

УДК 669.17:621.791

О.Г. Оспенникова¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, И.А. Галушка¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ
МИКРОСТРУКТУРЫ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ
РАЗНОИМЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫМ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ ПРИПОЕМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-3-12

Представлены результаты исследования микроструктуры паяного соединения разноименного сочетания никелевых жаропрочных сплавов. Исследован химический состав фаз, формирующихся в результате взаимодействия литейного монокристаллического сплава ВКНА-25, жаропрочного деформируемого сплава ЭП975 и сложнолегированного припоя ВПр56. Установлены основные закономерности изменения микроструктуры паяного соединения в процессе термической обработки. Установлена зависимость и выведена формула для получения оптимальной микроструктуры паяного шва при различных длительности термической обработки и величине сборочного зазора.

Ключевые слова: пайка, высокотемпературная пайка, жаропрочные сплавы, биметаллическая конструкция типа «блиск».

O.G. Ospennikova¹, A.N. Afanasyev-Khodykin¹, I.A. Galushka¹**INVESTIGATION OF A BRAZED JOINT
MICROSTRUCTURE FORMATION,
MADE OF DISSIMILAR NICKEL SUPER ALLOYS
AND THE COMPLEX BRAZING ALLOY**

Presents the results of studies on the microstructure an opposite combination of nickel heat-resistant alloys of a brazed joint. The chemical composition of the phases formed as a result of the interaction of the mono-crystal alloy VKNA-25, heat-resistant alloy EP975 and complex alloyed solder VPr56 was investigated. The main regularities of the microstructure of the brazed joint changes during heat treatment were established. The dependence is established and the formula is derived for obtaining the optimal microstructure of the brazed seam with different duration of heat treatment and the size of the assembly gap.

Keywords: brazing, a high-temperature diffusion brazing, nickel-based superalloys, bimetallic «blisk» design.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время метод высокотемпературной пайки – это один из способов получения неразъемных соединений различных деталей ГТД. Однако в большинстве современных конструкций для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик все чаще используются разноименные сочетания материалов [1, 2]. В таком случае получение однородного паяного шва является комплексной задачей, заключающейся

в правильном подборе состава припоя, близкого к составу соединяемых материалов, а также технологии пайки и режима термической обработки [3, 4].

При сборке паяных соединений соединительный зазор обычно варьируется в интервале 0,05–0,3 мм. Как результат, количество жидкого припоя, затекающего в паяный шов, ограничено. Это приводит к развитию таких физико-химических процессов, как взаимодействие основного металла и расплава припоя. В начальный момент времени происходит интенсивное легирование паяного шва компонентами основного металла. В этот момент на процессы кристаллизации припоя значительное влияние оказывает выбранный основной материал изделия. На готовых поверхностях образуется переходная прослойка со своей собственной кристаллической структурой, отличающейся как от структуры закристаллизованного припоя, так и от структуры соединяемого материала [4–10].

По окончании процесса пайки широко применяется гомогенизационная термическая обработка (ГТО), в ходе которой благодаря избирательной диффузии компонентов припоя в основной металл происходит выравнивание структуры паяного шва, что приводит к повышению температуры распая изделия.

Несмотря на широкое применение многокомпонентных припоев в научно-технической литературе вопрос, связанный с кинетикой формирования паяных соединений и процессами изменения микроструктуры паяных соединений в процессе термической обработки, освещен незначительно. В данной работе предпринята попытка исследовать кинетику изменения микроструктуры паяного соединения разноименных никелевых жаропрочных сплавов в процессе всего цикла пайки и термической обработки паяных соединений с целью разработки подходов к выбору оптимальных режимов пайки и термической обработки. Работу проводили на примере сплавов ВКНА-25 и ЭП975 применительно к паяной конструкции типа «блиск».

