительным результатом легирования расплава припоя кремнием. Боридные эвтектики охрупчивают ПС при 20 °С, а при температуре отжига ~1080—1160 °С расплавляются и выпотевают из шва, вследствие чего в металле паяных швов возникают поры и раковины.

Оптимальным, исходя из объемной доли сохраняющихся боридных и карборидных фаз в металле паяных швов, оказался припой № 12: № 1—20НС12—60Rene-142 (рис. 2, в). При таком количестве НС12 получали структуру затвердевшего припоя с минимальной ликвационной неоднородностью.

На рентгенодифракционных картинах базового припоя № 1, борсодержащего композиционного припоя № 11 и бор- и кремнийсодержащего припоя № 12 наблюдаются линии  $\gamma$ -матричного

раствора на основе никеля и двух типов боридов CrB и Ni<sub>3</sub>B (рис. 4). Объемная доля вторичных фаз в борсодержащем припое № 11 была больше, чем в  $\gamma$ -растворе. По интенсивности линий, идентифицированных как CrB, установлено, что наибольшая объемная доля этой составляющей соответствовала припою Ni—Co—Cr—Al—2,5B (№ 1) и композиции № 1—60Rene-142 (№ 11). Связывание хрома в боридные соединения CrB приводит к потере жаростойкости припоя, поскольку уменьшается содержание хрома в матрице шва. В припое с кремнием интенсивность рентгеновских линий боридных фаз была незначительной, соответственно их количество в металле шва снижено. В таком припое бор выделяется в основном в виде дисперсных частиц Ni<sub>3</sub>B размером 0,3—0,7 мкм как по осям дендритов, так и в междендритных областях. Борид Ni<sub>3</sub>B имеет структуру цементитного, то есть дисперсионно-упрочняющего типа. Кремний стабилизирует, согласно Гольдшмидту [10], борид Ni<sub>3</sub>B и как компонент, расширяющий кристаллическую решетку, способствует частичному внедрению бора в решетку цементита.

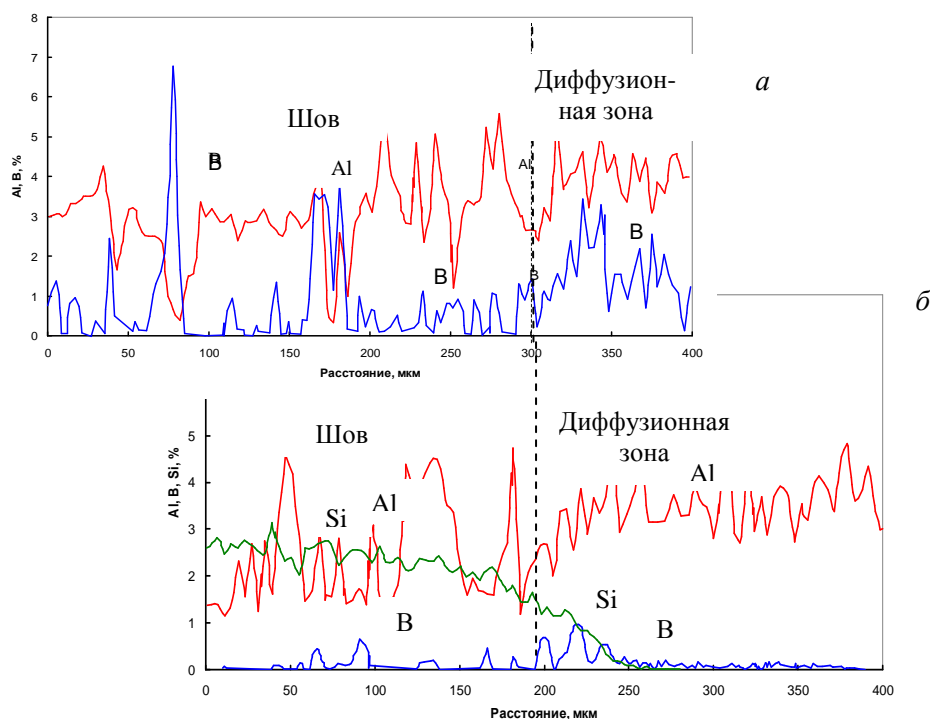


Рис. 5. Распределение элементов на границе шов—основа в ПС ЖС26 с применением припоев № 1—60Rene-142 без (а) и с кремнием (б)

Fig. 5. Element distribution on weld—base interface in ЖС26 with application of № 1—60Rene-142 braze alloys without (a) and with silicon (b)

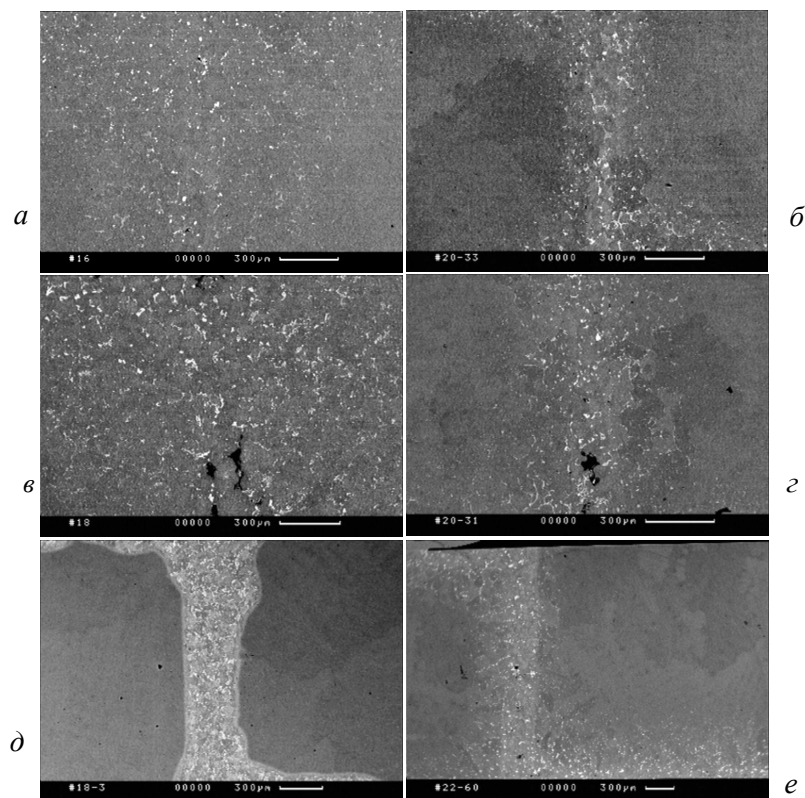


Рис. 6. Микроструктура паяных соединений ВЖЛ12У, сформированных при 1220 °С (10 мин) и после термообработки, полученных с применением различных композиционных припоев: *a* — 60№ 1—40Rene-142; *б* — 50№ 1—50Rene-142; *в* — 50№ 1—25Rene-142—25ЖС6У); *г* — 50№ 1—(35Rene-142—15ЖС6У); *д* — ВПр-24; *е* — (НС12—№ 1)—60Rene-142

Fig. 6. Microstructure of ВЖЛ12У brazed joints produced at 1220 °С (10 min) with heat treatment and application of different composite braze alloys: *a* — 60№ 1—40Rene-142; *б* — 50№ 1—50Rene-142; *в* — 50№ 1—25Rene-142—25ЖС6У); *г* — 50№ 1—(35Rene-142—15ЖС6У); *д* — ВПр-24; *е* — (НС12—№ 1)—60Rene-142

Методами сканирующей дифракционной микроскопии установлено, что кремний, полностью растворяясь (до 2,4% (мас.)) в никель-хромовом твердом растворе припоя, уменьшает уровень внутренних напряжений в кристаллической решетке. Это выражается в уменьшении параметра решетки  $\gamma$ -раствора с  $a_\gamma = 0,3566$  нм (для борсодержащего припоя) до 0,3549 нм (для припоя, легированного кремнием).

Для композиционного припоя № 12 на рентгенодифрактограмме наблюдаются пики интенсивности, соответствующие интерметаллидной фазе  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Al, выделившейся из твердого раствора при охлаждении. Ее объемная доля существенна уже при кристаллизации в сравнении с борсодержащим припоем (№ 11), где указанные пики практически не обнаруживаются.

