

УДК 621.791.3: 669: 620.17

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТЕЙНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС26ВИ. Часть 1

И. С. Малашенко, В. В. Куренкова, Е. В. Оноприенко,  
В. В. Трохимченко, А. Ф. Белявин, Л. В. Червякова

Рассмотрена взаимосвязь физико-механических свойств металла шва и паяных соединений с микроструктурой литейного никелевого сплава ЖС26ВИ, полученных с использованием комплексных припоев, содержащих в качестве депрессантов бор и кремний. Кремний добавляли в виде порошка промышленного припоя НС12 (Ni — 12 мас.% Si). Наилучшие результаты получены при введении в комплексный припой 20 мас.% НС12. В этом случае паяные соединения характеризуются прочностью на уровне 670...760 МПа, а их относительное удлинение достигает 13 % при комнатной температуре.

Interrelation of physical-mechanical properties of metal and brazed joints with microstructure of cast nickel alloy ZhS26VI, produced using complex brazing alloys, containing boron and silicon as depressants, was studied. Silicon was added in the form of industrial brazing alloy NS12 (Ni — 12wt. % Si). The best results were obtained in adding of 20 wt. % NS12 into the complex brazing alloy. In this case the brazed joints are characterized by strength at the level of 670-760 MPa, and their elongation reaches 13 % at room temperature.

**Ключевые слова:** пайка в вакууме; литейный сплав ЖС26ВИ; борсодержащий припой; кремнийсодержащий припой НС12; паяное соединение; прочность; удлинение; структура; разрушение

**Введение.** Среди отечественных никелевых жаропрочных сплавов (ЖС) литейный сплав ЖС26ВИ используется в качестве одного из основных материалов при изготовлении теплонапряженных деталей (рабочих лопаток) турбин. В серийном производстве его получают как равноосной, так и направленной кристаллизацией [1–4]. Служебные характеристики сплава существенно зависят от технологии выплавки, в частности от температуры перегрева расплава, определяющей изменение дендритной структуры [2], и полноты дегазации металла отливки [3].

Функциональные свойства деталей из никелевых ЖС улучшают путем применения в процессе отливки направленной кристаллизации. Ориентированное затвердевание литого металла препятствует возникновению границ зерен, перпендикулярных направлению действия внешних нагрузок.

Механические свойства сплава ЖС26 с поликристаллической структурой исследовали в работе [4]. В публикациях [4, 5] показана зависимость вре-

менного сопротивления и относительного удлинения литого металла от кристаллографической ориентации макрозерен в образцах отливок. Максимальное значение временного сопротивления сплава ЖС26НК, равное 1200...1253 МПа при 20 °С, соответствовало направлению  $\langle 111 \rangle$ . При этом относительное удлинение металла составляло около 10 %. Образцы сплавов, проекции осей роста которых соответствовали центральной части стереографического треугольника, имели минимальные значения прочности (780...840 МПа) при относительном удлинении 14,5...20,0 %. Разориентировка образцов друг относительно друга в этом случае не превышала 12 градусов. Таким образом, механические свойства сплава ЖС26, микроструктура которого отвечает центральной области стереографического треугольника, близки таковым поликристаллического сплава с равноосным зерном. Приведенные данные служили базой для сравнения с механическими свойствами паяных соединений (ПС) сплава ЖС26ВИ, имевших при комнатной температуре относительное удлинение 7...13 %.

Основное требование, предъявляемое к никелевым ЖС, — это термическая стабильность их струк-



туры при температуре эксплуатации изделия, определяемая жаропрочностью твердого матричного раствора, низкой скоростью коагуляции и растворения основной упрочняющей  $\gamma$ -фазы, кинетикой карбидных реакций. Термическая стабильность связана с легирующим комплексом сплава, т. е. с составом и количеством компонентов, особенно имеющих низкие коэффициенты диффузии. Ниобий, ванадий, как и гафний, тантал, распределяясь между матрицей,  $\gamma$ -фазой и карбидными фазами, ограничивают диффузионные процессы в базовой жаропрочной системе Ni–Cr–Co–W–Mo–Ti–Al и увеличивают энергию атомных связей. Ванадий, входящий в состав ЖС26, является наиболее слабым  $\gamma$ -образующим элементом. Его роль в основном заключается в увеличении растворимости тугоплавких компонентов в матричном растворе, что способствует торможению диффузионных процессов в никелевых сплавах [6–7].

Сопротивление коагуляции и растворение  $\gamma$ -фазы при пайке ЖС определяется легирующим комплексом металла шва, в связи с чем химический состав низкоплавкого припоя и наполнителя служат факторами, определяющими уровень термостабильности соединения. Резервом повышения функциональной надежности ПС является оптимизация химического состава используемого наполнителя, наличие в его составе элементов с высокой температурой плавления и низкими коэффициентами диффузии, а также финальная термообработка восстанавливаемого изделия.

Уровень жаропрочности, технологической пластичности, сопротивления усталости литейных никелевых сплавов определяют количество и форма карбидных фаз в матричном растворе. Выделяясь вдоль границ кристаллитов, карбидные частицы препятствуют межзеренному проскальзыванию при высоких значениях температуры и напряжения, повышают сопротивление ползучести и длительную прочность материала. Вместе с тем они снижают пластичность и выносливость металла.