В данной конструкции рабочего колеса турбины ротор изготавливают из деформируемого сплава ЭП975, лопатки – из монокристаллического сплава ВКНА-25, а их соединение осуществляют методом высокотемпературной пайки взамен традиционного механического соединения [11–15]. Такая конструкция рабочего колеса, с одной стороны, позволяет использовать материалы оптимальные для условий работы составных частей изделия, а с другой – значительно снизить массогабаритные показатели изделия в целом [16–18].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Разработка технологий пайки новых супержаропрочных никелевых сплавов и истираемого уплотнительного материала и комплексных технологий получения порошковых припоев на основе никеля и титана, лент на органической связке порошков припоев» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Материалы и методы

В качестве материалов для изготовления конструкции типа «блиск» использованы литейные: жаропрочный деформируемый сплав ЭП975 и интерметаллидный сплав ВКНА-25. В качестве припоя применяли сложнолегированный припой ВПр56 на базе системы легирования Ni–Co–Cr–Al–Ti–Nb–B.

Исследование микроструктуры проводили на клиновидных паяных соединениях из сплавов ВКНА-25 и ЭП975, выполненных припоем ВПр56. Микроструктуру паяного соединения исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии. Исследование основных характеристик микроструктуры (морфология и распределение структурных составляющих) осуществляли на растровом электронном микроскопе.

Кроме того, проведен микрорентгеноспектральный анализ, благодаря которому получена информация о химическом составе отдельных фаз и участков микроструктуры паяных соединений и соединяемых материалов.

Для механических испытаний использовали стыковые образцы по ГОСТ 1497–84, изготовленные из паяных цилиндрических заготовок.

Результаты и обсуждение

В работе детально исследована микроструктура как непосредственно после пайки, так и после ГТО, проведенной по различным режимам. Выявлено, что в ходе пайки формируется сложная градиентная структура паяного шва, в которой можно выделить пять основных зон, расположенных послойно друг за другом (рис. 1).

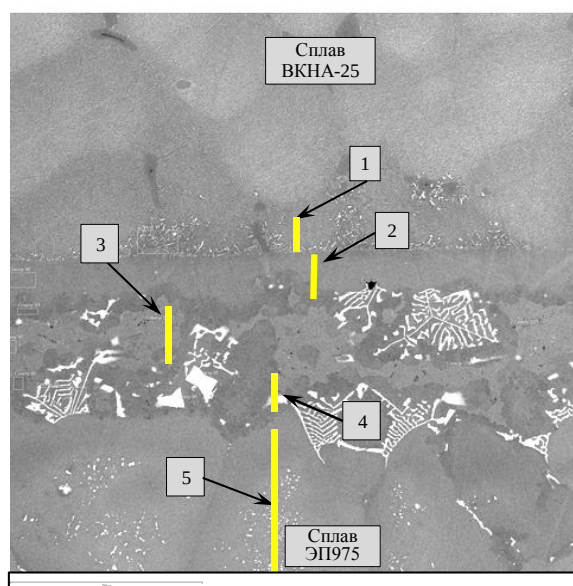


Рис. 1. Микроструктура паяного шва, сформированного в зазоре 110 мкм, без гомогенизационной термической обработки с послойно расположенными зонами 1–5

Зона 1. Диффузионная зона в сплаве ВКНА-25 представляет собой приповерхностный слой основного материала, измененный в результате взаимодиффузии легирующих элементов припоя и сплава ВКНА-25. Отличительная особенность этой зоны от характерной микроструктуры сплава ВКНА-25 – наличие равномерно распределенных мелкодисперсных выделений боридов. С увеличением продолжительности ГТО наблюдается расширение этой зоны вглубь сплава ВКНА-25, однако увеличения размера самих боридных выделений не наблюдается.

