



КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖЛ12У ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20 и 950 °С

**В. В. Куренкова, И. С. Малашенко, В. В. Трохимченко,
Л. В. Червякова, А. А. Рабинович**

Рассмотрено влияние химического состава композиционных припоев, применяемых в высокотемпературной контактной пайке, на прочность паяных соединений литейного сплава ВЖЛ12У при 20 и 950 °С. Использование изотермической пайки в интервале значений температуры 1215... 1220 °С (15... 10 мин) низкоплавкого припоя Ni-Co-Cr-Al-2,5 % В в смеси с наполнителем из порошков сплавов Rene-142 и ЖС6У (до 50 мас. %) позволило получить паяные соединения с прочностью, составляющей 90... 95 % прочности основного металла при комнатной температуре и 70... 85 % при 950 °С. Рассмотрены микроструктурные особенности паяных швов после различной термообработки.

Effect of chemical composition of composite brazing alloys, used in high-temperature contact brazing, on strength of brazed joints of casting alloy VZhL12U at 20 and 950 °С was considered. The application of isothermal brazing of low-fusible brazing alloy Ni-Co-Cr-Al-2.5 % В in mixture with a filler of powders of alloys Rene-142 and ZhS6U (up to 50 mass %) within the interval of temperature 1215... 1220 °С (15... 10 min) made it possible to produce brazed joints of strength of 90... 95 % of that of the parent metal at room temperature and 70... 85 % at 950 °С. Microstructural features of brazed joints after different heat treatment were given.

Ключевые слова: сплав ВЖЛ12У; высокотемпературная пайка; вакуум; борсодержащий припой; порошковый наполнитель; термообработка; прочность при растяжении; металл шва; структура

Введение. Стационарные детали горячего тракта газовых турбин, выполненные из литейных никелевых сплавов, в процессе эксплуатации подвергаются термоусталостному растрескиванию вследствие циклического изменения температуры поверхности и возникновения градиентов термических напряжений в объеме деталей [1]. Для изделий с повреждениями критических размеров, когда ширина трещины в устье превышает 0,5 мм, требуется восстановительный ремонт, который в последние годы выполняют путем применения высокотемпературной пайки [2–5] и многокомпонентных припоев, содержащих в качестве депрессантов бор, кремний (и железо для улучшения растекания припоя) и эффективного смачивания поверхности ремонтируемого участка [6–7].

Сопловые лопатки II ступени турбины можно изготавливать из низковольфрамового сплава ВЖЛ12У, что позволяет сэкономить на одном изделии до 75 % вольфрама, снизить массу машины на 7,3 %. Облегчение роторных лопаток позволяет уменьшить уровень напряжений в дисках и их массу, а в результате — и массу изделия [8].

Некоторые данные о свойствах сплава ВЖЛ12У приведены в работах [8–10].

Металлургические особенности высокотемпературной изотермической пайки жаропрочных никелевых сплавов рассмотрены ниже. Основное требование к материалу композиционного припоя заключается в достижении удовлетворительной вязкости расплава, обеспечивающей затекание и заполнение микротрещин и пустот в восстанавливаемом изделии. Соотношение объемных долей припоя (легкоплавкой составляющей) и наполнителя без бора и железа дает требуемую вязкость расплава при конкретной температуре пайки.

Главная цель технологического процесса пайки и последующей термообработки восстанавливаемого изделия — приблизить структуру металла паяного шва к структуре основного сплава за счет активированного диффузионного взаимодействия. Температура отжига детали перед ремонтной пайкой должна достигать температуры процесса изотермической пайки.

В случае ремонтной пайки целесообразно использовать припой с максимально возможным соответствием его состава, в частности наполнителя, содержанию компонентов в восстанавливаемом изделии.

Наличие вольфрама и молибдена в припое важно, поскольку эти тугоплавкие компоненты способствуют твердорастворному упрочнению металла



шва и получению необходимого уровня прочности соединения. Хром и алюминий обеспечивают защиту паяного соединения от окисления; титан, алюминий, тантал определяют формирование γ -фазы, упрочняющей матрицу никелевого сплава; углерод, цирконий, бор способствуют выделению упрочняющих фаз по границам зерен.

Повышенное содержание алюминия в порошковых смесях необходимо для получения более жаростойкого соединения, а увеличение количества тантала в смеси порошков — для улучшения его механических свойств. Добавка тантала повышает показатели γ - и γ' -фазы благодаря уменьшению несоответствия параметров их кристаллических решеток. Одновременно усиливается стойкость против окисления. Тантал, растворяясь в γ' -фазе, повышает температуру ее полного растворения (сольвус) и температурный предел работоспособности сплава.

Кобальт оказывает положительное влияние на жаропрочность и технологичность (обрабатываемость), что особенно полезно, когда сплавы легированы титаном, вольфрамом, молибденом, алюминием и присутствует бор. Кобальт при наличии титана более эффективно влияет на сопротивление ползучести, чем в случае легирования сплавов алюминием [11].

Упрочняющей фазой в никелевых сплавах, содержащих более 10 % кобальта, является γ' -фаза $(Ni, Co)_3(Ti, Al)$, причем наибольшее ее количество зафиксировано при содержании кобальта не более 15 мас. %. При больших массовых долях кобальта количество γ' -фазы в никелевых сплавах уменьшается, что связано с его благоприятным влиянием на термическую стойкость твердого раствора и упрочняющей фазы.

Кобальт оказывает положительное воздействие на повышение значений ударной вязкости и удлинения, но мало влияет на кратковременную и длительную прочность сплава.

Введение гафния в припой приводит к некоторому упрочнению γ' -фазы. Гафний снижает температуру начала плавления расплава и повышает температуру оплавления γ' -фазы, затрудняя полную гомогенизацию паяного соединения. Вместе с тем гафний увеличивает сопротивление окислению, при этом ведет себя аналогично таким химически активным элементам, как иттрий, цезий, лантан и др.

Порошки припоя и наполнителя замешиваются на органическом связующем. Выпускаемое зарубежной промышленностью связующее Contronics 4B [4] является экологически безопасным и обеспечивает надежное сцепление между частичками припоя и наполнителя в композиционных паяльных смесях перед пайкой. Достаточно 20 мин процесса изотермической пайки для полного испарения связующего, затекания припоя во все щели и формирования структуры шва, эквивалентной структуре основного металла. Припой расплавляется при более низкой температуре и растворяет порошки наполнителя, создавая двухфазную смесь, в дальнейшем формирующую скелет шва. Затем отжиг при 1135... 1165 °С

(лучше 1150 °С) в течение 0,5... 4,0 ч (оптимально 2 ч) обеспечивает взаимодиффузию компонентов паяемого сплава и композиционного припоя.

Важным параметром является скорость охлаждения изделия после отжига до 650 °С. Лучше всего использовать скорость до 30 °С / мин. В этом случае формируется сетка глобулярных карбидных частиц по границам зерен. Более низкие скорости или длительная выдержка в интервале 1150... 815 °С вызывают огрубление частиц карбидов, снижение пластичности и сопротивления усталости.

Важный момент при пайке — возникновение в металле шва охрупчивающих фаз типа «китайский шрифт» на основе хрома (молибдена, вольфрама), содержащих бор, кремний и углерод, объемная доля которых определяет сопротивление паяных деталей ударным нагрузкам.

Высокотемпературная часть припоя (наполнитель) должна быть близка по составу металлу восстанавливаемой детали. Температура плавления припоя вследствие использования в качестве депрессанта бора (а также кремния) оказывается существенно ниже таковой базового сплава.

Большое количество наполнителя в припое обеспечивает лучшие механические свойства паяного соединения благодаря снижению относительной концентрации бора и кремния в металле шва. В то же время достаточное количество низкоплавкой составляющей обеспечивает лучшую растекаемость припоя.