Один из самых положительных моментов введения кремния — это ограничение диффузионной активности бора из паяного шва в паяемую подложку. Глубина диффузии бора в случае применения только одного депрессанта — бора — составляла 100—200 мкм. Кремний, диффундируя в основу всего на 25—40 мкм, ограничивает диффузию бора на глубину до 50 мкм (рис. 5). Ограничивая растворимость бора, кремний, полностью находящийся в матрице (до 2,4% (мас.)), стимулирует связывание бора в химические соединения и, таким образом, удерживается в шве в основном в частицах Ni<sub>3</sub>B или в случае широких зазоров — в виде дискретно изолированных эвтектики  $\gamma$ -Ni + Ni<sub>3</sub>Al [1].

Первым объектом исследований механических свойств являлся сплав ВЖЛ12У, из которого отливают створки регулируемого сопла АГТД. Из реальных деталей после 500 ч эксплуатации вырезались пластины. Температура пайки соединений составляла 1210—1220 °С, время изотермической выдержки — 10—15 мин. Фактический зазор составлял 100—300 мкм. После пайки заготовки отжигали по двухстадийному режиму: 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (2 ч). Испытания проводили на плоских образцах сечением 3x1,7 мм<sup>2</sup> с длиной рабочей части 10 мм. В качестве базового значения уровня прочности сплава ВЖЛ12У использовали величину  $\sigma_b = 850$  МПа в соответствии с усредненными литературными данными. В припоях использовали различное количество наполнителя Rene-142. Наличие Ta, Re, Hf в составе наполнителя припоя делает металл шва высокопрочным, окалиностойким и обеспечивает повышенную высокотемпературную прочность паяного соединения (рис. 6).

Наиболее стабильные результаты по прочности ПС были получены, когда пластины ВЖЛ12У паяли композиционными припоями двух типов: с наполнителем Rene-142 (50% (мас.)) и с бинарным наполнителем 35Rene-142—15 ЖС6У [11—13].

Несмотря на хорошие прочностные характеристики, пластичность сформированных швов составляла 0—1,5%. Это вызвано наличием в структуре швов большого количества карбоборидных и сложнoleгированных междендритных эвтектик (рис. 7, а). Хрупкие составляющие в количестве до 40% (об.) полностью не исчезали и после двухступенчатой термообработки (рис. 6, б, табл. 2).

Для улучшения жидкотекучести относительно вязкого композиционного припоя № 1—Rene-142, заполняемости зазоров (трещин) без образования микропор и ослабления реакционной способности борсодержащего припоя в паяльную композицию вводили промышленный припой НС12 в количестве 10—25% (мас.). Исследовали его влияние на механические свойства паяных соединений и структуру шва (рис. 8).

**Т а б л и ц а 2. Химический состав фаз в металле швов ПС, полученных с применением двух видов припоев в процессе изотермической пайки при  $T = 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 мин**

**Table 2. Chemical composition of phases in the weld metal of BJ produced with application of two kinds of braze alloys during isothermal brazing at  $T = 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 min**

Спектр	Содержание компонентов, % (мас.)													
	C*	Al	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Hf	Ta	W	Re	Nb	Ti	Si
№ 1—50Rene-142 (а) без отжига														
1	-	5,33	11,3	5,98	9,87	64,73	0,67	-	-	2,13	-	-	-	-
2	2,02	4,93	10,84	8,14	9,05	64,98	0,31	-	-	1,75	-	-	-	-
3	-	2,36	7,45	6,77	11,2	63,91	0,49	2,22	5,6	-	-	-	-	-
4	-	4,65	8,85	7,96	9,68	65,85	-	-	1,07	1,93	-	-	-	-
5	4,05	4,29	7,77	7,54	9,04	63,58	0,34	-	1,76	1,62	-	-	-	-
6	3,61	-	55,1	4,4	5,57	10,98	3,37	-	-	9,9	7,08	-	-	-
7	3,37	-	60,53	3,87	4,93	6,56	3,26	-	-	9,57	7,92	-	-	-
8	3,17	1,92	6,26	5,49	11,04	60,72	0,41	3,54	6,62	0,83	-	-	-	-
9	-	3,38	23,09	7,16	8,17	50,65	0,99	-	-	4,26	2,3	-	-	-
№ 1—20HC12—60Rene-142 (б) без отжига														
1	2,68	4,62	6,82	0,43	8,9	64,26	1,05	-	2,54	3,47	3,32	-	-	1,9
2	2,15	4,46	6,9	0,55	9,14	66,07	0,76	1,52	2,06	3,34	2,39	-	-	2,19
3	3,65	2,49	6,01	0,64	9,9	66,99	-	-	3,39	1,63	-	-	-	3,77
4	4,45	-	36,62	-	3,5	5,48	7,74	-	-	16,4	25,8	-	-	-
5	3,39	0,81	5,36	-	11,47	68,95	-	-	10,0	-	-	-	-	-
6	9,47	-	31,01	-	4,77	8,25	11,4	-	4,48	16,9	13,8	-	-	-
7	2,5	4,49	6,79	0,56	9,25	65,39	0,63	-	2,66	4,17	1,9	-	-	1,65
8	5,03	-	30,34	-	2,71	6,57	8,2	-	0,44	22,4	24,3	-	-	-
№ 1—60Rene-142 (в) после отжига 1160 °C, 2 ч														
1	1,62	6,23	6,93	0,68	11,3	66,26	1	-	1,13	-	-	0,51	4,35	-
2	2,14	0,84	8,32	0,65	19,99	53,77	0,81	3,83	1,7	0,59	-	2,05	5,31	-
3	2,6	0,88	8,1	0,95	20,45	54,67	0,61	3,12	1,35	-	-	1,96	5,29	-
4	7,86	-	36,0	0,46	5,26	6,65	26,7	-	0,98	8,59	3,48	1,37	2,63	-
5	5,48	-	50,1	0,42	7,1	7,24	18,5	-	0,65	4,47	3,13	0,78	2,16	-
6	5,19	0,38	29,1	0,3	5,94	15,8	24,9	-	1,4	9,5	4,4	0,47	2,71	-
7	6,4	0,29	30,61	0,42	4,72	7,83	28,8	1,24	0,34	11,4	4,07	1,38	2,44	-
8	18,96	-	1,06	-	0,49	3,01	7,28	-	25,2	8,69	-	10,5	24,8	-
9	17,68	0,39	0,86	0,16	0,55	3,14	6,44	-	25,6	8,94	-	11,2	25,1	-

\*Углерод дан качественно ввиду ошибки прибора (нагорания на образце) для определения типа структурных фаз.

Закристаллизовавшийся матричный раствор шва при использовании припоя № 1—Rene-142 содержал 39—44% вторичных фаз, представляющих собой карбобориды эвтектического типа, бориды и сложнелегированные эвтектики (см. рис. 4, 8, а, в). После затвердевания в матричном растворе припоя № 1—Rene-142 были выявлены грубые карбобориды хрома  $\text{Cr}_{21}(\text{W}, \text{Mo}, \text{Re})_2(\text{C}, \text{B})_6$  эвтектического происхождения следующего химического состава: Cr — 55—60, W — 9—10%, Mo — (3—3,5), Re — 7—8 и развитые пограничные сложнелегированные эвтектики, имеющие в своем составе Co, Cr, Ni, Ta, W и др. (рис. 7, 8, табл. 2).