Зона 2. Прослойка твердого раствора ($\gamma+\gamma'$)-фазы на границе со сплавом ВКНА-25, обрамленная со стороны паяного шва эвтектикой ($\gamma+\gamma'_{\text{первич}}$)-фазы, формируется на поверхности основного материала в процессе пайки. Данная зона начинает формироваться сразу при контакте расплава припоя с паемой поверхностью за счет взаимной диффузии легирующих элементов на границе «припой–основной материал». При дальнейшей диффузии в процессе ГТО эта зона расширяется по направлению к середине паяного шва и состоит из двух структурных составляющих – твердого раствора и эвтектики. При этом эвтектические выделения преимущественно обрамляют выделения твердого раствора ($\gamma+\gamma'$)-фазы, отделяя его от середины паяного шва (рис. 2). Формирование прослойки твердого раствора ($\gamma+\gamma'$)-фазы, по-видимому, происходит при изотермической выдержке при пайке или ГТО, а эвтектика ($\gamma+\gamma'_{\text{первич}}$)-фазы в начальный момент выделяется из расплава припоя.

Следует отметить, что при проведении ГТО химический состав структурных составляющих данной зоны меняется незначительно.

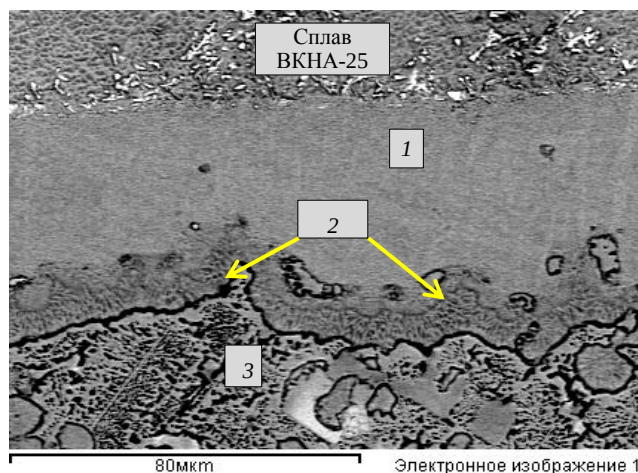


Рис. 2. Микроструктура зоны 2, сформированной в зазоре 100 мкм, без гомогенизационной термической обработки: 1 – $(\gamma+\gamma')$ -фаза; 2 – $(\gamma+\gamma'_{\text{первич}})$ -фаза; 3 – $(\gamma+\gamma')$ -твердый раствор припоя

С увеличением длительности выдержки толщина слоя твердого раствора $(\gamma+\gamma')$ -фазы увеличивается в отличие от толщины слоя $(\gamma+\gamma'_{\text{первич}})$ -фазы, что подтверждает предположение о динамике их формирования.

Зона 3. Представляет собой твердый раствор припоя $(\gamma+\gamma')$ -фазы. В больших зазорах (>100 мкм) после пайки наблюдается сложная композиция из зерен $(\gamma+\gamma')$ -фазы, разделенных между собой эвтектиками фаз $(\gamma+\gamma'_{\text{первич}})$ и $\gamma\text{-Me}_m\text{B}_n$. Формирование подобной структуры с большим количеством крупных выделений хрупких карбоборидов и эвтектики фазы $\gamma\text{-Me}_m\text{B}_n$ приводит к снижению прочности паяного соединения. При проведении ГТО наблюдается перераспределение эвтектических выделений на границе с зонами 2 и 4 и уменьшение их размеров вплоть до полного исчезновения.

В малых зазорах до 20 мкм для данной зоны характерно формирование структуры паяного шва без избыточных фаз, состоящей только из зерен $(\gamma+\gamma')$ -фазы. Именно такая микроструктура паяного соединения теоретически должна обладать наиболее высокой прочностью.

Зона 4. Прослойка твердого раствора $(\gamma+\gamma')$ -фазы на границе со сплавом ЭП975, обрамленная со стороны центра паяного шва эвтектикой $(\gamma+\gamma'_{\text{первич}})$ -фазы, принцип формирования которой схож с формированием зоны 2 – образуются две прослойки в разные периоды времени. Основным отличием является наличие на границе паяного шва со сплавом ЭП975 тонкой прослойки с повышенным содержанием выделений боридной эвтектики.