В соответствии с патентом [4], температуру плавления материала припоя необходимо выбирать ниже температуры начала роста зерна восстанавливаемого сплава и оплавления границ зерен. Например, оптимальный состав материала припоя при ремонте деталей, выполненных из сплавов GTD-222 и IN-939, должен быть следующим, мас. %: Ni-10... 19 Cr-3... 10,5 Co-1,75... 4,9 Ti-0,75... 3,4 Al-1,25... 4,0 W-1,25... 4,1 Mo- $<$ 1,5 Fe-0,025... 0,225 C-0,005... 0,15 Zr-0,5... 2,6 В. Здесь углерод выступает в составе упрочняющих карбидных фаз, а бор — депрессанта.

В настоящей работе в качестве базового применяли сплав ВЖЛ12У, являющийся аналогом сплава ЖС6К. Основное отличие первого состоит в значительно большем содержании кобальта (14,5 против 5,0 %), титана (4,5 против 3 %) и в меньшем — вольфрама (1,4 против 5 %). Количество остальных компонентов сплава сходно, технологические подходы к ремонтной пайке данных материалов одинаковы.

Жидкий припой в капиллярном зазоре интенсивно насыщается компонентами паяемой детали, что приводит к потере жидкотекучести расплава. На процессы заполнения зазора припоем оказывает влияние наличие в расплаве отдельных кристаллических образований (химических соединений), поэтому заполнение микрорыхлот в паяемых деталях с использованием многокомпонентных наполнителей становится проблематичным. При взаимодействии твердой и жидкой фаз контактирующие с твердой фазой объемы расплава припоя и паяемой основы по структурному состоянию близки, но харак-

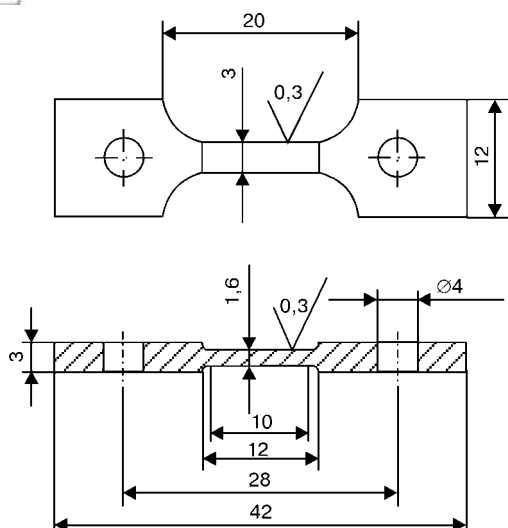


Рис. 1. Схема образца из сплава ВЖЛ12У для испытаний ПС на растяжение при комнатной температуре

теризуются более высокой подвижностью атомов, чему способствуют процессы поверхностной диффузии.

Затекание припоя в вертикальные зазоры сверху возможно только при его активном взаимодействии с паяемым металлом. Формирование паяного соединения с самого начала происходит за счет межатомного взаимодействия расплава припоя и твердой поверхности восстанавливаемой основы, для интенсификации которого целесообразно прикладывать к соединяемым поверхностям определенное давление в виде статического или знакопеременного нагружения, например ультразвуковые колебания.

При пайке композиционным припоем с наполнителем в виде порошка паяемого металла (30... 60 мас. %) первичная жидкость (припой) распределяется преимущественно по границам поринок и поверхности контакта наполнитель–паяемый металл, в результате происходит процесс контактно-реакционного спекания (пайки), связанный с проникновением жидкой фазы, в частности депрессанта, по границам зерен как в основной металл, так и в материал наполнителя. При нагреве деталей в процессе изотермической пайки выше температуры солидуса припоя контактное плавление материала зависит от скорости диффузии депрессанта в жидкую и твердую фазы соединения. Увеличение продолжительности выдержки при изотермической пайке определяет рост зерна металла шва и расширяет область растворно-диффузионного спая (вдоль линии сплавления). Последнее является рациональным с позиции технологической пластичности соединений.

Взаимодействие твердого и расплавленного металлов при пайке вызывает изменение химического состава исходной жидкой фазы (припоя). Металл припоя обогащается компонентами наполнителя, а без использования последнего — компонентами паяемого металла. Перенос компонентов усиливается благодаря отсутствию на паяемых поверхностях оксидных пленок и наличию непосредственного металлического контакта между основным металлом и жидким припоем. Происходит интенсивное раст-

ворение паяемого металла в расплавленном припое, ослабляемое введением в припой вместе с наполнителем компонентов, содержащихся в основном металле. Например, использование в качестве наполнителя порошков сплавов ЖС32 и Repe-142, в состав которых входят тантал, рений, гафний, дает возможность паять изделия из современных литейных жаропрочных сплавов (ЖС).

Состав припоя в процессе пайки изменяется не только из-за растворения в нем составляющих основного металла, но и в результате избирательной диффузии компонентов припоя в паяемый металл, испарения летучих компонентов (хрома) при высокотемпературной вакуумной пайке, окисления и удаления в шлак высокорекреакционных компонентов [6].

Основным критерием оценки припоя, применяемого для ремонта деталей ГТД, является прочность паяного шва при рабочей температуре детали. С этой целью мы исследовали прочность паяных соединений сплава ВЖЛ12У в условиях комнатной температуры и 950 °С при растяжении, что необходимо при выборе вариантов композиционного припоя для оптимизации технологических режимов промышленной запайки дефектов (трещин термической усталости) реальных деталей из сплава ВЖЛ12У после эксплуатации.

Рассмотрено влияние состава паяльных смесей на образование спаев ЖС. Для исследуемого сплава ВЖЛ12У установлены системы композиционных припоев, дающие стабильные показатели прочности при одноосном растяжении, когда добротность паяных соединений D достигала 80... 105 % прочности основного материала.

Результаты механических испытаний. Механические испытания образцов паяных соединений (ПС) при комнатной и высокой температуре проводили с целью оценки прочностных характеристик сплава ВЖЛ12У после эксплуатации изделия, восстановительной термообработки деталей по режимам, учитывающим требования заказчика, и оптимизации состава композиционных припоев, применяемых в ремонтной пайке изделий.

Плоские фрагменты деталей «распускали» на заготовки для изготовления образцов ПС и исследования механических свойств основного металла (рис. 1). Фрагменты деталей после 500 ч эксплуатации очищали от нагара и отжигали в вакууме при 1210... 1220 °С в течение 1 ч.

Ограничения при проведении испытаний на растяжение связаны с возможностями тензометрического устройства машины Р-05, протарированным на максимальное усилие 5 кН. При ширине рабочей части образца из ЖС 3 мм его толщина не должна превышать 1,6... 1,7 мм, поскольку временное сопротивление материала или ПС может достигать 980 МПа. Такая ситуация вызвала необходимость утонения рабочей части образцов ПС, поскольку исходная толщина заготовок составляла 2,6... 2,8 мм. Если образцы при шлифовании рабочей части не разделялись на две половинки, это было предвари-