Достигнутая прочность ПС, содержащих одновременно Si и B в припоях, находилась примерно на одном уровне и составила 850—900 МПа (рис. 9). Статистическая обработка результатов испытаний на растяжение при 20 °C ПС, полученных двумя видами припоев (без и с кремнием), представлена на рис. 10. Наблюдали заметное различие не только в уровне, но и в стабильности значений прочности. Более

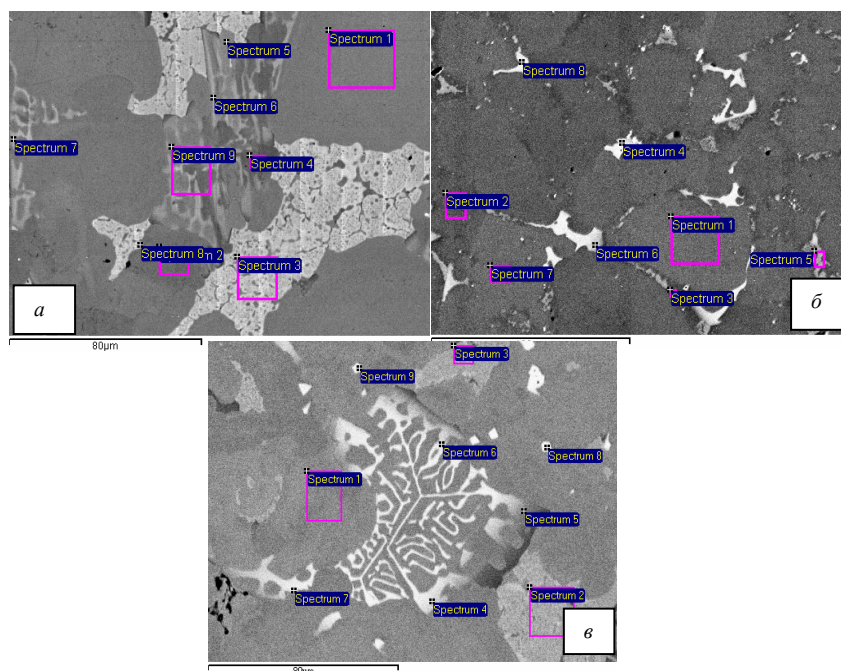


Рис. 7. Участки рентгеноспектральных снимков отдельных фаз, составляющих металл шва паяных соединений, выполненных при  $T = 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$  (20 мин) с применением различных припоев ( $\times 600$ ): *a* — № 1—50Rene-142 (без отжига); *б* — № 1—20НС12—60Rene-142 (без отжига); *в* — № 1—60Rene-142 (после отжига при  $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 ч)

Fig. 7. Areas of X-Ray microprobe analysis of individual phases making up the weld metal of brazed joints produced at  $T = 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$  (20 min) with application of various braze alloys ( $\times 600$ ): *a* — № 1—50Rene-142 (without annealing); *б* — № 1—20NS12—60Rene-142 (without annealing); *в* — № 1—60Rene-142 (after annealing  $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 h)

шестидесяти процентов испытанных образцов, спаянных комплексным припоем, содержащим кремний, имели предел прочности, соответствовавший временному сопротивлению основного металла.

Тенденция сохранения пластичности (относительного удлинения) соединений была наиболее выражена для комплексного припоя 20№ 1—20НС12—60Rene-142 (рис. 11). Поэтому данная композиция припоя рассматривалась нами как наиболее эффективная с позиции сочетания прочности и пластичности ПС в случае ремонта изделий из сплава ВЖЛ12У.

Минимальный уровень добротности паяных соединений с 20% (мас.) НС12, испытанных на воздухе при  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , составил 0,72, максимальный — 0,87.

Кремний повысил дисперсность карбоборидных фаз и однородность их распределения в матрице шва. Уменьшение количества грубых карбоборидных частиц в междендритных областях способствует



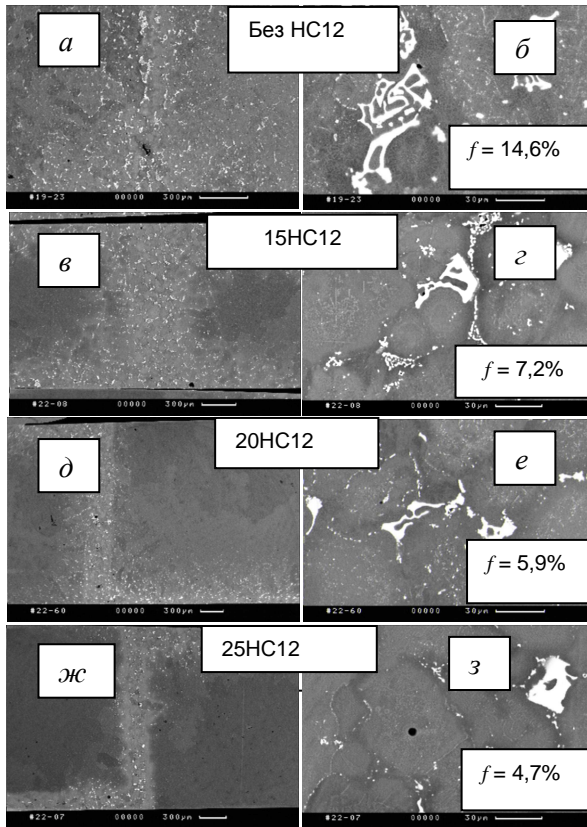


Рис. 8. Микроструктура паяных соединений, сформированных при 1210—1220 °С (20—10 мин) и отожженных по двухступенчатому режиму с применением композиционных припоев № 1—60Rene-142 ( $\times 25$ ;  $\times 500$ )

Fig. 8. Microstructure of brazed joints produced at 1210—1220 °С (20—10 min) and annealed by the two-stage mode with application of composite braze alloys based on № 1—60Rene-142 ( $\times 25$ ;  $\times 500$ )

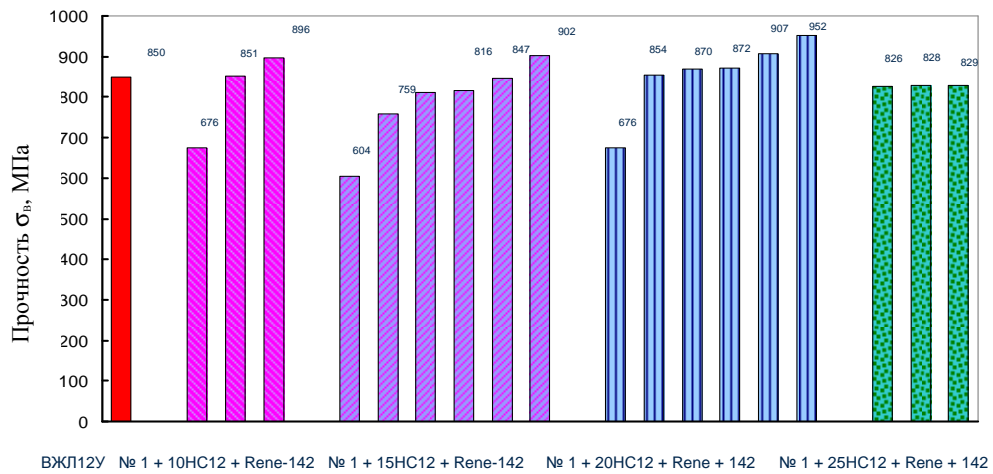


Рис. 9. Уровень кратковременной прочности (20 °С) паяных соединений сплава ВЖЛ12У с применением композиционных припоев № 1—Rene-142 и НС12.

Fig. 9. Level of short-term strength (20 °С) of brazed joints of VZh12U alloy with application of composite braze alloys consisting of № 1—Rene-142 and НС12

дисперсному упрочнению матрицы, благодаря чему был достигнут удовлетворительный уровень кратковременной прочности паяных соединений при растяжении (рис. 11).

Снижая температуру ликвидуса и солидуса припоя, кремний также снижает температуру протекания карбидных реакций и растворения метастабильной пограничной  $\gamma'$ -фазы. Наиболее совершенную структуру металла шва с минимальной долей дискретных вторичных фаз (4—6% (об.)) получали при введении в композиционный припой 20% (мас.)  $\text{NiSi}_2$  (см. рис. 8). Дальнейшее увеличение доли кремнийсодержащего припоя в структуре способствовало укрупнению карбидных фаз и появлению дисперсных силицидов в межосевых областях. Это было нежелательным, потому что приводило к охрупчиванию металла паяного шва.