Зона 5. Диффузионная зона в сплаве ЭП975 представляет собой приповерхностный слой этого сплава, измененный в результате взаимодиффузии легирующих элементов припоя и сплава ЭП975. При этом в сплаве ЭП975 как внутри зерен, так и по их границам формируются выделения избыточных фаз (предположительно боридов). Выделения боридов внутри приграничных зерен сплава ЭП975 характерны для малых выдержек на протяжении всего паяного шва. При продолжительности ГТО более 120 мин эти выделения наблюдаются только в зазорах, превышающих 100 мкм. Увеличение продолжительности выдержки приводит к уменьшению количества боридов, наблюдаемых в объеме приграничных зерен, и к росту количества боридов по границам.

В процессе ГТО на границах зерен наблюдается значительное изменение химического состава. Установлено, что при ГТО в межзеренных пространствах происходит рост содержания следующих элементов:

- титана и ниобия, предположительно диффундирующих из паяного шва;
- молибдена и вольфрама, предположительно диффундирующих из зерен основного материала.

Данные элементы являются карбидообразующими и склонны формировать как карбиды, так и бориды. Поэтому их направленная диффузия, по-видимому, вызвана диффузией бора в межзеренные пространства и приводит к образованию карбидов и боридов в этих пространствах. Формирование сплошных выделений боридов и карбидов по границам зерен может привести к снижению прочности диффузионной зоны.

Химический состав основных зон после пайки в зазоре 100 мкм (без учета избыточных фаз) представлен в таблице.

Химический состав основных зон в паяном шве при зазоре 100 мкм

Зона	Содержание элементов, % (по массе)							
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	7,0–8,5	1,0–1,5	3,5–6,8	5,5–8,2	65,0–72,0	–	5,0–7,5	3,0–4,2
2	5,4–6,3	1,3–1,8	8,6–9,4	12,0–15,0	60,0–65,5	–	1,4–2,6	2,7–4,7
3	1,0–1,5	3,7–4,3	8,0–9,0	18,5–22,0	56,0–60,0	3,5–6,0	–	–
4	5,2–5,9	1,6–2,0	8,7–9,5	14,3–15,4	60,0–64,0	–	1,2–2,0	3,0–4,9
5	4,6–4,8	1,2–1,4	9,4–10,0	15,1–16,3	54,3–59,2	1,2–3,6	1,93–2,9	7,4–8,05

Оценка влияния режима ГТО на распределение элементов в структуре паяного шва, приведенная в работе [18], показала, что вследствие процессов диффузии легирующих элементов в сторону меньших концентраций происходит выравнивание химического состава паяного шва и околошовных зон, что способствует повышению прочности паяного соединения и физико-механических характеристик отдельных участков паяного шва.

Оценку динамики изменения размера зон, формирующих соединительный зазор, проводили на панорамных снимках микроструктуры клиновидных образцов паяных соединений сплавов ВКНА-25 и ЭП975, выполненных припоем ВПр56 при различных режимах ГТО. Характерная макроструктура образца представлена на рис. 3.