При относительно медленном охлаждении отливок или восстанавливаемых пайкой деталей в литом металле образуются карбиды  $Me_{23}C_6$  сложной формы (преимущественно на основе хрома), являющиеся источниками зарождения трещин и обуславливающие снижение пластичности и вязкости разрушения при низкой температуре. В процессе затвердевания вследствие разницы термических коэффициентов линейного расширения матрицы и карбидных фаз возникает концентрация внутренних напряжений, что также уменьшает сопротивление усталости. При низком содержании углерода в литом металле (<0,02 %) карбиды вместо формы иероглифов приобретают округлую, что способствует росту пластичности ЖС [8].

Изотермическая пайка при высокой (>1180 °C) температуре в вакууме является эффективным способом ремонта деталей горячего тракта современных газотурбинных двигателей и установок. Подбор

рациональных систем припоев, где в качестве депрессантов присутствуют кремний и бор в сочетании с порошковыми наполнителями из многокомпонентных никелевых ЖС (типа Rene-142, ЖС6У, ЖС32), совместно с финишной вакуумной термообработкой позволяет восстанавливать единичные и сложные детали соплового аппарата турбины, а также створки сопел, претерпевшие в процессе эксплуатации термоусталостное разрушение и т. д.

**Материалы и методика эксперимента.** Для получения паяных соединений сплава ЖС26ВИ способом контактной изотермической пайки в вакууме использовали литые пластины толщиной 6 мм и размерами 45×100 мм заводского изготовления. Пластины получены с равноосной кристаллизацией. После распускания пластин на более тонкие заготовки толщиной 2,6... 2,8 мм их шлифовали и подвергали вакуумному отжигу при температуре 1220 °C в течение 1 ч. Давление остаточных газов в камере составляло не более  $5,6 \cdot 10^{-3}$  Па. Для изготовления ПС способом контактной пайки использовали пластинки 12×21 мм. Применяли также заполнение зазоров длиной примерно 10 мм и шириной 550... 600 мкм, выполненных в заготовках 13×60 мм при помощи электроискровой резки. Надрезанные заготовки обдували порошком SiC и повторно отжигали.

Пластины имели произвольную структуру роста. Преимущественная ориентация дендритов в затвердевшем металле обусловлена сопутствующим теплоотводом при заливке в форму. При формировании ПС фактор направленности роста дендритов в заготовке не учитывали, и стыковка пластинок, составляющих будущее соединение, была произвольной. Таким образом, ПС получали из металла равноосной кристаллизации.

В качестве базового припоя использовали композицию из легкоплавкой составляющей на основе системы Ni–Co–Cr–Al–2,5 % В (#1), а также порошков литейных ЖС Rene-142 и ЖС6У. Традиционно применение порошка сплава Rene-142 в качестве наполнителя обусловлено тем, что вольфрам, тантал и рений как основные легирующие добавки способствовали снижению диффузионной подвижности компонентов в расплаве и увеличению энергии межатомных связей в металле шва. Использование порошка сплава ЖС6У в качестве наполнителя припоя позволяло приблизить химический состав паяльной смеси к таковому основы.

Опыт работы с ПС, полученными с использованием борсодержащих припоев и имеющими в качестве депрессанта порошок Ni–12 % Si, а также с ремонтом створок АГТД из литейного сплава ВЖЛ12У, показал несомненное преимущество первых [9]. Находясь в твердом растворе металла шва, кремний влияет на форму выделяющихся карбидных фаз, а также подавляет формирование первичных карбидов типа «китайский шрифт», снижает температуру растворения карбидных фаз матрице, способствует