Технология пайки бор- и кремнийсодержащим припоем была реализована при ремонте трещин термической усталости, возникающих в створках регулируемого сопла при эксплуатации АГТД из сплава ВЖЛ12У. Выполнены испытания фрагментов створок, запаянных композиционным припоем, в продуктах сгорания керосина при  $T_{\text{max}} = 1000$  °С, которые подтвердили эффективность разработанной технологии ремонтной пайки. После 100 циклов теплового нагружения (время одного термоцикла составило 90 с) на образцах, не имевших эксплуатационных дефектов типа трещин, и на отремонтированных фрагментах створок трещины и разрушения поверхности не обнаружены.

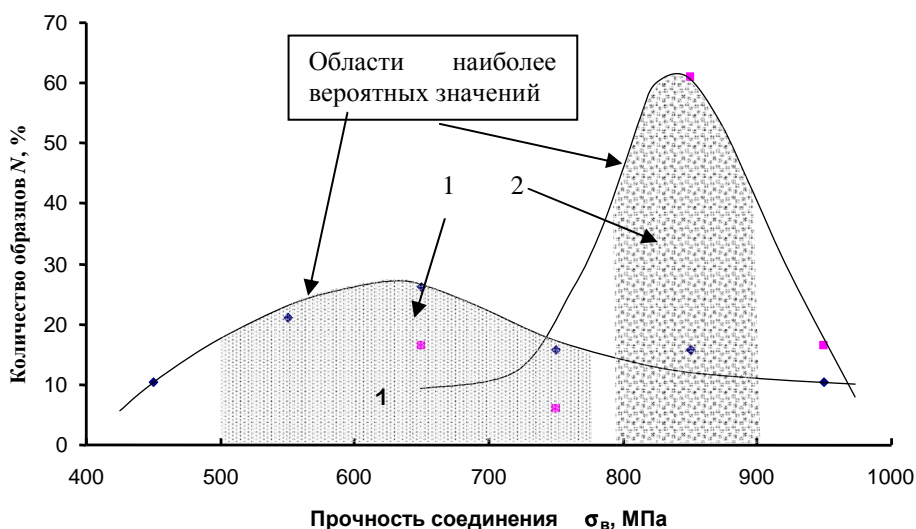


Рис. 10. Статистические кривые прочности паяных соединений ВЖЛ12У с использованием борсодержащих припоев без (1) и с добавлением кремния (2)

Fig. 10. Statistical curves of strength of ВЖЛ12У brazed joints with application of boron-containing braze without silicon (1) and with silicon additives (2)

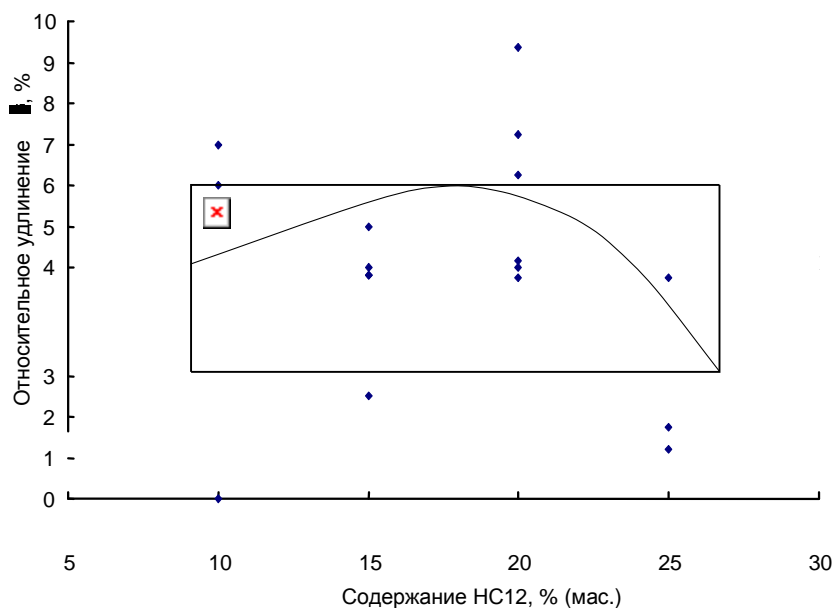


Рис. 11. Относительное удлинение паяных соединений сплава ВЖЛ12У, сформированных при 1210—1220 °С (20—10 мин) в зависимости от содержания порошка HS12 в композиционном припое № 1—60Rene-142

Fig. 11. Relative elongation of brazed joints of ВЖЛ12У alloy produced at 1210—1220 °С (20—10 min) depending on the content of HS12 powder in № 1—60Rene-142 composite braze alloy

Ни в участках пайки, ни в основном металле следов термоусталости разрушения выявлено не было. После испытаний на поверхностях основного металла и металла шва присутствовал тонкий слой оксидов, состоявший из шпинелей компонентов основного сплава. При этом на основном металле толщина фронтального окисления достигала 10 мкм, а локального — 10—15 мкм.

Таким образом, введение в композиционный борсодержащий припой с 60% (мас.) наполнителя Rene-142 дополнительно 20% (мас.) порошка Ni—12Si привело к положительному эффекту: были обеспечены стабильные функциональные свойства паяных соединений из сплава ВЖЛ12У и отреставрированных пайкой деталей из этого материала.

Литейный сплав ЖС26ВИ известен как один из основных материалов, используемых для изготовления рабочих лопаток теплонапряженных турбин [14]. В серийном производстве его получают как равноосной, так и направленной кристаллизацией [15]. Сплав ЖС26ВИ имеет повышенное содержание W — 10—12% (мас.) и Al + Ti — 7,1—8,9% (мас.), что обеспечивает ему достаточную жаропрочность и жаростойкость.

Кремний добавляли в борсодержащий припой для снижения температуры плавления паяльной смеси и как элемент, влияющий на растворимость бора в матрице шва [16]. Вводимый с порошком HS12 никель разбавлял композиционный припой, не допуская перелегирования металла шва. Количество депрессанта варьировали в пределах 15—25% (мас.) [8]. Этот подход способствовал повышению стабильности

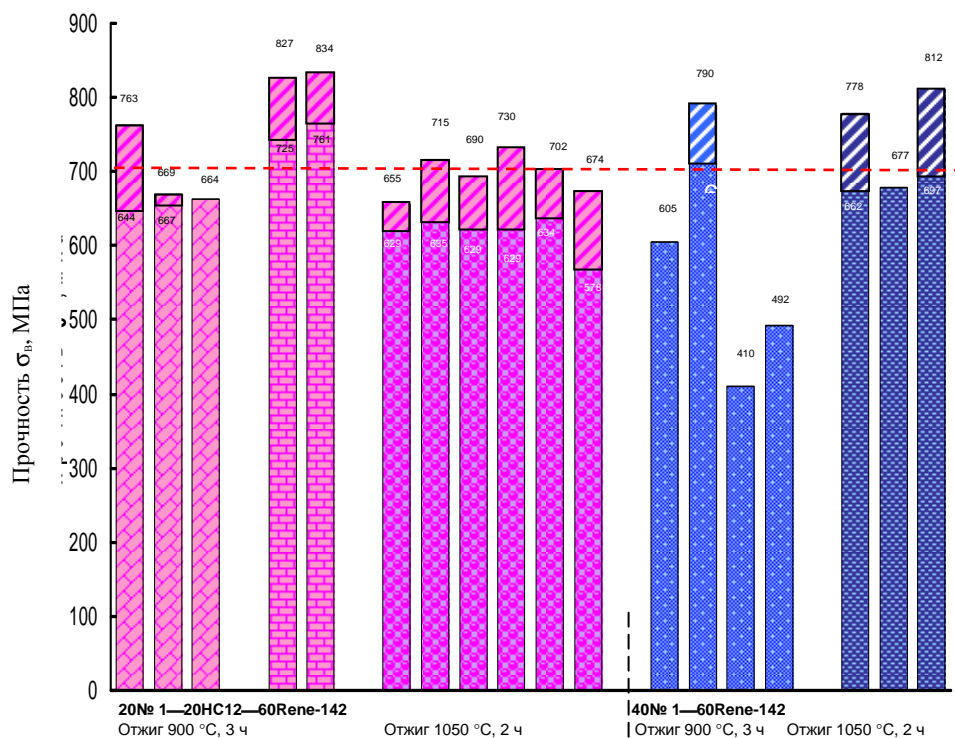


Рис. 12. Пределы текучести и прочности паяных соединений сплава ЖС26ВИ, полученных контактной изотермической пайкой при 1220 °С (20 мин) в вакууме  $5,5 \cdot 10^{-3}$  Па с использованием припоя 40№1—60Rene-142 и комплексного припоя с добавкой 20HC12 при 20 °С