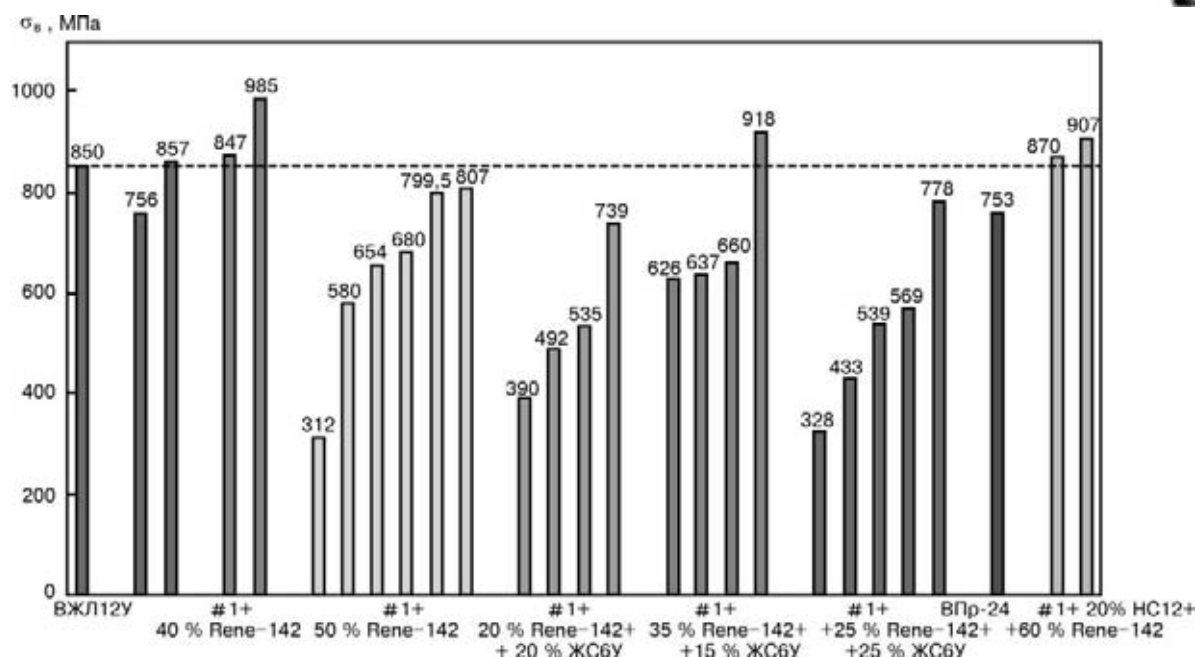


Рис. 2. Уровень прочности ПС сплава ВЖЛ12У, полученных с применением композиционных припоев, состоящих из #1 и наполнителей (сплавов Rene-142, ЖС6У), в зависимости от вида и массовой доли наполнителя; штриховой линией помечено стандартное временное сопротивление основного металла ВЖЛ12У (850 МПа)

тельной качественной оценкой выполненной стыковой пайки.

Для реализации технологического процесса пайки важен нагрев деталей (заготовок) с нанесенным припоем в вакуумной печи. Подобная процедура детально рассмотрена в патентах [4,12]. В зависимости от химического состава восстанавливаемого сплава и композиции используемого припоя применяли различные режимы прогрева детали. С усложнением химического состава сплава повышается его жаропрочность, поэтому температуру пайки следует выбирать выше, а нагрев объекта на подходе к максимальной температуре изотермической пайки должен происходить медленнее [4].

Пластины паяли встык без зазора. Фактический зазор определяли по гранулометрическому составу наполнителя (80... 120 мкм).

При выборе температуры изотермической пайки изделия основными параметрами технологического процесса становятся вязкость припоя и смачиваемость расплавом паяемых поверхностей. Высокая температура процесса определяет надежное термодиффузионное взаимодействие между частицами припоя, наполнителя и паяемыми поверхностями. Однако низкая вязкость приводит к вытеканию припоя из зазора, нарушая тем самым металлургическую целостность паяного соединения. Поэтому оптимальное количество наполнителя в низкоплавкой составляющей припоя является принципиально важным моментом в технологии ремонтной пайки.

Нагрев образцов в вакуумной печи СНВ проводили ступенчато. Пайку производили при 1210... 1220 °С в течение 10... 15 мин. Охлаждение образцов выполняли при полном выключении нагревателей печи. Это обеспечивало скорость охлаж-

дения объектов 18... 20 град/мин на высокотемпературном участке 1200... 900 °С.

Кратковременная прочность ПС при 20 °С. На рис. 2 обобщены результаты механических испытаний паяных соединений сплава ВЖЛ12У. В композиционных припоях применяли различное количество порошка Rene-142. Сплав Rene-142 является высоколегированной системой с температурой полного растворения γ -фазы в матрице $T > 1240$ °С. Наличие тантала, рения, гафния в составе наполнителя припоя делает металл шва высокопрочным, окалиностойким и обеспечивает повышенное сопротивление ползучести паяного соединения.

По оси абсцисс (рис. 2) приводится фазовый состав паяльной смеси из низкоплавкого борсодержащего никелевого припоя и наполнителя либо в виде порошка чистого Rene-142, либо в сочетании с порошком сплава ЖС6У. Наиболее стабильные результаты по прочности ПС получены при пайке пластин ВЖЛ12У композиционными припоями двух типов — с наполнителем из 50 мас. % Rene-142 и с бинарным наполнителем (35 мас. % Rene-142 + 15 мас. % ЖС6У). Минимальный уровень прочности в этом случае составил соответственно 580... 680 и 626... 662 МПа, а максимальный соответственно — 800... 918 МПа, когда добротность ПС превысила 100 %.

Самые высокие значения прочности ПС получены в случае применения бинарной системы припоя, когда в качестве наполнителя использовали 40 мас. % порошка Rene-142: временное сопротивление составило 874 МПа. При массовой доле 50 % наполнителя из чистого Rene-142 прочностные характеристики соединений оказались более низкими: 565, 580,

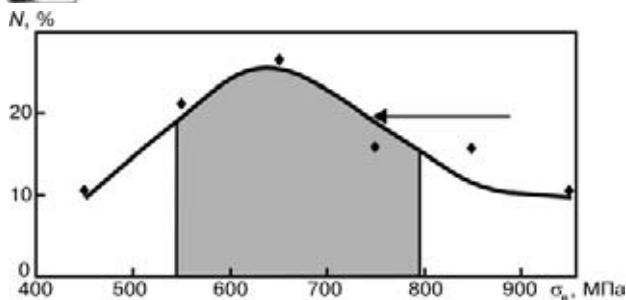


Рис. 3. Статистическая кривая распределения прочности ПС (19 образцов) сплава ВЖЛ12У при 20 °С, полученных с использованием борсодержащих припоев; N – количество образцов; стрелкой показана область наиболее вероятных значений

680 МПа при максимальном значении временного сопротивления 807 МПа.

Статистическая обработка данных механических испытаний паяных соединений на растяжение показала, что область наиболее вероятных значений прочности составила 65 % всех полученных результатов, при этом уровень прочности соответствовал 550... 800 МПа (рис. 3). Прочность 40 % образцов составляла 650... 700 МПа.

Прочность сплава ВЖЛ12У (согласно паспорта) равнялась 850 МПа, а добротность паяных соединений, полученная в трех различных экспериментах по изотермической пайке в вакууме при $T_{max} = 1210$ °С (10 мин), составила 65, 84, 92 % (рис. 2).

Отсутствие выраженного максимума на кривой (рис. 3) указывает на существование нескольких доминирующих технологических факторов при пайке заготовок ВЖЛ12У, могущих повлиять на уровень прочности исследованных паяных соединений.