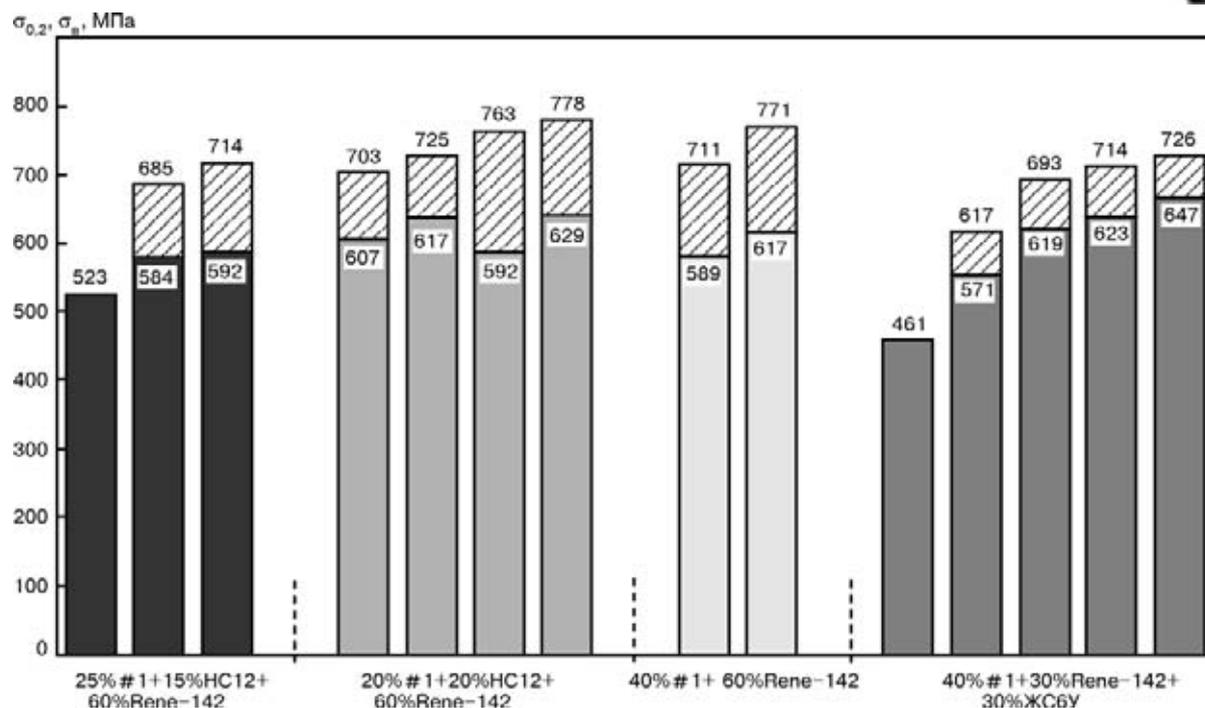


Рис. 1. Прочность ПС сплава ЖС26ВИ, полученных способом контактной пайки при 1220 °С, 15 мин в вакууме  $8 \cdot 10^{-3}$  Па с использованием композиционных борсодержащих припоев без кремния и с добавлением кремния в виде порошка сплава Ni-12 % Si; нижние цифры обозначают  $\sigma_{0,2}$ ; верхние —  $\sigma_b$

выпадению более мелких карбидных фракций, диспергирует карбидную фазу в объеме поликристалла и по границам закристаллизовавшихся зерен металла шва.

Для изотермической пайки сплава ЖС26 рассмотрено несколько композиций припоев, содержащих дополнительно в качестве присадки промышленный припой HC12 и без него. Основным наполнителем в паяных смесях служил порошок сплава Rene-142 (рис. 1): 40 % #1 + 60 % Rene-142; 20 % #1 + 20 % HC12 + 60 % Rene-142; 25 % #1 + 15 % HC12 + 60 % Rene-142; 40 % #1 + 30 % Rene-142 + 30 % ЖС6У.

Припой наносили на контактируемые поверхности заготовок и сжимали их при усилии до 30 Н либо покрывали щель зазора, запрессовывая паяльную смесь внутрь. Технологический процесс пайки был неизменным, применяли ступенчатый режим нагрева [10].

Максимальная температура пайки в различных опытах составляла 1210...1230 °С. В зависимости

от температуры длительность изотермической выдержки при  $T_{max}$  составляла 30...10 мин: с повышением температуры сокращалось время пайки. Спаянные образцы подвергали финишной термообработке. Оптимизация режимов вакуумного отжига после пайки являлась наиболее ответственной задачей.

Помимо оценки механических свойств ПС, исследовали кратковременную и длительную прочность основного металла – сплава ЖС26ВИ в состоянии поставки и после двух вариантов комплексной термообработки для образцов ПС. Оба варианта включали гомогенизирующий отжиг ПС при 1160 °С, 2 ч, позволяющий перераспределить в растворе легирующие элементы, а также способствующий растворению грубых первичных карбидных фаз и выравниванию размеров и формы упрочняющей  $\gamma'$ -фазы; старение при температуре 1050 (2 ч) и 900 °С (3 ч), приводящее к дополнительному выделению субдисперсной  $\gamma'$ -фазы из твердой фазы, объемная доля которой определяет прочность и пластичность ЖС.

№ образца	Режим термообработки	Сечение образца, мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
G1	Исходный	5,33	644,0	773,0	16,2
G2		5,21	659,0	738,0	8,5
G3	1210 °С, 1 ч + 1160 °С, 2 ч + 1050 °С, 2 ч	5,17	578,7	719,0	13,2
G4		5,19	567,0	705,0	8,5
G5	1210 °С, 1 ч + 1160 °С, 2 ч + 900 °С, 3 ч	5,27	670,0	774,4	13,2
G6		5,17	683,0	872,8	8,5

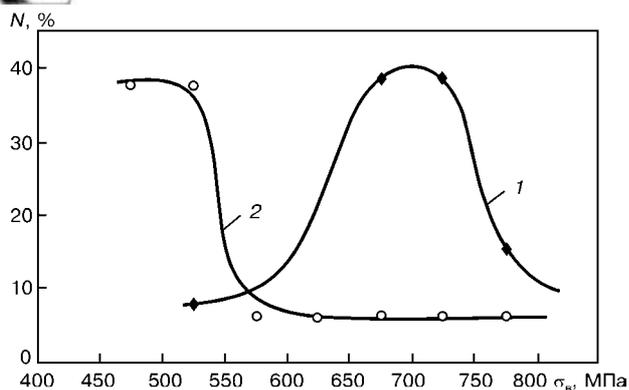


Рис. 2. Статистические кривые распределения значений прочности ПС сплава ЖС26ВИ, полученных с использованием припоя #1 + 60 % Rene-142 с присадкой 20 % порошка НС12 при температуре пайки 1220 °С, 15 мин (1) и 1230 °С, 10 мин (2);  $N$  — количество образцов

**Экспериментальные результаты.** Результаты механических испытаний сплава ЖС26 показали, что термообработка основного сплава по режиму, близкому к таковому термообработки металла ПС (отжиг при 1220 °С, 1 ч + 1160 °С, 2 ч + 900 °С, 3 ч) немного повышает временное сопротивление и предел текучести сплава, обеспечивая механические свойства, характерные для ЖС26 равноосной кристаллизации (табл. 1) [4].