Fig. 12. Yield limit and ultimate strength of brazed joints of ЖС26ВИ alloy produced by resistance isothermal brazing at 1220 °С (20 min) in vacuum of  $5,5 \cdot 10^{-3}$  Pa using 40№1—60Rene-142 braze alloy and complex braze alloy with additive of 20HC12 at 20 °С

механических свойств паяных соединений: возросли прочность и вязкость разрушения (рис. 12). Гомогенная ( $\gamma+\gamma'$ )-структура с минимумом вторичных фаз (рис. 13) в случае припоя 20№1—20HC12—60Rene-142 позволила получать для всех исследованных жаропрочных сплавов паяные соединения с высокой добротностью —  $\sigma_{\text{в}}^{\text{ПС}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{ОМ}} = \sim 0,96—1$  (см. рис. 2) — при стабильном уровне относительного удлинения 4—10%.

Острый пик на статистической кривой предела текучести (рис. 14) подтверждает надежность и стабильность технологического процесса пайки при введении в борсодержащий припой кремния в виде HC12 (20% (мас.)). Более 50% образцов ПС пластически деформировались до разрушения при 20 °С. Диаграмма отражает способность ПС выдерживать определенную пластическую деформацию — на приведенных кривых наблюдается существенное различие (до 100 МПа) в

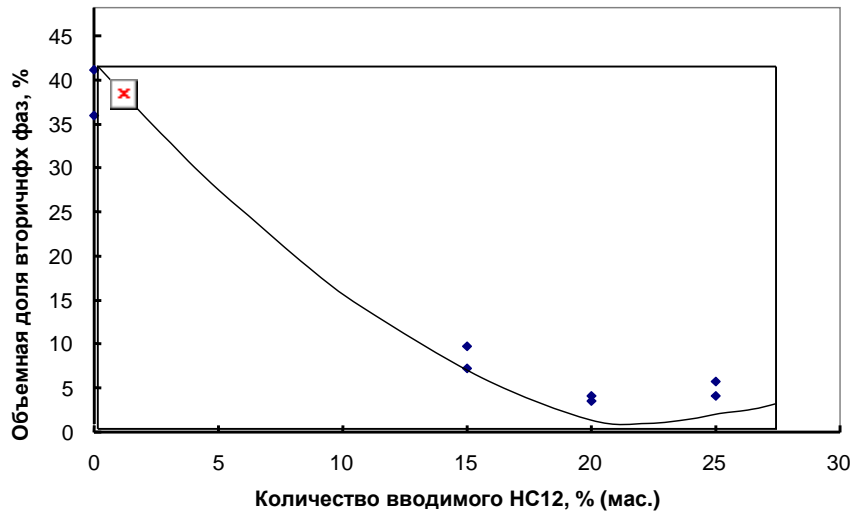


Рис. 13. Зависимость объемной доли вторичных фаз в металле шва от количества вводимого HC12

Fig. 13. Dependence of volume fraction of secondary phases in weld metal on the amount of added HC12

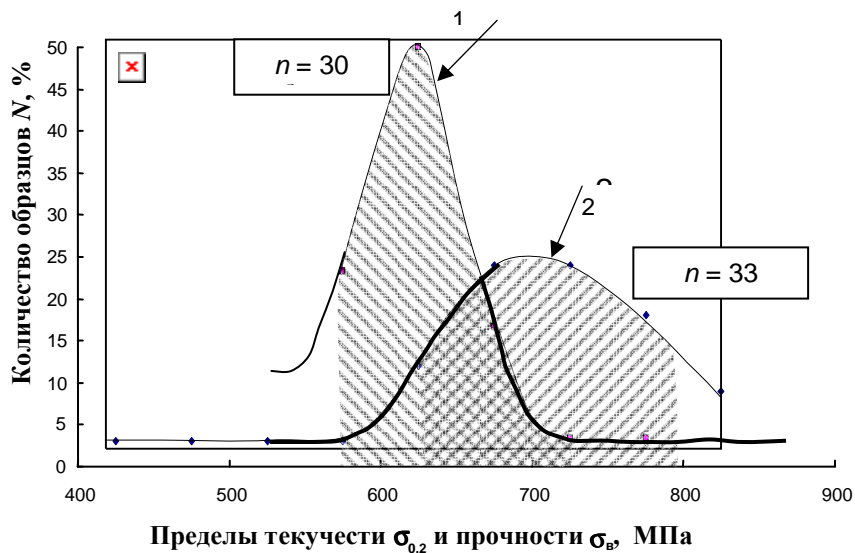


Рис. 14. Статистические кривые распределения значений пределов текучести (1) и прочности (2) паяных соединений, полученных изотермической пайкой при 1200—1225 °С сплава ЖС26ВИ после различных термообработок, испытанных при 20 °С

Fig. 14. Statistical curves of distribution of values of yield limit (1) and strength (2) of brazed joints produced by isothermal brazing at 1200—1225 °C in ЖС26ВИ alloy after different types of heat treatment at tension 20 °C

значениях  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  испытанных ПС. Судя по кривым растяжения образцов ПС, полученных с использованием припоя с 20НС12, на их разрушение при комнатной температуре затрачивалась определенная работа в отличие от ПС, полученных стандартным припоем, не содержащим кремния.

Прочность ПС сплава ЖС26НК с использованием комплексного припоя с НС12 превосходила прочность соединений ЖС26ВИ после аналогичной термообработки. Максимально достигнутое временное сопротивление ПС составило 1067 МПа при удлинении 15—23%. В этом случае “работал” фактор преимущественной ориентации роста кристаллитов в паяемой пластине [17]. Прочность ПС из литых пластин сплава направленной кристаллизации вдоль и поперек направления роста дендритов была близкой и составляла 800—890 МПа при относительном удлинении 4,2—10,5% (рис. 15). При пайке эффективно действуют границы дендритов I и II порядка, по которым идет проникновение припоя в основной металл.

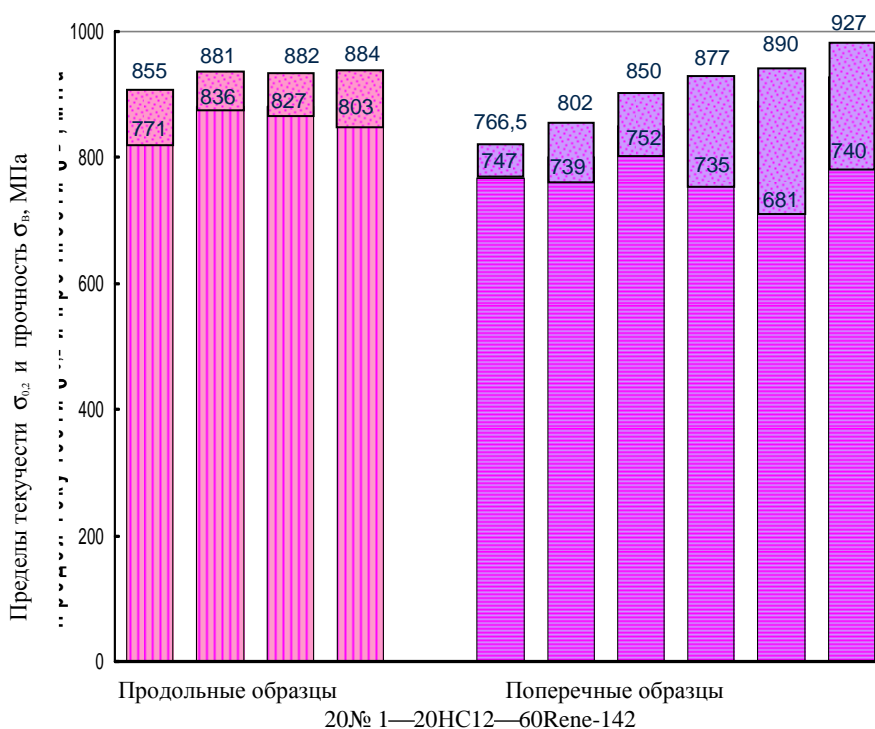


Рис. 15. Прочность образцов паяных соединений сплава ЖС26НК, полученных с применением припоя 20№ 1—20НС12—60Rene-142 при вырезке заготовок для пайки из пластины вдоль и поперек направления роста кристаллов

Fig. 15. Strength of samples of brazed joints of ZhS26NK alloy produced with application of 20№ 1—20NS12—60Rene-142 braze alloy at cutting out blanks for brazing from a plate along and across the direction of crystallite growth

После двухстадийной термообработки образцов при 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (4 ч) в вакууме предел текучести (73%) большинства соединений находился в интервале 675—775 МПа, а предел прочности 67% образцов — в интервале 775—925 МПа (рис. 16).