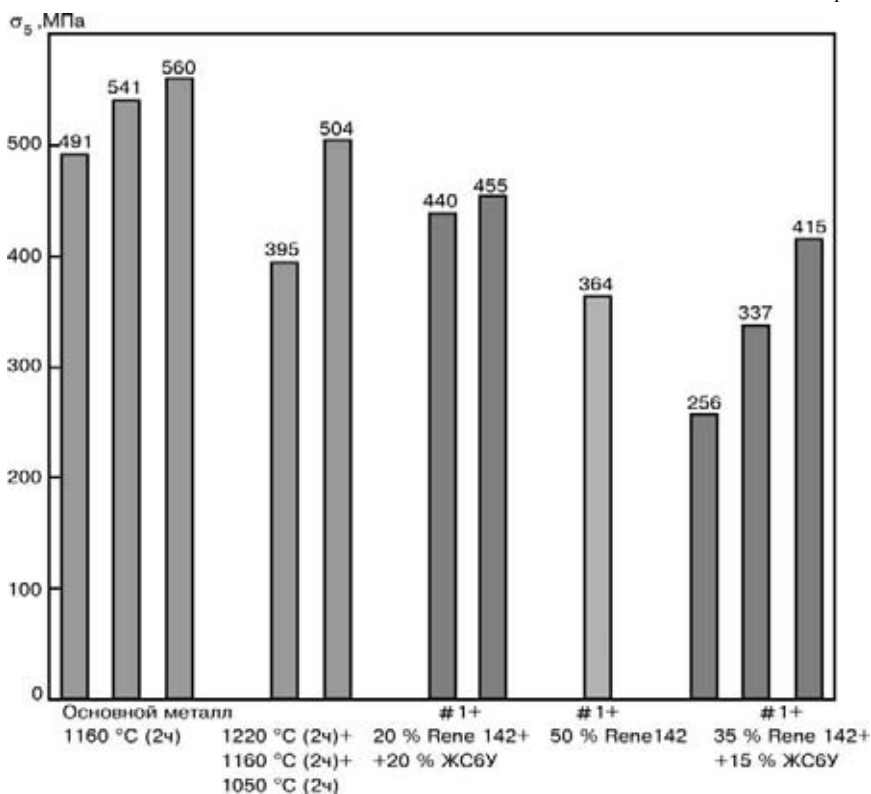


Рис. 4. Прочность сплава ВЖЛ12У и его ПС, выполненных с применением композиционных припоев разного химического состава при 950 °С на воздухе

Вариация фазового состава (соотношение компонентов в композиционном припое) имеет существенное значение в достигаемом уровне кратковременной прочности ПС. Температура и длительность пайки определяют интенсивность термодиффузионного взаимодействия на сопрягаемых поверхностях пластин и размер зерна в металле шва.

Выбор системы припоя с увеличенной легкоплавкой составляющей для лучшего затекания расплава в зазор компенсировали использованием не менее 40 мас. % порошка-наполнителя из сплава Rene-142. Это позволило повысить добротность соединений до 102... 115 %, в сравнении с паяемым сплавом ВЖЛ12У. Применение системы припоя 60 мас. % #1 + 40 мас. % Rene-142 дало возможность получить одно из самых высоких значений прочности паяных соединений.

Тугоплавкие компоненты сплава Rene-142, выполняющего роль наполнителя в паяльных смесях, являются модификаторами для металла формирующихся швов, измельчая его зерно, что способствует уменьшению удельной концентрации боридных фаз по границам раздела. Вместе с тем при испытании образцов ПС на длительную прочность мелкозернистая структура металла шва и сопутствующая микропористость способствовали неудовлетворительному сопротивлению ползучести ПС.

Для улучшения смачиваемости и изменения морфологии эвтектических фаз в металле шва в состав паяльной смеси вводили небольшое количество промышленного припоя НС12, содержащего кремний. Последний заметно улучшает проникновение припоя в капилляры (трещины), возникающие в металле при термическом циклическом нагружении [6].

Два образца ПС, изготовленных с использованием тройной композиции (НС12+#1)+60 % Rene-142 при $T_p = 1215$ °С (15 мин), имели высокие значения не только предела текучести и временного сопротивления, но и относительного удлинения – 4... 9 %.

Пайка бинарной системой #1+50 мас. % Rene-142 по указанному режиму гарантировала стабильный уровень прочности (650... 800 МПа) при незначительной пластичности ($\epsilon = 0,5... 1,6$ %).

В металле ПС с остаточной пластичностью деформация паяного соединения обеспечивалась за счет основного металла, имевшего после двухступенчатой термообработки предел текучести 700... 773 МПа. Результаты различных испытаний образцов были близки, что подтвердило стабильность свойств материала пос



ле выбранных режимов термообработки ПС.

Высокотемпературный отжиг паяных соединений, использованный для выравнивания микроструктуры основного металла и металла паяного шва, не способствовал получению высокого уровня сопротивления ползучести, поскольку при этом произошло укрупнение частиц γ' -Ni₃(Al,Ti)-фазы основного металла и γ' -зернограничной фазы в металле шва. Поэтому целесообразно дополнительно выполнять старение ПС.

Прочность металла ПС при использовании композиционного припоя из 60 % низкоплавкой составляющей и 40 % наполнителя Rene-142 (в одном опыте) после высокотемпературного отжига достигла 874 МПа, а после дополнительного старения при 1050 °С, 2 ч — 985 МПа.

В случае использования припоя 50 мас. % #1 + 25 мас. % Rene-142 + 25 мас. % ЖС6У в первичных опытах при тех же условиях пайки (1220 °С, 10 мин) после высокотемпературного отжига временное сопротивление составляло 327,6... 415,0 МПа, а после старения — 568,7 МПа.

Высокотемпературную прочность сплава ВЖЛ12У и его паяных соединений иллюстрирует рис. 4. Усредненная прочность основного металла при 950 °С после одностадийного отжига в вакууме равнялась 530 МПа. Временное сопротивление состаренного при 1050 °С (2 ч) металла составляло 504 МПа.

Наиболее высокую прочность имели ПС, полученные с использованием композиционного припоя, 40 % наполнителя которого состояло из равных частей порошка сплава Rene-142 и сплава ЖС6У. В этом случае добротность соединений составила 87 %. Дальнейшая замена порошка сплава Rene-142 порошком сплава ЖС6У увеличивала растекаемость припоя, поэтому контактное взаимодействие паяльной смеси с основным металлом усиливалось. Если при комнатной температуре это повышало склонность к охрупчиванию и снижало прочность металла паяных образцов, то при 950 °С уровень прочности соответствующих ПС был наиболее высоким. Добротность соединения, полученного с использованием бинарного припоя 50 мас. % #1 + 50 мас. % Rene-142, при 950 °С достигла 70 %.

Металлографические исследования. В соответствии с сертификатом поставки, низкоплавкий припой #1 (NiCoCrAl-2,5 % В) содержит 13... 14 мас. % хрома и не имеет тугоплавких легирующих добавок. Приближение усредненного химического состава металла паяного шва к базовому сплаву оказалось возможным путем введения в припой наполнителя. Металл шва, по сравнению с базовым сплавом, представлял собой более легированную систему при незначительном снижении алюминия и титана — до 2,3... 3,2 мас. % (таблица).

Большее количество наполнителя в припое способствует получению более высокой вязкости расплава при пайке соединения и, соответственно, меньшего ореола вокруг валика припоя, более сла-

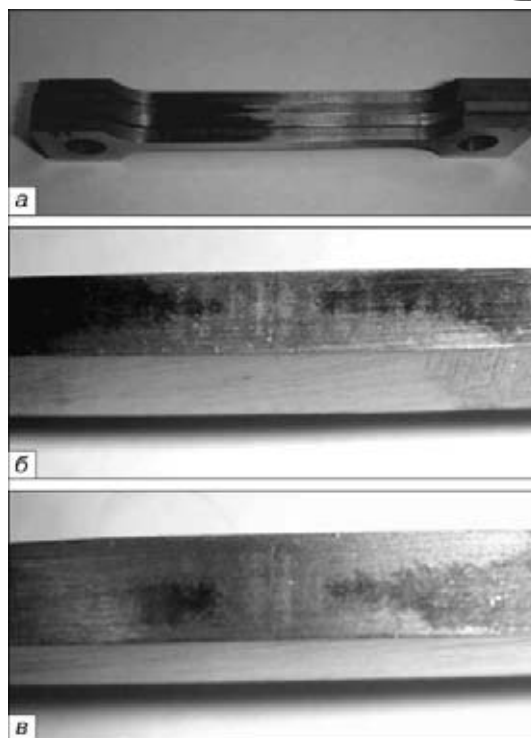


Рис. 5. Общий вид (а) и макроструктура торцевой поверхности рабочей части паяных образцов (б, в)

бому протеканию сквозь зазор, меньшей выпуклости валика на донной поверхности заготовки. Чем более полным был охват расплавом припоя на торцевых поверхностях ПС, тем лучшее качество соединения получали. Большее количество порошка сплава ЖС6У в составе наполнителя обеспечивало лучшее протекание сквозь зазор и растекание припоя в его окрестности. Соответственно, фиксировался более широкий ореол вдоль валика припоя после затвердевания.