Влияние различных теплофизических режимов пайки  $T_{\text{п}} = 1220, 15$  мин и 1230 °С, 10 мин прослеживается на рис. 2, где сравниваются результаты статистической обработки данных механических испытаний ПС на растяжение, полученных с использованием комплексного припоя с 20 % НС12. Увеличение температуры пайки на 10 °С вызвало снижение значений пластических и прочностных характеристик металла шва и линии сплавления ПС сплава ЖС26.

Более 70 % образцов, полученных при  $T_{\text{п}} = 1230$  °С, имели прочность 450...550 МПа и нулевую пластичность. В то же время 85 % образцов, выполненных при  $T_{\text{п}} = 1220$  °С, 15 мин, сочетали удовлетворительную прочность (650...800 МПа) с относительным удлинением (3...13 %). Добротность  $D$  паяных соединений составляла 83...110 %.

Однозначно увеличение температуры пайки на 10 °С вызвало незначительный рост предела текучести (более легированный твердый раствор), снижение пластичности и временного сопротивления металла шва. Контактная пайка пластин при 1220 °С в течение 15 мин дала значительно лучший результат, по сравнению с выдержкой 10 мин при 1230 °С (рис. 2).

Увеличение температуры процесса пайки не гарантировало улучшения функциональных характеристик ПС. В случае пайки при 1220 °С металл шва сохранял плотность своей структуры. При более высокой температуре пайки возрастала склонность к выпотеванию эвтектической составляющей затвердевшего припоя из металла шва при высокотемпературном гомогенизирующем отжиге (1160 °С, 2 ч), что приводило к разупрочнению шва.

Для ПС, сформированных при 1230 °С, 10 мин, использовали два режима окончательного отжига: двух- (1160 °С, 2 ч + 1050 °С, 2 ч) и одностадийный при 1080 °С, 2 ч. Одностадийный отжиг дал худшие результаты по пластичности ПС для обоих вариантов припоев. Разрушение происходило ниже предела текучести. В то же время часть ПС, отожженных по двухстадийной схеме, показала удовлетворительную пластичность — относительное удлинение составило 2,3...8,0 %. Таким образом, температура пайки 1230 °С для припоя с 20 мас. % НС12 является пороговой. Избирательное выпотевание низкоплавкой фракции припоя из металла шва вызывает появление в нем пористости и, соответственно, снижение прочности и пластичности металла ПС.

Прочность ПС, полученных с использованием различных систем припоев составляла 685...771 МПа ( $\sigma_{\text{в}} = 721$  МПа). Достигнута стабильность высоких значений прочности ПС, выполненных комплексным припоем с 20 % НС12, в сравнении с соединениями, полученными с использованием базового припоя 40 % #1 + 60 % Rene-142 (рис. 2). Базовый припой не обеспечивает запас пластичности соединениям, подверженным хрупкому разрушению при растяжении. Такой эффект связан с миграцией бора к линии сплавления при температуре пайки. Его накопление у линии сплавления является основной причиной данного негативного явления.

Обращает внимание высокая плотность значений кратковременной прочности металла ПС, полученных с использованием в паяльной композиции порошка НС12. Главный результат заключается в одинаковом уровне прочности соединений, определяемый структурным состоянием паяемого металла, т. е. режимом окончательной термообработки ПС. В ПС, полученных с использованием комплексного припоя 20 % НС12, разрушение происходило, как правило, по основному металлу либо по линии сплавления. При этом относительное удлинение образцов соединений равнялось 7...18 %.

В соответствии с принятой технологией, финишный отжиг после изотермической пайки и быстрого охлаждения состоял из двух ступеней: 1160 °С, 2 ч + 1050 °С, 2 ч. Механические свойства основного металла после указанной термообработки приведены в табл. 1 и соответствуют результатам испытаний ПС на растяжение. Совпадение значений пределов текучести металла ПС и основного близко к идеальному.

Упрочнение матрицы обеспечивается за счет выделения в твердом растворе интерметаллидных фаз сложного химического состава. Что касается временного сопротивления, то здесь вступает в конкуренцию структура границ зерен паяемого металла и морфология выделяющихся фаз в зоне термодиффузионного взаимодействия (химической эрозии).

Влияние режима окончательного старения на физико-механические свойства металла ПС прослеживается на рис. 3. Основным результатом является в том, что все ПС, отожженные при 900 °С, 3 ч, имели более высокий уровень прочности и не-