Типичным для образцов ПС, сформированных с применением припоя № 1—60Rene-142, являлось транскристаллитное или межзеренное разрушение по закристаллизовавшемуся металлу шва ввиду его повышенной многофазности [18]. С увеличением ширины зазора от 225 до 400 мкм и, соответственно, объемной доли композиционного припоя формировалась гетерогенная структура шва с различными видами упрочняющих фаз. Данные хрупкие фазы служили концентраторами напряжений при испытаниях.

В случае использования для пайки комплексного припоя № 1—20НС12—60Rene-142 разрушение ПС обычно происходило по основному металлу или линии сплавления с ним. При относительной гомогенности металла шва и минимуме вторичных фаз в шве фронт разрушения при испытаниях смещается в основу в область диффузионной зоны, где после высокотемпературного старения при охлаждении ограниченно выделяются из раствора дисперсные карбоборидные фазы и карбиды игольчатой формы.

Результаты испытаний ПС сплава ЖС26НК на растяжение в зависимости от ширины зазора представлены на рис. 17. При зазоре 220—270 мкм получен высокий уровень прочности при удовлетворительной пластичности соединений ( $\epsilon = 8,7—12,5\%$ ). По мере увеличения ширины естественного зазора прочность соединений при 20 °С снижалась до уровня прочности паяемого сплава. Увеличение объемной доли припоя в случае широкого зазора не оказывало отрицательного влияния на прочность паяных соединений сплава ЖС26НК: она составляла 800—930 МПа при ширине зазора 500—800 мкм. Из-за огрубления карбидных фаз в металле шва удлинение соединений, реализованное в основном за счет базового металла, снижалось до 2,8—10,5%.

Длительная прочность паяных соединений и исходных сплавов оценивалась при температуре 900 °С, выше которой существенную роль играет фактор ориентации роста кристаллов в металле. После стандартного отжига долговечность сплава ЖС26ВИ, определенная при напряжении 343 МПа сохраняется достаточно низкой и, скорее всего, определяется качеством паяемого сплава. Паяные соединения сплава ЖС26ВИ, сформированные с использованием комплексных припоев с 15—20НС12 и отожженные при 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (2 ч), испытывали на длительную прочность при напряжении 196 МПа. Длительная прочность ПС, полученных заполнением технологических зазоров шириной 200—800 мкм, достигала 1,5—22 ч. Фактически при этом определялись свойства металла шва соединения. В случае сплава ЖС26НК наблюдали существенное увеличение длительной прочности как паяемой основы, так и паяных соединений (рис. 18). Соединения после 30—68 ч испытаний разрушались по металлу шва с удлинением образца  $\epsilon = 1,5—3,5\%$ . Длительные испытания соединений в случае борсодержащего припоя сопровождаются интенсивной диффузией бора в паяемую

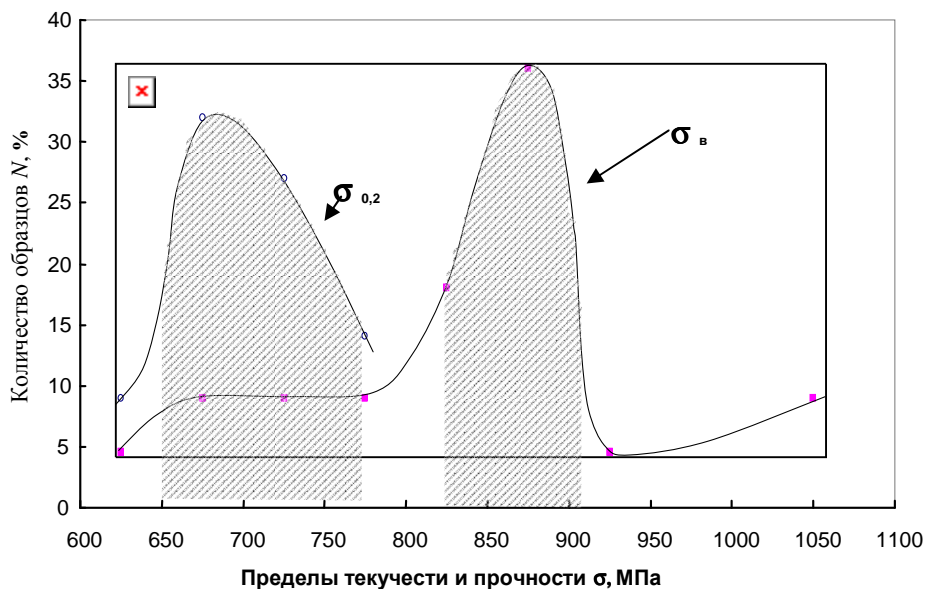


Рис. 16. Статистические кривые распределения значений пределов текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочности  $\sigma_b$  паяных соединений сплава ЖС26НК, полученных с использованием бор- и кремнийсодержащего припоя

Fig. 16. Statistical curves of distribution of values of yield limit  $\sigma_{0,2}$  and ultimate strength  $\sigma_t$  of brazed joints of ЖС26НК alloy produced using boron- and silicon-containing braze alloy

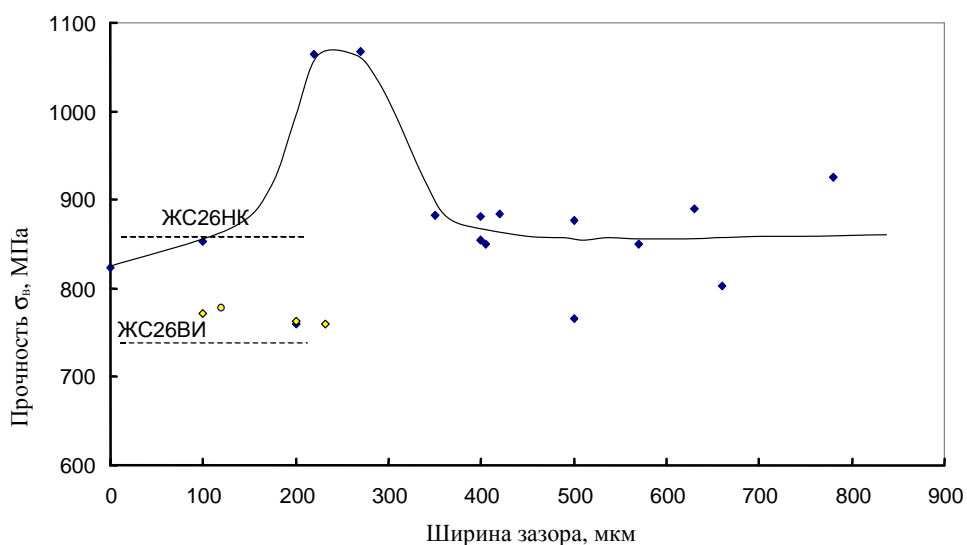


Рис. 17. Изменение прочности паяных соединений сплава ЖС26НК в зависимости от ширины зазора при 20 °С

Fig. 17. Variation of strength of brazed joints of ЖС26НК alloy depending on gap width at 20 °C