После затвердевания припоя и охлаждения заготовки ПС термообработывали.

Макроструктура соединений в поперечном сечении после термообработки представлена на рис. 5. Такую структуру имели образцы для механических испытаний на растяжение. Окончательная термообработка (отжиг при 1050 °С, 2 ч) готовых образцов ПС способствовала вакуумному травлению поверхности их рабочей части, что давало возможность выявить макроструктуру металла паяного шва и околошовной зоны. Благодаря наличию валиков припоя и выпуклости в тыльной части образцов в процессе первого отжига зафиксировано твердофазное взаимодействие между материалом припоя и сплавом ВЖЛ12У, в сечении образца имеющее вид двустороннего ласточкиного хвоста (рис. 5).

Увеличение времени пайки при некотором снижении температуры процесса способствовало выравниванию структуры металла паяного шва, что гарантировало удовлетворительный уровень прочности при испытании ПС на одноосное растяжение при комнатной температуре и 950 °С.

Паяные швы, выполненные с применением бинарных припоев #1+Rene-142 в соотношении 60:40

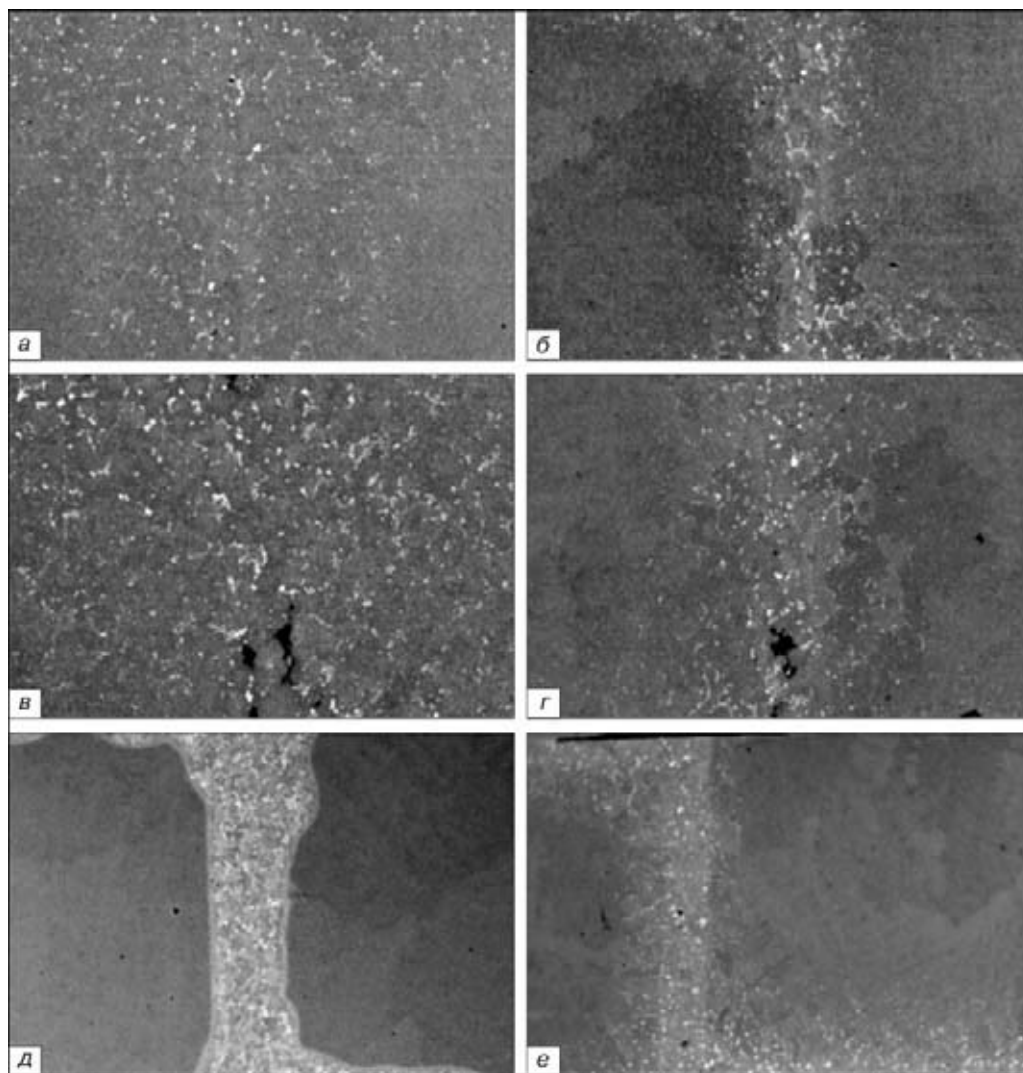


Рис. 6. Микроструктура ПС образцов сплава ВЖЛ12У, сформированных при 1220 °С (10 мин) с применением различных композиционных припоев после двухступенчатой термообработки: *а* – 60 мас.% #1:40 мас.% Rene-142; *б* – 50 мас.% #1:50 мас.% Rene-142; *в* – 50 мас.% #1:(25 мас.% Rene-142+25 мас.% ЖС6У); *г* – 50 мас.% #1:(35 мас.% Rene-142+15 мас.% ЖС6У); *д* – ВПр-24; *е* – (НС-12+ #1):60 мас.% Rene-142

и 50:50, имели ширину в среднем сечении 350...400 мкм. При меньшем количестве наполнителя (40 %) борсодержащий припой взаимодействовал с основой, образуя диффузионную зону глубиной до 500 мкм (рис. 6 *а, б*). Применение после пайки отжига при 1160 °С, 2 ч, способствовало диффузионному взаимодействию и выравниванию структуры между металлом шва и основой (рис. 6). При этом происходило растворение грубых карбидных фаз и превращение их в глобулярные и полиэдрические выделения по границам зерен. Данные фазы представляли собой двойные карбиды типа Me_6C (на основе вольфрама, молибдена, хрома, рения) и дискретные карбиды MeC (на основе титана, тантала, ниобия) (рис. 7 *а, б*).

Применение композиционного припоя системы 50 % #1+35 % Rene-142+15 % ЖС6У позволило получить относительно стабильные результаты по прочности – 626, 637 и 918 МПа. Соединения, сформированные при 1220 °С, 10 мин, характеризовались хорошим растеканием припоя по поверхности, полностью заполняли зазор. Однако на мик-

роструктурах выявили незначительную микропористость, распределенную у тыльной стороны образца, связанную с частичным «выпотеванием» припоя на керамическую подставку в печи (рис. 6, *д*).

При введении в состав припоя порошка сплава ЖС6У зафиксировали выравнивание структуры между металлом шва и основой. В структуре закристаллизовавшегося металла уменьшалось количество составляющих фаз (рис. 6, *в, г*; 7, *в, г*). Высокотемпературный отжиг способствовал растворению грубых карбидных фаз и эвтектики шва, создавая структуру, близкую к таковой основного металла (рис. 8, *а, б*; таблица). В изломе образца, показавшего высокую прочность при растяжении ($\sigma_B = 918$ МПа), преобладала вязкая составляющая (рис. 8, *в, г*).