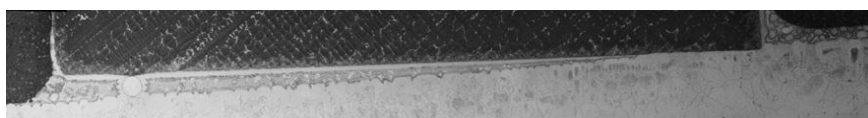


Рис. 3. Макроструктура паяного соединения образца клиновидного типа

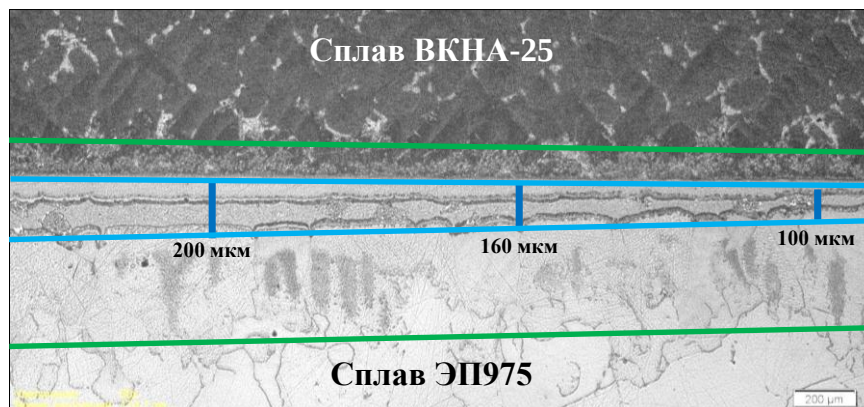


Рис. 4. Участок паяного шва из сплавов ЭП975 и ВКНА-25, выполненного по режиму 3

С целью нивелирования случайных отклонений на панорамных снимках микро-структуры построены усредненные линии, разграничивающие ранее представленные зоны различной микроструктуры паяного соединения (рис. 4). Для удобного графического представления результатов исследований на основе полученных данных построены соответствующие диаграммы распределения, где по оси X – выбранная величина исследуемого зазора, мкм, а по оси Y – процентное распределение структурных составляющих в соединительном зазоре (рис. 5). Видно, что увеличение длительности термической обработки приводит к расширению зон 2 и 4 за счет сужения зоны 3.