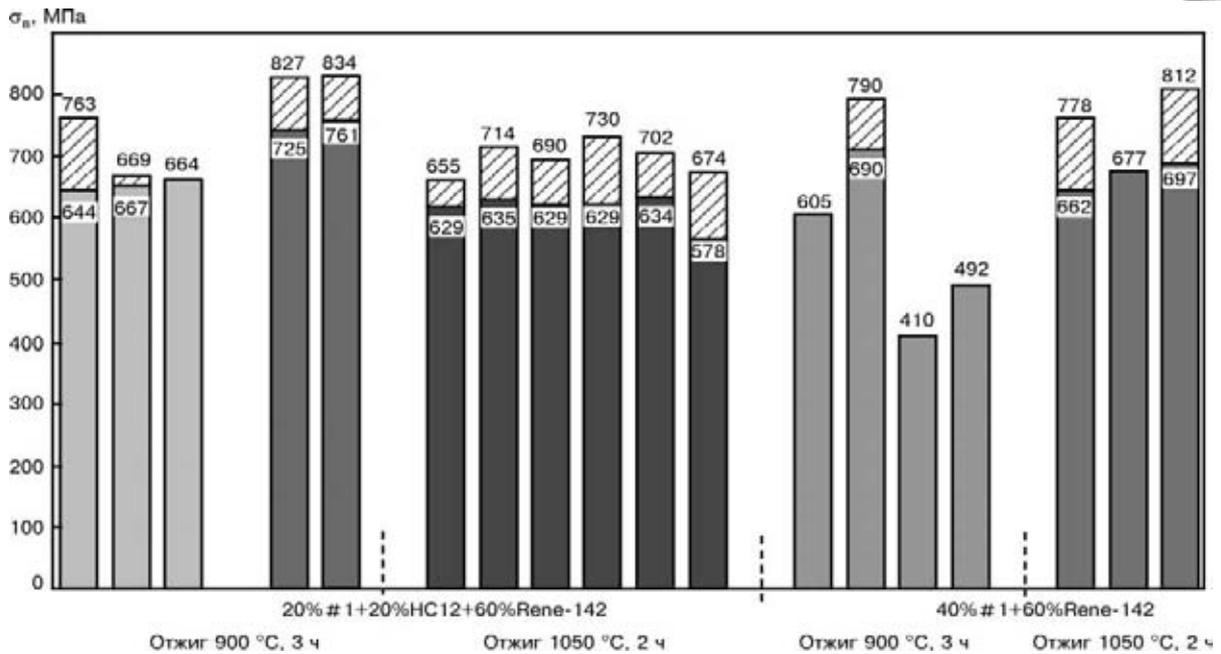


Рис. 3. Предел текучести и временное сопротивление при 20 °С ПС сплава ЖС26ВИ, полученных способом контактной изотермической пайки при 1220 °С, 20 мин, в вакууме  $5,5 \cdot 10^{-3}$  Па с использованием базового припоя 40 % #1 + 60 % Rene-142 и комплексного припоя (с добавлением 20 % HC12); нижние цифры обозначают  $\sigma_{0.2}$ ; верхние —  $\sigma_b$

сколькую меньшую пластичность, в сравнении с образцами, отожженными при 1050 °С, 2 ч.

Другой результат состоит в том, что ПС, выполненные с использованием комплексного припоя, содержащего 20 % HC12, характеризуются высокой технологической пластичностью при комнатной температуре и большей работой, затрачиваемой на разрушение образцов при их испытаниях на растяжение.

Паяные соединения сплавов ВЖЛ12У и ЖС6У, выполненные теми же припоями и в аналогичных теплофизических условиях, имели  $\sigma_b$  на 100 МПа выше таковой соединений сплава ЖС26ВИ (табл. 1) [9]. Химия металла шва соединений этих сплавов примерно одинакова (в силу идентичности паяльных смесей). Таким образом, прочность металла швов ПС сплава ЖС26 должна быть выше прочности паяемого металла, что и зафиксировано в реальном эксперименте при испытаниях на растяжение.

Очагами разрушения ПС сплава ЖС26 стали дефекты структуры основного металла вблизи линии сплавления. Возникающие в основном металле трещины у карбидных частиц или в самих карбидах распространяются в металл паяного шва по границам зерен, имеющим избыточные выделения карбидных фаз.

Как следует из рис. 3, окончательное старение, выполненное при 1050 °С, 2 ч и 900 °С, 3 ч, гарантировало примерно одинаковый уровень предела текучести и временного сопротивления металла ПС, для изготовления которых применяли комплексный припой с кремнием. В то же время старение при 900°, 3 ч охрупчивало металл ПС на основе базового припоя. Отжиг при 1050 °С, 2 ч позволял получать ПС, разрушение которых происходило по основному металлу (удлинение 6,5...8,5 %) при средней прочности 756 МПа.

Данные статистической обработки результатов испытаний массива образцов сплава ЖС26ВИ, выполненных композиционными припоями без кремния и содержащими в качестве низкоплавкой составляющей промышленный припой HC12, показаны на рис.4. Приведенные зависимости обобщают результаты механических испытаний на растяжение образцов ПС металла равноосной кристаллизации после различных вариантов окончательной термической обработки.

Более высокой пластичностью при 20 °С отличались ПС, для формирования которых использовали комплексный припой. 50 % образцов имели предел текучести 600...650 МПа, временное сопротивление 650...750 МПа.

Острый пик кривой предела текучести (рис. 4), подтверждает добротность и стабильность технологического процесса пайки. В этом случае (более 50 % образцов) ПС способны пластически деформироваться при 20 °С до окончательного разрушения.