Увеличение содержания порошка сплава ЖС6У в наполнителе до 25 % вызвало сильное растекание расплава по поверхности и интенсифицировало взаимодействие припоя с основой при последующем высокотемпературном отжиге (рис. 6, *в*). «Выпотевание» припоя ослабляло суммарную площадь кон-

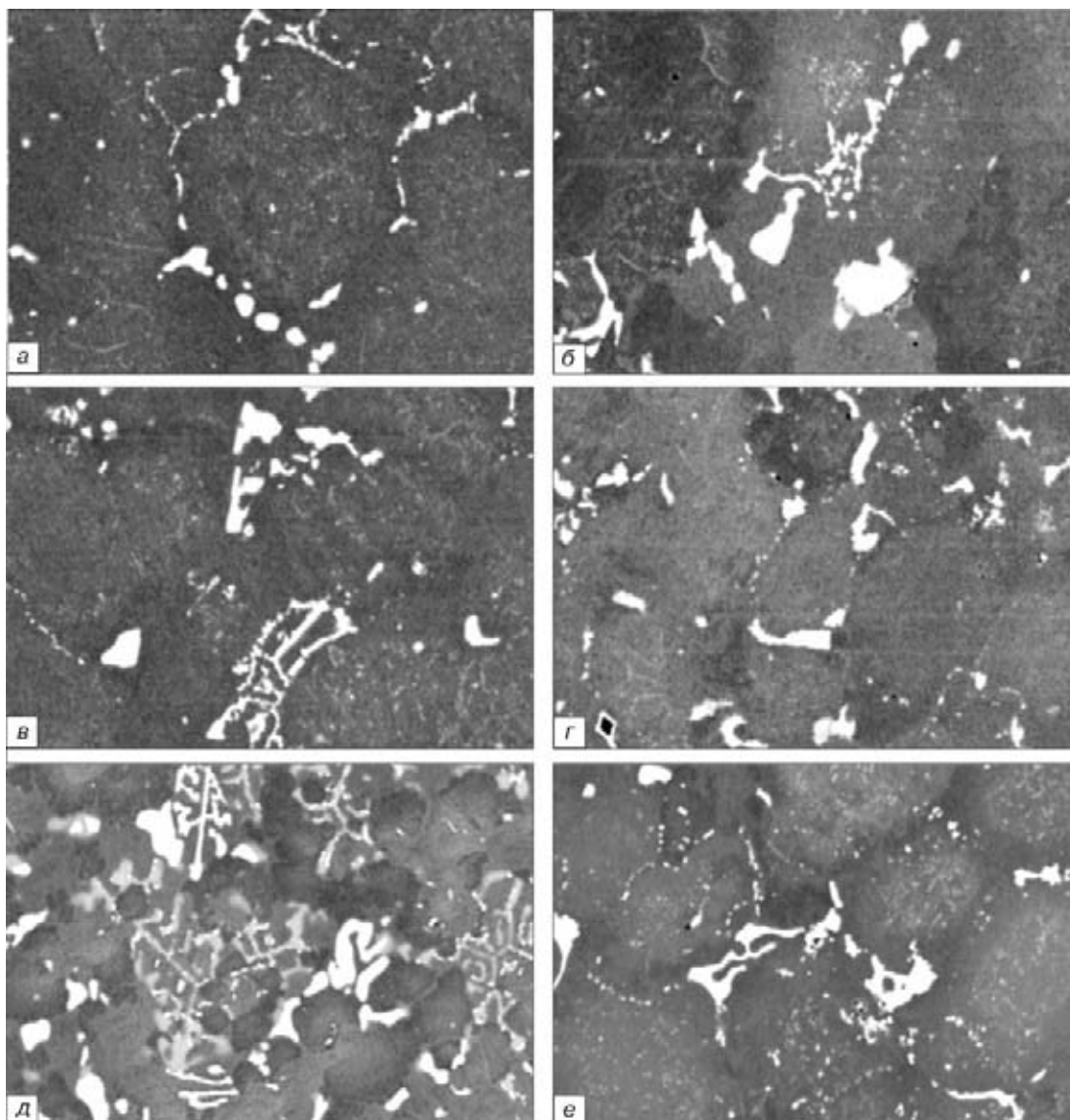


Рис. 7. Особенности микроструктуры ($\times 430$) закристаллизовавшегося металла паяного шва в зависимости от типа применяемого припоя: *a* — 60 мас. % #1:40 мас. % Rene-142; *б* — 50 мас. % #1:50 мас. % Rene-142; *в* — 50 мас. % #1:(25 мас. % Rene-142+25 мас. % ЖС6У); *г* — 50 мас. % #1:(35 мас. % Rene-142+15 мас. % ЖС6У); *д* — ВПр-24; *е* — (НС-12+#1):60 мас. % Rene-142

такта в металле шва, что приводило к раннему разрушению ($\sigma_B = 328$ МПа).

Сплав ВЖЛ12У является материалом с относительно низкой стабильностью структуры. В процессе изотермической пайки и высокотемпературной термообработки между расплавом и металлом основы происходит взаимная диффузия компонентов. Использование в качестве наполнителя порошка сплава ЖС6У с 0,17... 0,2 мас. % углерода и увеличение его массовой доли способствует образованию развитых швов с максимальной шириной диффузионной зоны. Протекание диффузионных процессов прежде всего происходит по границам зерен, поэтому наличие «ручьев» тонких карбидных фаз по границам зерен возникающей диффузионной зоны или игольчатых карбидных фаз Me_6C в ней приводит к раннему разрушению в процессе нагружения.

Присутствие в припое в качестве наполнителя порошка сплава Rene-142, содержащего карбидообразующие элементы (рений, тантал, гафний, воль-

фрам), способствует образованию в закристаллизовавшемся металле шва большого количества карбидов. При двухстадийной термообработке после пайки карбиды в основном представляли собой полиэдрические выделения MeC (на основе титана, ниобия, тантала). На границе с основным металлом, содержащим до 0,2 % углерода, карбидные фазы выделялись в виде дисперсных частиц по границам зерен. Именно они создавали барьер для дальнейшей диффузии легкоплавких компонентов, например бора, и «разъедания» основы. В свою очередь, указанные карбидные фазы наряду с выпадающей из высоколегированного твердого раствора γ' -фазой повышали прочность ПС.

Правильно подобранная термообработка для образцов с использованием композиционного припоя #1 + Rene-142 + ЖС6У способствовала получению ПС с добротностью 51... 78 %, а системы #1 + Rene-142 — с добротностью 80... 115 % основного сплава. Кроме хороших прочностных свойств, некоторые



Химический состав металла шва ПС, сформированных в процессе высокотемпературной пайки сплава ВЖЛ12У с применением различных композиционных припоев

Тип припоя	Массовая доля компонентов, %											
	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Re	Hf	Si
Сплав ВЖЛ12У	Основа	8,5... 10,5	12,0... 15,0	2,7... 3,4	1,0... 1,8	–	0,5... 1,0	5,0... 5,7	4,2... 4,7	–	–	–
60%#1+40% Rene-142	60,69	10,2	14,12	1,50	2,02	1,58	0,48	5,47	2,62	0,80	0,50	–
50%#1+50% Rene-142	62,83	9,33	12,24	1,90	2,82	1,15	0,80	5,03	2,24	0,78	0,90	–
40%#1+60% Rene-142	59,80	9,70	11,20	2,46	5,0	2,38	2,75	3,80	2,85	0,62	0,13	–
50%#1+35% Rene-142+15% ЖС6У	64,55	9,50	12,62	2,61	1,8	1,40	0,65	4,34	2,74	1,13	–	–
50%#1+25% Rene-142+25% ЖС6У	59,97	8,87	13,22	2,85	3,23	1,86	0,67	5,36	3,20	0,77	–	–
ВПр-24	59,75	7,81	10,14	1,86	6,21	–	4,20	5,45	2,84	0,49Fe	–	1,26
20%#1+60% Rene-142+НС12	62,19	9,00	12,75	2,20	1,60	2,22	0,46	4,28	2,00	0,80	0,95	1,57

исследованные образцы ПС имели небольшое удлинение (примерно до 1,6 %). Тонкая структура основы, диффузионных зон и металла шва имела как первичную укрупненную, так и вторичную дисперсную упрочняющую γ' -фазу (рис. 9).