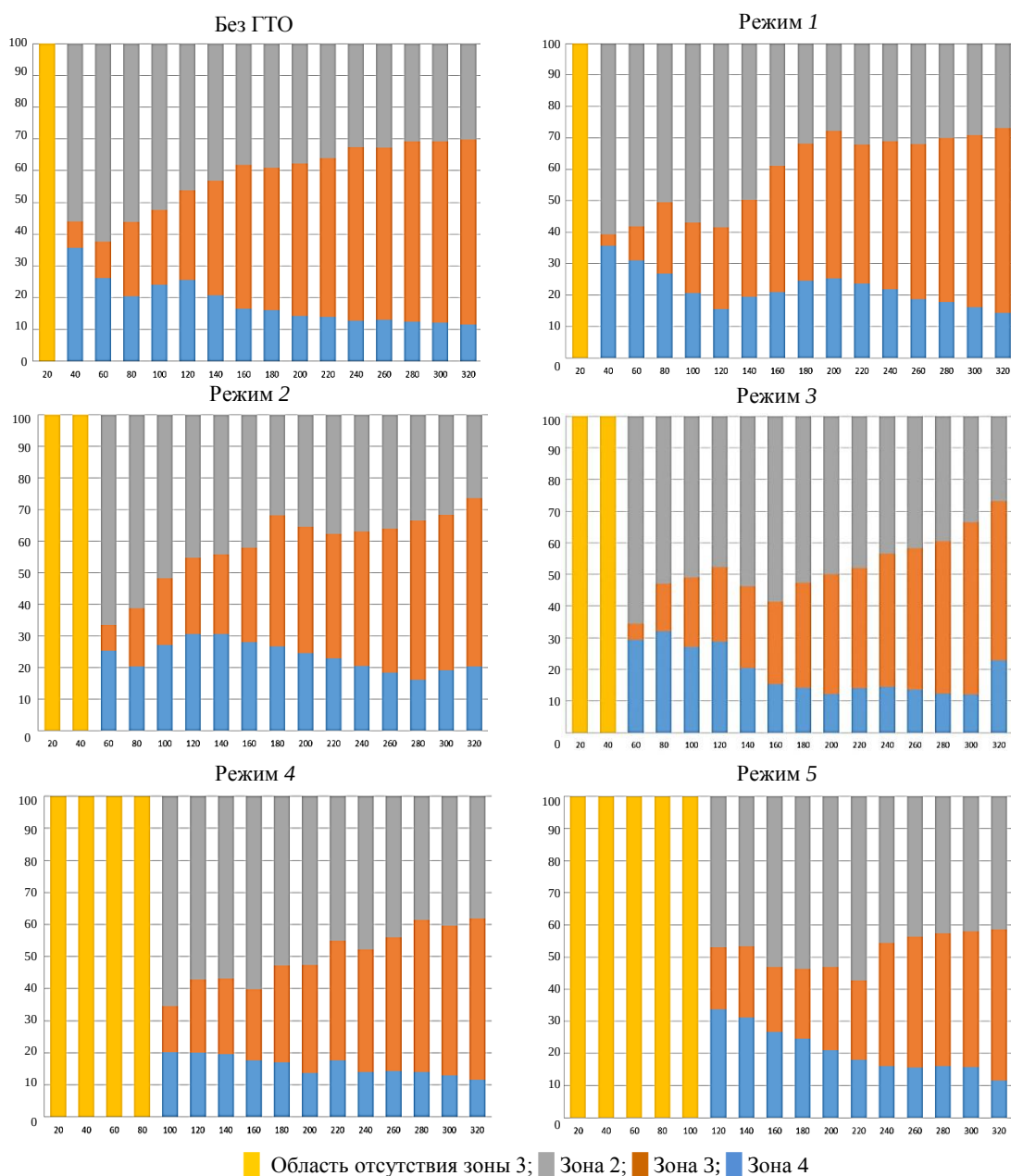


Рис. 5. Динамика изменения соотношения структурных составляющих при различной величине паяного зазора и продолжительности гомогенизационной термической обработки

Для определения минимальной длительности выдержки при ГТО для различных величин сборочных зазоров, на основе полученных данных определено уравнение,

описывающее взаимосвязь продолжительности выдержки при ГТО и ширины сборочного зазора, в котором произошло полное изотермическое отверждение припоя (где x – продолжительность ГТО, мин):

$$d = 25,588 + 0,2664x.$$

Для проверки правильности найденного уравнения и оценки прочности паяных соединений изготовлены образцы с величиной сборочного зазора 100 мкм. После пайки образцы подвергали ГТО. В соответствии с представленным уравнением образцы обеспечивают различные типы микроструктуры паяного соединения:

- режимы 1 и 2 – наличие избыточных фаз в структуре паяного шва, наблюдаемых в рассматриваемом зазоре, свидетельствует о недостатке времени для протекающих диффузионных процессов и необходимости увеличения продолжительности ГТО;
- режим 3 – длительность выдержки составляет 85% от расчетной. В структуре паяного шва присутствуют все вышеприведенные зоны. Зона сплошного перехода не сформирована, а сплошные эвтектические прослойки в паяном шве отсутствуют;
- режим 4 – длительность выдержки составляет 115% от расчетной. В данном случае сформирована зона сплошного перехода, зона 3 отсутствует;
- режим 5 – длительность выдержки составляет 165% от расчетной. В данном случае сформирована зона сплошного перехода, зона 3 отсутствует, но при этом избыточно расширены диффузионные околошовные зоны.

Исследование микроструктуры образцов после ГТО, изготовленных по различным режимам, подтверждает правильность представленной формулы (рис. 6) – микроструктура полностью соответствует предположениям, сделанным на основании расчетов.