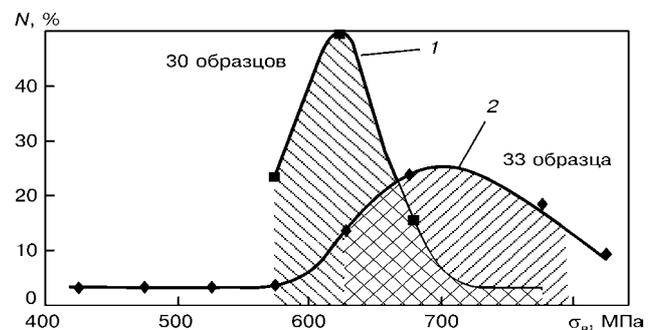


Рис. 4. Статистические кривые распределения значений предела текучести (1) и временного сопротивления (2) ПС, полученных способом изотермической пайки при 1220...1225 °С сплава ЖС26ВИ после различных видов термообработки в ходе испытаний при 20 °С; N — количество образцов



Диаграмма четко фиксирует способность ПС выдерживать определенную пластическую деформацию, поскольку на представленных кривых зафиксировано существенное различие (до 100 МПа) между значениями  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{0,2}$  испытанных ПС. Размытый максимум кривой  $\sigma_{\text{в}}$ , по сравнению с кривой для  $\sigma_{0,2}$ , указывает на наличие технологических от-

клонений в процессе пайки. Вероятно, имелись различия в гранулометрическом составе припоя либо в условиях приготовления паяльных смесей при пайке различных образцов. Это может вызвать либо снижение прочности ПС, либо обеспечить им максимально возможное значение добротности.

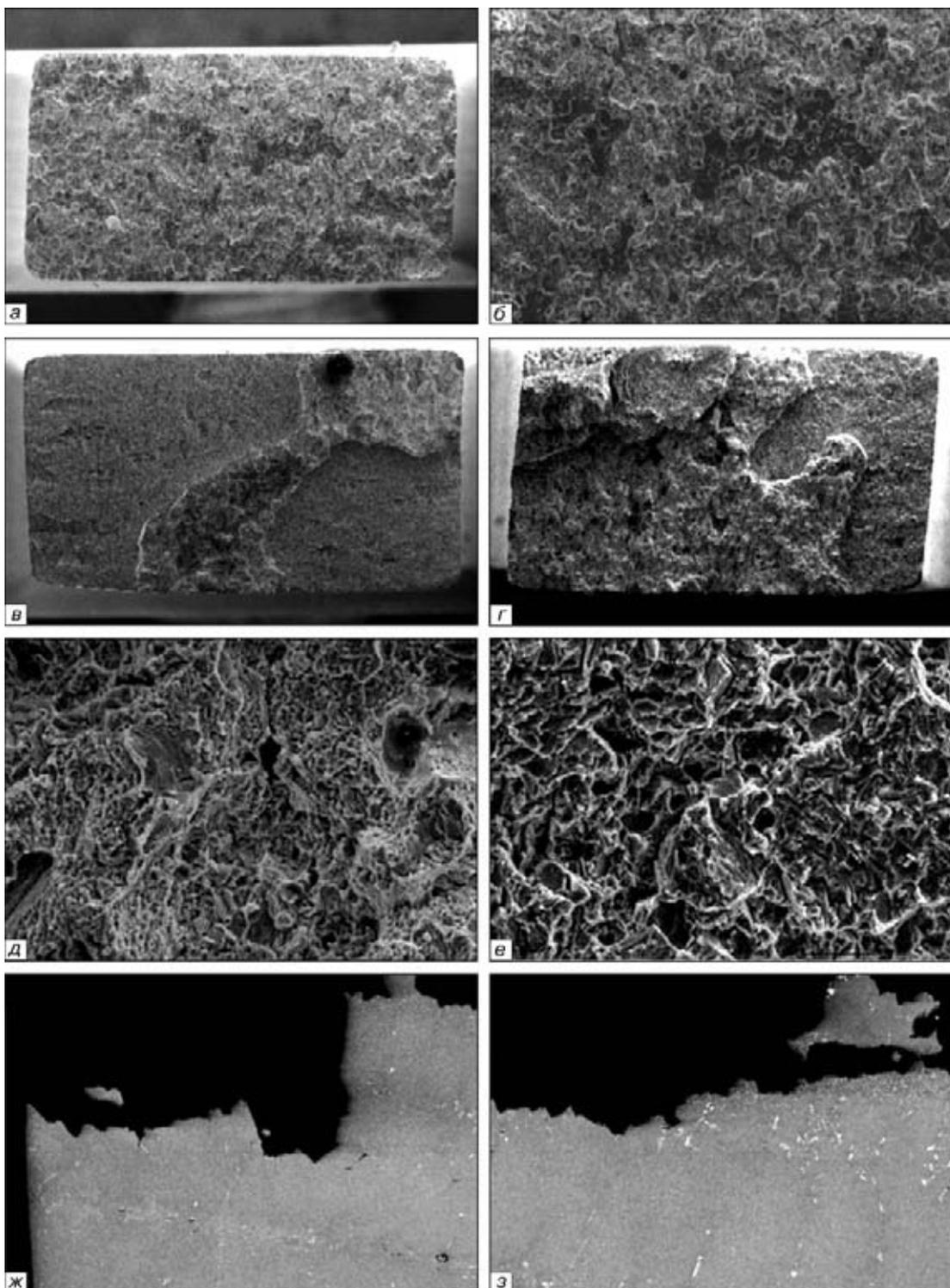


Рис. 5. Картина разрушения при кратковременных прочностных испытаниях образцов из сплава ЖС26 с ПС, сформированными с использованием композиционного припоя 40 % #1 + 60 % Rene-142 (*а, б*) и 20 % #1 + 20 % HC12 + 60 % Rene-142 (*в-ж*): *а, б* — хрупкое разрушение по металлу шва образца; *в, г* — комбинированное разрушение по металлу основы и далее в металл шва (с максимальной пластичностью  $\delta = 7,5... 10,8\%$ ); *д, е* — излом металла шва и диффузионной зоны в основном металле; *ж, з* — плоская картина распространения трещины в образце с ПС; *а, в, г* —  $\times 26$ ; *б* —  $\times 50$ ; *д, е* —  $\times 500$ ; *ж* —  $\times 120$ ; *з* —  $\times 200$