Фрактография изломов образцов после испытаний на растяжение характеризовалась сочетанием вязкого разрушения и межзеренного с преобладанием вязкой составляющей (рис. 8).

Использование высоколегированного припоя ВПр-24 с 3 % кремния в качестве депрессанта позволило обеспечить формирование в результате пайки и отжига паяного шва шириной 400 мкм с четкими очертаниями линии сплавления основа–припой (рис. 6, д). Именно кремний, почти полностью растворяясь в матрице, ограничивал проникновение бора (до 0,3 %) в основной металл. Ширина зоны взаимной диффузии составляла в этом случае всего 50 мкм.

Наличие в припое ВПр-24 10 % ниобия вызывало образование крупных карбидных фаз частиц MeC в объеме зерен, а повышенное содержание кремния — карбосилицидов никеля и ниобия в междендритных областях (рис. 7, д). Выделившиеся фазы достаточно стабильны при температуре отжига 1160 °С, 2 ч и являются участками зарождения трещин при механических испытаниях. На фрактограмме разрушения такого паяного соединения преобладало транскристаллитное разрушение (рис. 8, д, е).

Для улучшения жидкотекучести относительно вязкого композиционного припоя #1 + Rene-142, хорошей заполняемости зазора без образования микропор и ослабления реакционной способности борсодержащего припоя #1 в него вводили небольшое количество промышленного припоя НС12 ($T_{\text{п}} = 1180$ °С) с 12 % кремния в качестве депрессанта. Кремний частично нейтрализует вредную роль бора. Полученный шов в ПС имел ширину не более 300 мкм, а диффузионная зона при этом составляла не более 100 мкм (рис. 6, е).

После высокотемпературной термообработки закристаллизовавшийся шов имел дендритную структуру с размером ячейки 30 мкм и представлял собой высоколегированный матричный раствор с выделениями карбидных фаз. Кремния растворялось в матрице до 1,5 мас. % по оси дендрита и до 2,5 мас. % в междендритных областях. Выявленные карбидные фазы были двух типов: дисперсные пограничные типа Me_{23}C_6 (на основе хрома, вольфрама, молибдена, рения) и более крупные глобулярные типа MeC, в состав которых, кроме обычно присутствующих тантала, гафния, титана, входило до 8 % никеля и кремния (рис. 7, е).

Карбидные фазы в металле шва глобулярной конфигурации не оказывали отрицательного воздействия на прочность соединений; правильно подобранная термообработка позволила получить соединения с добротностью 102... 107 %.

В картине излома образца сочеталось вязкое и транскристаллитное разрушение при растяжении. Четко зафиксированы скоагулированные карбидные частицы MeC, присутствовавшие в микроструктуре металла шва. Разрушение при испытании происходило по границам зерен основного металла (рис. 8). Прочность паяных соединений с кремнием оказалась достаточно высокой ($\sigma_{0,2} = 717,8$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 907,5$ МПа). На продольной структуре испытанного образца имелось только локальное расслоение по линии контакта паяных пластин.

Обсуждение полученных результатов. Различное соотношение низкоплавкой борсодержащей составляющей и наполнителя из порошков никелевых жаропрочных сплавов ЖС6У и Rene-142 позволяет реализовать не только оптимальную текучесть припоя (его растекаемость по примыкающей к дефектам поверхности), но и проникновение расплава припоя в зазоры (капилляры) как модельных образцов, так и реальных деталей с трещинами термической усталости.

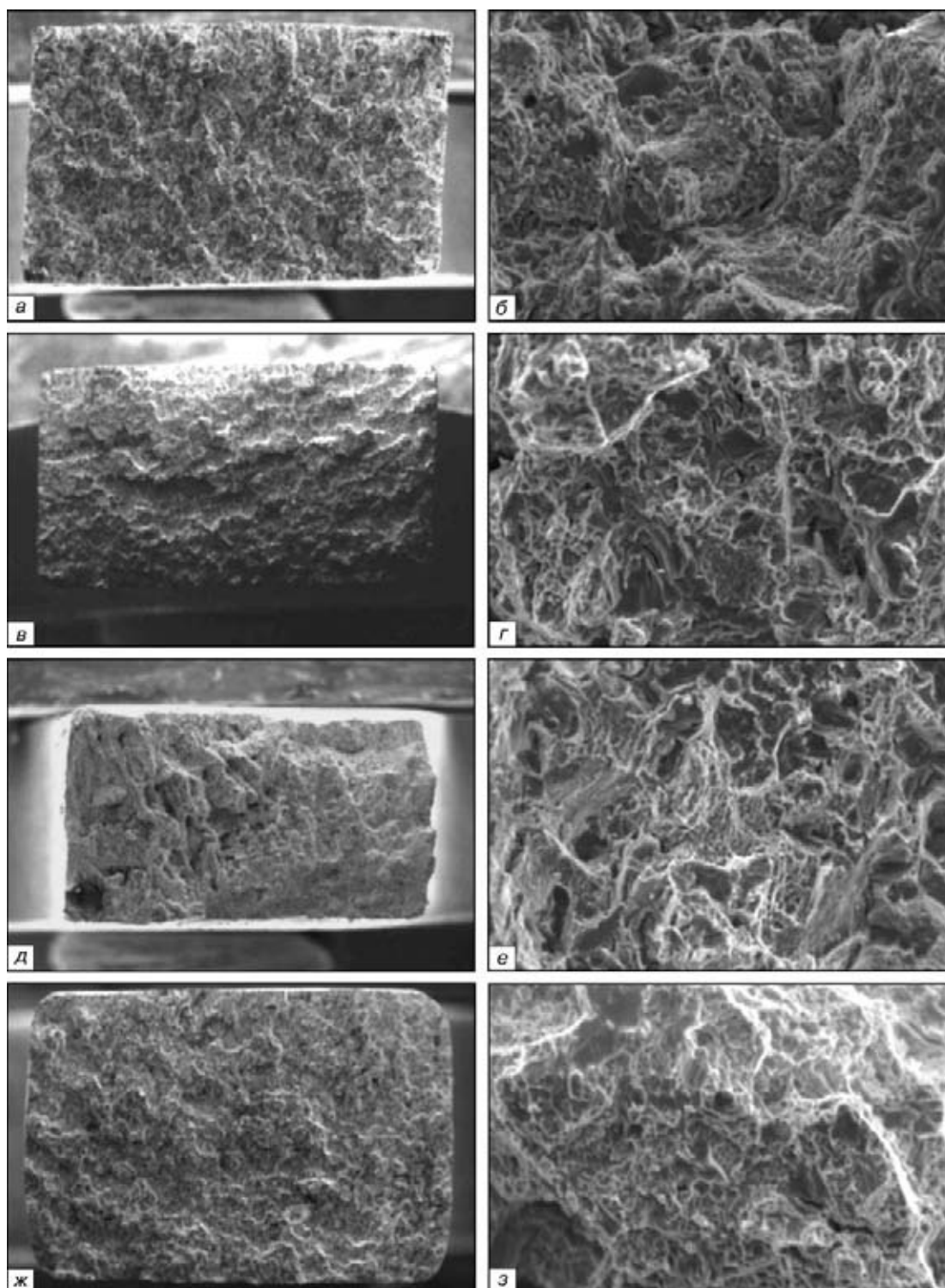


Рис. 8. Картина разрушения образцов ПС, полученных с использованием композиционных припоев, при одноосном растяжении: а, б — припой 50 % #1 + 50 % Rene-142 ($D = 80\%$); в, г — припой 50 % #1 + 35 % Rene-142 + 15 % ЖС6У ($D = 108\%$); д, е — припой ВПр-24 ($D = 88,6\%$); ж, з — (НС12 + #1): 60 % Rene-142 ($D = 97\%$); а, в, д, ж — $\times 23$; б, г, е, з — $\times 450$

Насыщение металла шва легирующими добавками за счёт «благородного наполнителя», каким является порошок сплава Rene-142, обеспечивает достижение высокого уровня кратковременной прочности ПС при 20 и 950 °С. Добротность соединений, характеризующая соотношение значений временного сопротивления металла паяного шва и основного металла в аналогичных условиях испытаний, составляет 65... 100 %.