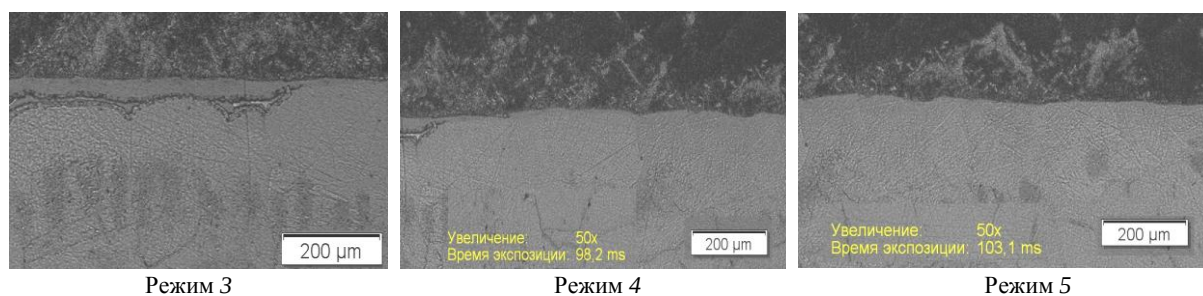


Рис. 6. Характерная микроструктура паяного шва при гомогенизационной термической обработке, проведенной по различным режимам, и зазоре 100 ± 10 мкм

По результатам механических испытаний при температуре 850 °С длительная 100-часовая прочность (σ_{100}^{850}) паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 находится в следующих пределах.

Режим	3	4	5
σ_{100}^{850} , МПа	<235	313–352	274–313
Коэффициент ослабления паяного соединения	<0,6	0,8–0,9	0,7–0,8

Как видно из представленных данных исключение зоны 3 из микроструктуры паяного соединения значительно увеличивает его прочность (режим 4), что подтверждает ранее сделанное предположение о том, что данная зона будет обладать наименьшей прочностью.

При этом дальнейшее увеличение длительности выдержки (режим 5) приводит к снижению прочности паяного соединения. Исследование микроструктуры паяных соединений, выполненных по режиму 5, после испытаний без разрушения выявило наличие микротрещин в диффузионной зоне по границам зерен сплава ЭП975.

Последующее сравнение микроструктуры диффузионной зоны в сплаве ЭП975 проводили для режимов 4 и 5. Исследования показали, что на зернах сплава ЭП975, лежащих вблизи границы с паяным швом, боридов внутри зерен и на границах не наблюдается. На расстоянии 50–100 мкм от границ паяного шва в образцах, полученных по режиму 4, наблюдается четкая граница из зерен с боридными включениями в их объеме. Для режима 5 подобная четкая граница отсутствует. На расстоянии 100–200 мкм от соединительного зазора в образце при режиме 4 наблюдается формирование боридных включений – начинают появляться выделения по границам зерен, в то время как на образце с большей длительностью ГТО (по режиму 5) подобные выделения приобретают сплошной характер. Следует отметить, что микротрещины на исследуемом образце (режим 5) после испытаний выявлены на таком же расстоянии от границ паяного соединения.

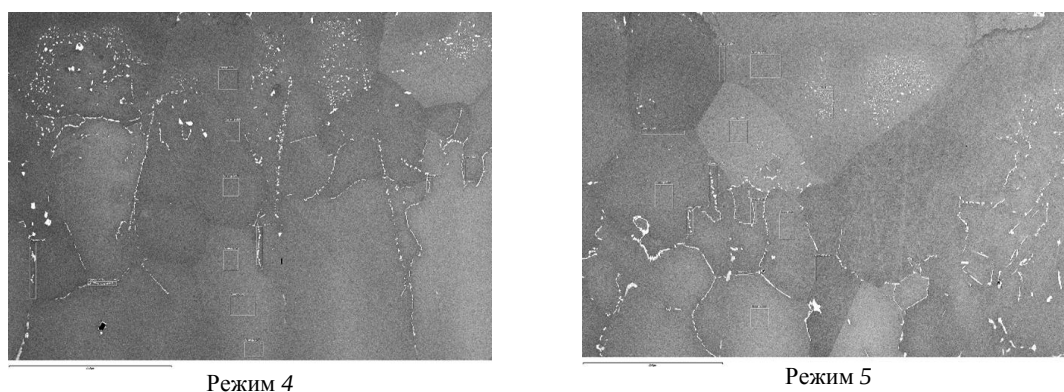


Рис. 7. Микроструктура диффузионной зоны в сплаве ЭП975 при зазоре 100 мкм±10 мкм