**Микроструктурные особенности разрушения.** Взаимосвязь между механическими свойствами ПС и микроструктурой использованных припоев изучали по фрактограммам испытанных образцов, наиболее точно отражающих характер разрушения ПС при нагружении.

Пример хрупкого разрушения образца ПС сплава ЖС26 при  $\sigma_b = 460$  МПа и  $\epsilon = 0$  %, полученного пайкой борсодержащим припоем #1 с наполнителем из 30 мас. % Rene-142 + 30 мас. % ЖС6У при 1220 °С, 15 мин, приведен на рис. 5, а, б. В изломе ПС обнаружена пористость, ослабляющая эффективное сечение образца. Это и стало причиной низкой прочности ПС при растяжении. Разрушение произошло в результате слияния несплошностей в пластической зоне перед вершиной трещины. Механизм разрушения соединений — нормальный отрыв [11].

Картину разрушения образца ПС с относительным удлинением  $\epsilon = 7,5$  % иллюстрирует рис. 5, в. При контактной пайке данного образца использовали припой с 20 % НС12. В изломе сочеталось разрушение основного металла и металла паяного шва. Трещина в образце ПС при использовании такого припоя возникла на поверхности (у дефекта) базового сплава и вызвала окончательное разрушение соединения при переходе из основного металла в шов.

Аналогичная картина излома ПС получена в другом эксперименте (пайка комплексным припоем при 1220 °С, 20 мин; отжиг при 1160 °С, 2 ч + старение 900 °С, 3 ч. Удлинение при растяжении образца составило 10,8 % (рис. 5, з). Разрушение ПС инициировалось в основном металле вблизи линии сплавления и перешло в металл шва на окончательной стадии долома.

Смешанный характер разрушения ПС, полученного комплексным припоем при растяжении, указывает на то, что магистральная трещина проходила не только по металлу шва, но и задевала объемы паяемого металла (рис. 5, ж, з). В изломе присутствуют островки разрушения, примыкающие к ос-

новному металлу (рис. 5, д) или линии сплавления (рис. 5, е). Такую же картину разрушения обнаружили в образце ПС с удлинением 13 %. В изломе этого образца ( $\sigma_b = 762,6$  МПа) металл паяного шва (20 % НС12 + 20 % #1 + 60 % Rene-142) претерпевал вязкое (сдвиговое) разрушение на микроуровне.

Изломы образцов ПС демонстрируют различное количество карбидной фазы, выявляющейся по границам зерен в паяных швах с присадкой 20 % кремнийсодержащего припоя и без него. Большее количество карбидов в матрице шва прослеживается в случае традиционного припоя без кремния. Карбидные частицы по границам зерен способствуют передаче пластической деформации от зерна к зерну при нагружении, способствуя равномерному пластическому течению поликристаллического агрегата.

Фрактограммы поверхности изломов ПС подтверждают вывод о том, что чем больше удлинение ПС, тем выше его прочность. Вязкость соединения определяется способностью материала пластически деформироваться.

**Длительная прочность.** В соответствии с ГОСТ 10145081 длительная (50 ч) прочность сплава ЖС26ВИ (равноосной кристаллизации) при температуре испытания 900 °С должна составлять не менее 422 МПа (в среднем 450 МПа). При этом 100-часовая длительная прочность составляет не менее 373 МПа (в среднем 402 МПа).

При испытании образцов основного металла ЖС26ВИ при 900 °С 50-часовая длительная прочность должна быть достигнута при уровне приложенных напряжений 420... 425 МПа [12].

В случае ПС к образцам прилагали вдвое меньшее напряжение (196 МПа), чем к образцам из основного металла, а основное влияние на различия в свойствах оказывал химический состав припоя (табл. 2).

В ходе испытаний на длительную прочность в настоящей работе применяли ПС с фиксированным зазором шириной 600... 800 мкм. Таким образом оп-

**Таблица 2. Долговечность ПС сплава ЖС26ВИ при 900 °С, полученных запайкой зазоров шириной до 600 мкм при температуре 1225 °С, 20 мин после различных режимов старения**

№ образца	Тип припоя	Финишная термообработка ПС перед испытанием	$\sigma_{0,9,8^{-1}}$ , МПа	$\tau$ , мин	$\epsilon$ , %
0G1	Основной сплав	1220 °С, 1 ч + 1050 °С, 4 ч	45	70	0,75
0G0			40	115	1,28
0G2			35	300	3,3
3G4	20 % #1 + 20 % НС12 + 60 % Rene-142	1160 °С, 2 ч + 1050 °С, 2 ч	20	105	1,4
3G1			20	60	0,7
3G2			20	90	0,4
3G3			20	90	2,1
3G6			20	70	2,6
3G9			20	70	0,37
3G5	40 % #1 + 60 % Rene-142	1160 °С, 2 ч + 900 °С, 4 ч	20	260	1,5
3G7			20	75	0



ределяли длительную прочность закристаллизовавшегося металла развитого шва ПС.