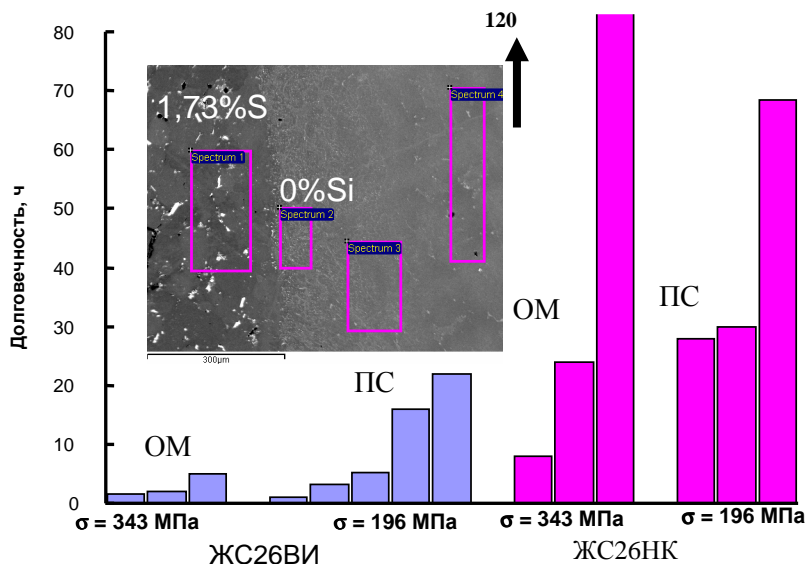


Рис. 18. Долговечность сплавов ЖС26ВИ и ЖС26НК при температуре 900 °С и напряжении 350 МПа и их ПС при 195 МПа после термообработки 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (2 ч)

Fig. 18. Fatigue life of ЖС26ВИ and ЖС26НК alloys at the temperature of 900 °С and stress of 350 МПа and their ПС at 195 МПа after heat treatment 1160 °С (2 h) + 1050 °С (2 h)

подложку. За 1 ч высокотемпературного воздействия на образец ПС глубина проникновения бора (уширение шва) составила более 1 мм, а после 22 ч испытаний достигала 1,5—3 мм на каждую из сторон образца. В металле шва паяного соединения наблюдали проплавление эвтектических фаз при температуре испытания и высокотемпературное окисление, что является опасным при эксплуатации паяных соединений, (рис. 19, а, з). Применение бор- и кремнийсодержащего припоя № 1—20НС12—60Rene-142 нейтрализовало диффузию бора в паяемый сплав. После 28 ч высокотемпературного воздействия под напряжением 195 МПа ширина диффузионной зоны составляла 30 мкм, а после 68,5 ч — не более 120 мкм, причем кремний в паяемом металле вообще не обнаруживали.

Предложенный композиционный припой 20№ 1—20НС12—60Rene-142, способствуя формированию при изотермической пайке плотного шва с минимальной гетерогенностью и ликвационной неоднородностью структуры (рис. 20), обеспечивает паяным соединениям высокую прочность и пластичность. Он оказался универсальным для запайки капилляров различной ширины, формирования швов с дисперсионно-упрочненной  $\gamma$ - $\gamma'$ -регулярной структурой и с минимальным количеством вторичных карбоборидных фаз и эвтектик.

Паяные соединения, выполненные комплексным припоем с НС12, прошли испытания на жаростойкость (изотермическое окисление в течение 500 ч при 900 и 1000 °С). Глубина фронтального окисления не превышала 10 мкм, никакого локального окисления металла шва паяных швов, а также в области линии сплавления отмечено не было.

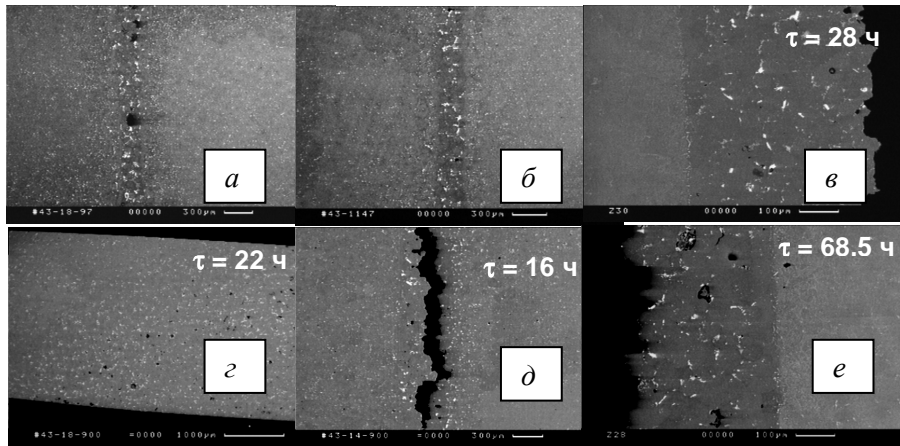


Рис. 19. Характер высокотемпературного разрушения в процессе испытаний на долговечность при 900 °С металла шва паяных соединений сплава ЖС26НК, полученных с использованием стандартного припоя № 1—60Rene-142 (а, с) и комплексного припоя № 1—20НС12—60Rene-142 (б, в, д, е)

Fig. 19. Nature of high-temperature fracture during fatigue testing at 900 °С of weld metal of ЖС26НК alloy brazed joints produced with application standard braze alloy № 1—60Rene-142 (а, с) and of complex braze alloy № 1—20NS12—60Rene-142 (б, в, д, е)

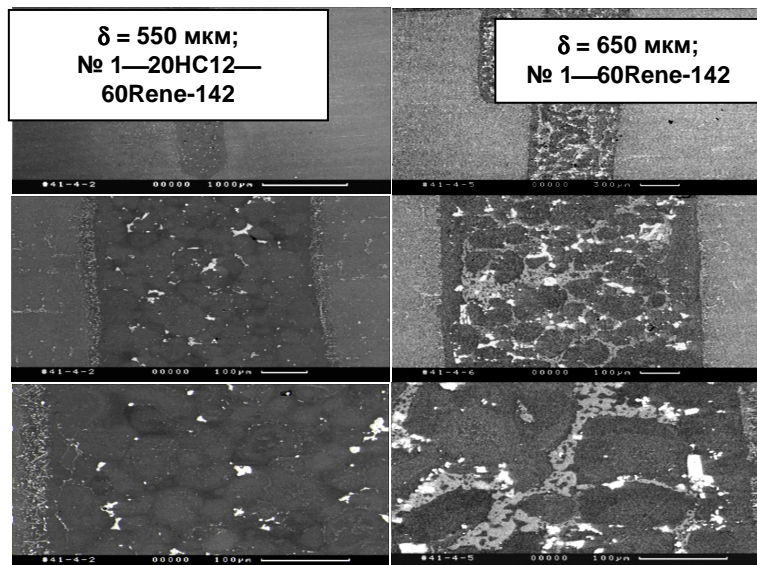


Рис. 20. Микроструктура паяных швов, сформированных № 1—60Rene-142 и № 1—20НС12—60Rene-142 в технологических зазорах ( $\delta = 550$  и  $650$  мкм) с применением комплексных припоев при 1225 °С (15 мин), после термообработки 1160 °С (2 ч) + 1050 °С (5 ч)

Fig. 20. Microstructure of brazed welds produced in process gaps ( $\delta = 550$  and  $650$  mcm) with application of complex braze alloys № 1—60Rene-142 and № 1—20NS12—60Rene-142 at 1225 °С (15 min) after heat treatment at 1160 °С (2 h) + 1050 °С (5 h)

## Выводы

Рассмотрена физико-химическая природа влияния кремния (2—3% (мас.)) на особенности кристаллизации композиционного борсодержащего припоя Ni—14Cr—9Co—3,8Al—2,5B с наполнителем из порошка сплава Rene-142 в процессе высокотемпературной пайки никелевых ЖС. Введение кремния в виде эвтектической композиции Ni—12Si (НС12) обеспечивает эффективное смачивание паяемой подложки ( $\theta = 3^\circ$ ), снижает температуру ликвидуса на  $\approx 60^\circ\text{C}$ , температуру растворения карбидов и сужает интервал кристаллизации композиционных припоев, благодаря чему измельчается структура металла шва и его составляющих.