При детальном исследовании межзеренного пространства в диффузионной зоне сплава ЭП975 на расстоянии 150 мкм от границы паяного шва выявлено увеличение степени заполнения сплошных боридных прослоек с 45–57% (режим 4) до 76–83% (режим 5) (рис. 7). Подобные сплошные формирования, по-видимому, и приводят к появлению микротрещин, а также снижению прочности паяных соединений. Однако для более детального изучения подобного эффекта требуется проведение дополнительных исследований, учитывающих длительность ГТО, величину исследуемого зазора, расстояние от середины паяного шва и других факторов.

Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что при пайке никелевых жаропрочных сплавов сложнолегированным припоем формируется сложная микроструктура, в которой можно выделить пять основных зон, отличающихся друг от друга как по механизму формирования, так и по фазовому составу.

В данной работе установлено, что химический состав фаз в различных зонах практически не претерпевает изменений в процессе термической обработки, а основные изменения микроструктуры связаны с изменением размеров (ширины) зон.

Установлены основные закономерности изменения микроструктуры паяного соединения в процессе термической обработки. Выведена и проверена эмпирическая

формула, которая позволяет оценить длительность термической обработки, необходимой для получения оптимальной микроструктуры паяного соединения (отсутствие зоны 3) для различных величин сборочных зазоров.

Прочностные испытания паяных соединений после ГТО, проведенной по различным режимам, подтвердили правильность сделанных в данной работе предположений о взаимосвязи микроструктуры и прочности паяных соединений, а также о влиянии режимов термической обработки на их микроструктуру. Проведенные исследования динамики формирования микроструктуры паяного шва позволили определить условия для формирования оптимальной микроструктуры паяного шва, обеспечивающей длительную 100-часовую прочность паяных соединений при 850 °С на уровне 0,8–0,9 от прочности соединяемых материалов.

Установлено, что значительное превышение оптимальной длительности термической обработки приводит к формированию сплошных карбоборидных прослоек на границах зерен сплава ЭП975 в диффузионной зоне, что приводит к охрупчиванию околошовной зоны и снижению прочности паяных соединений.

Проведенные исследования позволили разработать оптимальный режим термической обработки паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25, который может быть рекомендован для использования при изготовлении столь ответственного и нагруженного узла ГТД – рабочего колеса турбины конструкции типа «блиск», изготовленного с применением технологии высокотемпературной пайки.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. Т. 1: Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. С. 7–107.
4. Бабкин В.И., Цховребов М.М., Солонин В.И., Ланшин А.И. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий // Двигатель. 2013. №2 (86). С. 2–7.
5. Петрунин И.Е., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р. и др. Справочник по пайке. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2003. 480 с.
6. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
7. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе // Сварочное производство. 2010. №10. С. 24–27.
8. Sekulić D. Advances in Brazing: Science, technology and applications. Elsevier, 2013. 620 p.
9. Лоцманова С.Н., Петрунина И.Е., Фролова В.П. Справочник по пайке. М.: Машиностроение, 1975. 207 с.
10. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. 248 с.
11. Поварова К.Б., Валитов В.А., Овсепян С.В., Дроздов А.А., Базылева О.А., Валитова Э.В. Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («блисков») и способа их соединения // Металлы. 2014. №5. С. 61–70.
12. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
13. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.

14. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
15. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Баркдазе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
16. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Изготовление конструкции типа «блиск» из разноименного сочетания материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №10 (70). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-10-16.
17. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Шевченко О.В. Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 144–158. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-144-158.
18. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Технология высокотемпературной диффузионной пайки конструкции типа «блиск» из разноименных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №9 (81). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-26-37.
19. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.