Испытания на длительную прочность проводили при температуре 900 и 950 °С. Результаты испытаний ПС, полученные в двух экспериментах, приведены в табл. 2.

Долговечность ПС, выполненных припоем без добавки Ni12, заметно выше таковой ПС, полученных с использованием комплексного припоя. Длительная прочность образцов ПС, выполненных с добавкой Ni12, отличалась высокой стабильностью результатов.

Двухстадийная термообработка всех образцов включала гомогенизирующий отжиг при 1160 °С, 2 ч, а на заключительном этапе — старение.

Режим старения не оказывал существенного влияния на длительную прочность ПС. Удовлетворительная долговечность получена на образцах ПС, прошедших окончательное старение при 900 °С в течение 3 ч. Время до разрушения ПС сплава ЖС26ВИ составляло 1,0...1,5 ч при 900 °С и напряжении 196 МПа (20 кг/мм<sup>2</sup>) для комплексного припоя с 20 % Ni12. Долговечность единственного образца составила 4 ч 20 мин в случае запайки зазора базовым припоем 40%#1+60% Rene-142.

1. Каблов Е. Н., Кишкин С. Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // Газотурбинные технологии. — 2002. — № 1. — С. 34–37.
2. Совершенствование технологии литья деталей из жаропрочного сплава ЖС26 / В. Н. Ларионов, Е. А. Кулешова, Г. В. Тягунов и др. // Авиац. пром-ть. — 1989. — № 12. — С. 50–52.
3. Долгов Б. В., Лысенко Н. А., Цивирко Э. И. Высокоскоростная направленная кристаллизация при производстве

турбинных лопаток // Процессы литья. — 1998. — № 1. — С. 49–55.

4. Ягодкин Ю. Д., Шуляк В. П., Орехов В. Б. Механические свойства и ориентация кристаллов в образцах из сплава ЖС26, выплавленных методом направленной кристаллизации // Авиац. пром-ть. — 1987. — № 2. — С. 50–51.
5. Ver Snyder F. L., Shank M. E. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification // Materials Sci. and Eng. — 1970. — 6, № 4. — P. 213–247.
6. Структура, фазовый состав и свойства сплавов системы Ni–Cr–Co–W–Mo–Nb–Al–Ti с гафнием, полученных при сверхбыстрой кристаллизации / В. Т. Мусиенко, Н. Л. Властова, Н. М. Семенова и др. // Авиац. пром-ть. — 1986. — № 6. — С. 48–49.
7. Структурная стабильность жаропрочных никелевых сплавов и ее повышение путем оптимального легирования / Е. В. Бабурина, Ю. М. Должанский, Б. С. Ломберг и др. // Там же. — 1987. — № 5. — С. 62–63.
8. Влияние карбидов на пластические и усталостные характеристики сплава ЖС6Ф / В. В. Сидоров, М. С. Беляев, Н. Д. Жуков, В. М. Мирошниченко // Там же. — 1981. — № 7. — С. 61–63.
9. Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния / И. С. Малашенко, В. В. Куренкова, А. Ф. Белявин, В. В. Трохимченко // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 26–42.
10. Прочность и металловедение паяных соединений литейного никелевого сплава ЧС70ВИ / Там же. — 2006. — № 1. — С. 23–35.
11. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах. — М.: Мир, 1974. — 374 с.
12. Голубовский Е. Р., Хвацкий К. К. Особенности разрушения в условиях ползучести сплава ЖС26 с направленной структурой // Авиац. пром-ть. — 1989. — № 2. — С. 43–46.

ИЦ «Пратт и Уитни», Киев

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 18.01.2007

## СИ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» содержит оперативную информацию на языке оригинала и в русском переводе — оглавления научно-технических журналов, монографий, сборников, трудов конференций. Кроме того, в СИ включаются названия переводов статей, перечни документов Международного института сварки и другие отечественные и зарубежные информационные материалы из более чем 100 периодических изданий 52 стран мира.

СИ «Сварка и родственные технологии» издается научно-технической библиотекой Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины с 1995 года. Периодичность — 6 номеров в год. С 2005 года СИ выпускается и рассылается в электронном варианте.

СИ «Сварка и родственные технологии» предназначена для научных работников и инженеров, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов сварочного производства.

Местом хранения оригиналов всех изданий, представленных в выпусках СИ, является научно-техническая библиотека Института электросварки. С материалами можно ознакомиться в читальном зале библиотеки или заказать ксерокопии отдельных статей, переводов, документов и т. п.

Для заказа определенного документа достаточно указать только регистрационный номер материала, который находится в конце каждого описания. Например: СИ. 06.01.10.

По вопросам подписки и условиям выполнения заказов обращаться по адресу:

03680, ГСП, Киев-150, ул. Боженко, 11.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Научно-техническая библиотека.

Факс: (044) 5280486; справки по телефону: 287-07-77.

E-mail: library@paton.kiev.ua