В результате разбавления расплава припоя никелем (и/или кремнием) посредством введения порошка НС12 снижается количество карбоборидных (вторичных) фаз в паяном шве с  $f = 39—44,2\%$  (об.) для припоя 40№ 1—60Rene-142) до  $f = 5,1—8,7\%$  (об.). Более низкая скорость кристаллизации припоя способствует более полному протеканию полиморфных превращений и, соответственно, изменению морфологии фаз и существенно меньшей гетерогенизации структуры металла паяных швов и диффузионной зоны. Объемная доля  $f$  вторичных фаз после термообработки ПС составляет 4,2—5,9% (об.) по сравнению с  $f = 14,6—17\%$  (об.) для борсодержащего припоя.

Кремний в борсодержащем припое ослабляет уровень внутренних напряжений в твердом растворе паяного шва в кристаллической решетке никель-хромовой матрицы шва вследствие внедрения атомов бора. С введением в борсодержащий припой порошка Ni—12Si параметр кристаллической решетки матрицы уменьшается.

Присутствие НС12 в композиционном припое № 1—60Rene-142 снижает вероятность образования боридных эвтектик типа  $\gamma\text{-Ni} + \text{CrB}$ ,  $\gamma\text{-Ni} + \text{Ni}_3\text{B} + \text{CrB}$ , которые вызывают хрупкое разрушение паяных соединений.

Кремний стабилизирует выделение в металле шва изолированных боридных фаз  $\text{Ni}_3\text{B}$  цементитного типа, обеспечивая технологическую пластичность паяным соединениям. Он ограничивает диффузию бора по границам зерен паяемых сплавов на глубину до 30—50 мкм и удерживает его в шве, предотвращая эрозию паяемых сплавов.

Использование в композиционных припоях наполнителей из порошков сплавов Rene-142 и ЧС70ВИ повышает добротность  $D = \sigma_{\text{в}}^{\text{nc}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{om}}$  ПС при  $20^\circ\text{C}$  составляет 0,85—0,92 (по сравнению с припоем Ni—Co—Cr—Al—2,5B (0,65)). На основе разработанной композиции припоя для высокотемпературной пайки никелевых ЖС, состоящей из Ni—Co—Cr—Al—B (№ 1) + 15—20НС12 + 50—60Rene-142, сформированы ПС сплавов ВЖЛ12У, ЖС26ВИ с добротностью 0,9—1 и относительным удлинением  $\epsilon = 2,5—13,5\%$ .

**РЕЗЮМЕ.** Сутність роботи полягає в нейтралізації негативного впливу бору в композиційному припої Ni—Co—Cr—Al—2,5% (мас.) В — наповнювач-сплав Rene-142 через введенням у нього 15—25% (мас.) припою Ni—12% (мас.) Si евтектичного складу. Об'ємна частка

дисперсних карбоборидних фаз після термообробки складає  $f = 4,2—5,9\%$ , близька до глобулярної форма карбідних часток дозволила підвищити технологічну пластичність і міцність паяних з'єднань (ПЗ). Досліджено мікроструктуру, фазовий склад, міцність і пластичність металу ПЗ сплавів ЧС70ВИ, ВЖЛ12У, ЖС26ВИ і НК. Добротність  $(\sigma_b^{IC}/\sigma_b^{OM})$  ПЗ, отриманих із застосуванням бор- і кремнійвміщуваних припою, при 20 °С в залежності від виду сплавів, що паяються, складала 0,92—1,0 при відносному подовженні  $\epsilon = 4—17\%$ .

1. Хорунов В. Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. — К.: Наук. думка, 2008. — 239 с.
2. VBC Group — Engineering Division 16 Regent Park, Park Farm Industrial Estate, Wellingborough Northants NN8 6GR.
3. Абузин Ю. А., Бабич Б. Н., Рыльников В. С. Высокотемпературные припои, полученные методом механического легирования // Сварщик. — 2006. — № 1. — С. 20—22.
4. Справочник по пайке // Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.
5. Рыльников В. С., Лукин В. И., Сидоров А. И. и др. Припои на никелевой основе для пайки никелевых жаропрочных сплавов // Тез. докл. науч.-техн. конф. “Актуальные вопросы авиационного материаловедения”, Москва, 26—27 июня 2007 г. — М.: ВИАМ, 2007. — С. 58—59.
6. Rabinkin A. Brasing with (Ni, Co, Cr)—B—Si amorphous brazing filler metals: alloys, processing, joint structure, properties, application // Sci & Technol. of Welding & Joining. — 2004. — 9, No. 3. — P. 181—199.
7. Pat. 5.240.491 USA. Int Cl<sup>5</sup> C22C19/05. Alloy powder mixture for brazing of superalloy articles / D. E. Budinger, S. J. Ferrigno, W. H. Murphy. — Publ. 31.08.1993.
8. Pat. 5 735 448 USA. IC<sup>6</sup> B23K 35/14. Method of repairing and near surface defects in superalloy articles such as gas turbine engine components/ J. Draghi, N. Pietrushka, W. K. Armstrong. — Publ. 7.04.1998.
9. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1988. — 373 с.
10. Гольдшмидт Х. Дж. Сплавы внедрения. В 2-х кн. — М.: Мир, 1971. — Вып. I. — 424 с.; Вып. II. — 464 с.
11. Куренкова В. В., Малащенко И. С. Композиционный припой для высокотемпературной пайки жаропрочных никелевых сплавов // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: Сб. докл. Междунар. Симпозиума, Минск, 25—27 марта, 2009. В 2-х ч. — Минск, 2009. — Ч. 2. — С. 209—217.
12. Малащенко И. С., Куренкова В. В., Белявин А. Ф., Трохимченко В. В. Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего

- припоя с присадкой кремния // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 26—42.
13. Малашенко И. С., Куренкова В. В., Оноприенко Е. В. и др. Механические свойства и структура паяных соединений литейного никелевого сплава ЖС26ВИ. Ч. 1 // Там же. — 2007. — № 1. — С. 25—32.
  14. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1998. — 317 с.
  15. Долгов Б. В., Лысенко Н. А., Цивирко Э. И. Высокоскоростная направленная кристаллизация при производстве турбинных лопаток // Процессы литья. — 1998. — № 1. — С. 49—55.
  16. Tung S. K., Lim L. C., Lai M. O., Wu H. Evolution of nickel borides in Ni—Si—B brazed joints of nickel during post-brazed heat treatment // Mater. Science & Technology. — 1997. — P. 1051—1056.
  17. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. — М.: Машиностроение, 1997. — 336 с.
  18. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах. — М.: Мир, 1974. — 374 с.

Поступила 12.12.08

**Kurenkova V. V., Malashenko I. S.**

#### **High-temperature brazing of high-temperature casting alloys by boron containing braze alloy doped with silicon**

The essence of the work consists in development of the process of neutralizing the negative influence of boron in the composite braze alloy of Ni—Co—Cr—Al—2,5% (mas.) B + filler-alloy Rene-142 by adding to it (15—25)% (wt.) of Ni—12Si braze alloy of an eutectic composition. Precipitation of dispersed carbo-boride phases uniformly distributed in the solder, the volume fraction of which after heat treatment is equal to  $f = 4,7—5,9\%$ , and the almost globular shape of carbide particles allowed improvement of technological ductility and strength of high-temperature brazed joints. Addition of Ni—12% Si braze alloy powder to boron-containing Ni—Co—Cr—Al—2,5B—Rene-142 composite alloy prevents formation of  $\gamma$ -Ni + CrB boride eutectics, the formation of which leads to lowering of high-temperature resistance of brazed metal and brittle fracture of joints below the yield point. Braze alloy doping with silicon results in lowering of the level of inner stresses of the matrix solution crystalline lattice. Systematic analysis of the microstructure, phase composition, strength and ductility of brazed metal in joints of ChS70VI, VZhL12U, ZhS26VI and DS alloys. Depending on the type of brazed alloys, BJ Q-factor ( $\sigma_s^{BJ} / \sigma_s^{BM}$ ) at 20 °C was 0,9 to 1.