Получить удовлетворительное сопротивление ползучести (длительной прочности) ПС сплава ВЖЛ12У при использовании режимов окончательной термообработки в вакууме (режимов термофиксации створок) не удалось. Было отмечено не только низкое сопротивление ползучести металла ПС, но и основного металла вследствие присутствия во внутренних объемах металла рассеянной микропористости, не выходящей наружу. Причина этого отрицательного результата до конца не выяснена, воз-

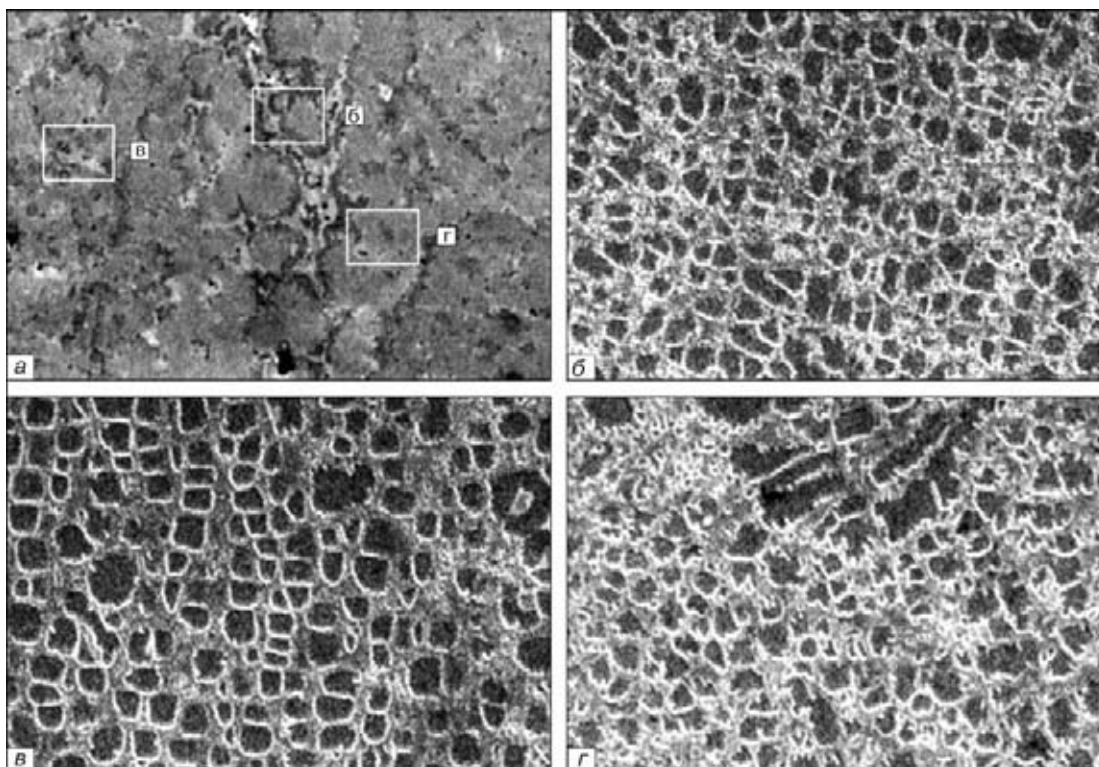


Рис. 9. Тонкая (γ - γ') структура металла паяного шва ВЖЛ12У/60 % #1 + 40 % Rene-142/ВЖЛ12У (а) на образце ПС, полученном при 1220 °С, 10 мин, после двухступенчатой термообработки в различных зонах, а также γ' -фаза в шве (б); основном сплаве (в) и диффузионной зоне (д); а – $\times 140$; б-д – $\times 5000$

можно, это связано с условиями отливки соответствующих деталей [9]. Разрушение паяных образцов происходило по металлу шва. Наличие мелкого зерна в металле шва отчасти объясняет слабое сопротивление ползучести соединений, полученных способом контактной пайки.

Анализ процесса пайки пластин сплава ВЖЛ12У, выполненной на различных режимах, показал, что лучшими паяльными смесями из порошков никелевых сплавов являются припой #1 с 40...50 мас. % Rene-142 и с 35 мас. % Rene-142 + 15 мас. % ЖС6У в качестве наполнителей припоя.

Оптимальная температура пайки пластин сплава ВЖЛ12У находится в интервале 1210...1220 °С, продолжительность пайки составляет 15...10 мин.

Введение кремния в состав паяльной смеси, кроме улучшения офлюсовывающей способности припоя, обеспечивает стабильную прочность металла шва и позволяет получать за счет деформации основного сплава относительное удлинение ПС в пределах 4...5 %.

Присутствие незначительного количества кремния в паяльной смеси благоприятно в виду увеличения выхода годного при формировании ПС. Все образцы имеют удовлетворительный уровень прочности (более 800 МПа), хрупкое межзеренное разрушение в металле шва отсутствует.

На газодинамическом стенде Института проблем прочности НАН Украины были проведены термодинамические прожигающие испытания фрагментов створок, запаянных композиционными припоями в продуктах сгорания керосина при $T_{\max} = 1000$ °С. Термоусталостных разрушений в основном металле и в зоне пайки после 100 термодинамических циклов выявлено не

было, что подтвердило эффективность разработанной технологии ремонтной пайки.

Авторы выражают признательность Е. В. Оноприенко за помощь в проведении структурных исследований.

1. Диагностика авиационных деталей / В. Н. Лозовский, Г. В. Бондал, А. О. Каксис, А. Е. Колтунов. — М.: Машиностроение, 1988. — 280 с.
2. Никифорова З. В., Румянцева С. Г., Широкова Е. П. Пайка жаропрочных сплавов // Авиационная промышленность. — 1973. — № 4. — С. 66-68.
3. Pat. 6.454.885 USA. C22C 019/05. Nickel diffusion braze alloy and method for repair of superalloy / R. P. Chensness, R. R. Xu. — Publ. 24.09.2002.
4. Pat. 6.530.971 USA. B22F 001/00. Nickel base braze material and braze repair method / J. H. Cohen, D. E. Budinger, J. M. Caldwell, M. G. Gordon, E. J. Emilianowicz. — Publ. 11.03.2003.
5. Гаврилов О. В. Вакуумная пайка деталей и узлов газотурбинных двигателей // Сварщик. — 2004. — № 2. — С. 20-21.
6. Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1986. — 220 с.
7. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.
8. Никелевый литейный сплав для сопловых лопаток ГТД / С. Т. Кишкин, В. А. Панкратов, А. И. Луковкин и др. // Авиационная промышленность. — 1981. — № 12. — С. 37-38.
9. Влияние технологических факторов на структуру и свойства сплава ВЖЛ12У / С. С. Шлиндлер, М. И. Лонда, Я. П. Портной, К. Н. Калашникова // Там же. — 1978. — № 3. — С. 62-64.
10. Панкратов В. А., Шальгина В. И. Влияние кратковременных нагревов на структуру и свойства сплава ВЖЛ12У // Там же. — 1979. — № 6. — С. 59.
11. Ф. Ф. Химишин. Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1969. — 752 с.
12. Pat. 5.902.421 USA. C21D 1/0/9. Nickel base braze material / S. Christy. — Publ. 11.05.1999.

Исслед. центр «Пратт и Уитни Патон», Киев
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 10.03.2006