

УДК 669.295

О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, V.I. Lukin<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>, И.А. Галушка<sup>1</sup>

## ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ ПАЙКИ КОНСТРУКЦИИ ТИПА «БЛИСК» ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-26-37

*Представлены результаты работ по разработке технологии изготовления конструкции типа «блиск» с использованием неразъемного соединения методом высокотемпературной диффузионной пайки. Разработан припой для пайки никелевых жаропрочных сплавов в разноименном сочетании, обеспечивающий длительную прочность паяного соединения на уровне 0,8–0,9 от прочности наименее прочного из соединяемых материалов. Исследовано влияние режимов термической обработки на микроструктуру и прочность паяного шва. Разработана технология пайки разноименных никелевых жаропрочных сплавов, применительно к конструкции типа «блиск». Приведены результаты натурных испытаний биметаллического образца-демонстратора конструкции типа «блиск».*

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

O.G. Ospennikova<sup>1</sup>, V.I. Lukin<sup>1</sup>, A.N. Afanasev-Khodykin<sup>1</sup>, I.A. Galushka<sup>1</sup>

## TECHNOLOGY OF THE HIGH TEMPERATURE DIFFUSIVE BRAZING OF A BIMETALLIC «BLISK» DESIGN

*The article presents the results of the development a manufacturing technology for the construction type «blisk» design constructed with a permanent joint with the method of a high-temperature diffusion brazing. The brazing alloy for brazing nickel-based superalloys in bimetallic combinations, that provide a long-term strength of the brazing joint at the level of strength 0,8–0,9 from the least durable of the materials was developed. The influence of heat treatment on microstructure and strength of the brazing joint was investigated. The technology of brazing bimetallic nickel-based superalloys for «blisk» design was developed. Test of a bimetallic specimen of a «blisk» design demonstrator was carried out.*

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

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Одной из основных тенденций в современном газотурбостроении является повышение весовой эффективности газотурбинного двигателя. Для этого, наряду с применением новых материалов с высокими удельными характеристиками, разрабатываются и внедряются новые эффективные конструкционные решения, направленные на снижение массогабаритных показателей узлов ГТД. Одним из таких решений является применение ротора рабочего колеса турбины конструкции типа «блиск» без использования разъемного соединения диска с лопатками [1–4].

При проектировании рабочего колеса турбины следует учитывать, что наиболее нагруженной частью изделия является соединение диска с лопатками, которое работает при наиболее неблагоприятных условиях. Традиционно соединение лопаток с диском

выполняется с применением разъемного соединения типа «елочка». Использование особой клиновидной формы в замковой части лопаток и диска позволяет равномерно распределить возникающие в процессе работы напряжения. Подобное соединение обеспечивает минимальный уровень контактных напряжений, однако требует значительного увеличения сечения лопаток и обода диска в местах соединения. Кроме того, из-за особенностей конструкции соединения, требуется применять специальные стопорные элементы, исключающие перемещение лопатки в осевом (относительно диска) направлении. Как результат, это приводит к значительному повышению массогабаритных показателей изделия [5].

Одним из способов решения данной проблемы является замена разъемного механического соединения диска с лопатками на неразъемный тип соединения. Данное решение позволяет обеспечить равномерное распределение нагрузки, возникающей в зоне контакта, а также исключить применение дополнительных стопорных крепежных элементов. Как результат, сечение диска и лопаток в месте контакта может быть уменьшено, что приводит к значительному снижению массы рабочего колеса (по теоретическим расчетам – до 30%) без снижения надежности изделия в целом [6–8].

Традиционная конструкция типа «блиск» предполагает изготовление диска и лопаток из одного материала как одно целое. Однако применение одного сплава при изготовлении лопаток и диска существенно ограничивает характеристики конечного изделия. В связи с этим наиболее перспективным вариантом конструктивного оформления является конструкция типа «блиск», выполненная из разноименных материалов, выбранных исходя из условий работы каждого элемента рабочего колеса. В процессе работы в области пера лопаток температуры достигают 1100–1150°C и основными параметрами при выборе применяемого материала являются высокая жаропрочность и длительная прочность, в то время как температуры на массивном диске не поднимаются свыше 800–850°C и важнейшими характеристиками для выбранного материала являются повышенная длительная прочность и сопротивление усталости [9]. Рассматривая перспективные сочетания сплавов при изготовлении биметаллической конструкции типа «блиск», можно выделить группу жаропрочных никелевых сплавов, в которой литейный монокристаллический сплав ВКНА-25 будет применим как материал лопаток, а жаропрочный деформируемый сплав ЭП975 – как материал диска [10–15].

Рассматривая методы получения неразъемного соединения, следует учесть ограничения, накладываемые соединяемыми материалами. Так, высокая склонность никелевых жаропрочных сплавов к образованию горячих трещин из-за высокого содержания в них  $\gamma'$ -фазы затрудняет применение традиционных методов сварки плавлением [16]. Как следствие, для изготовления биметаллической конструкции типа «блиск» возникает необходимость в разработке технологии получения высокопрочного неразъемного соединения, выполненного из разноименных никелевых жаропрочных сплавов, с учетом как технологических особенностей работы изделия, так и выбранного сочетания материалов.

Среди методов получения неразъемного соединения можно выделить следующие технологии: горячее изостатическое прессование (ГИП) порошкового диска совместно с лопатками, линейная сварка трением, диффузионная сварка и высокотемпературная диффузионная пайка. Каждая из представленных технологий обладает своими особенностями при реализации [17–19].

В данной работе в качестве метода получения биметаллической конструкции типа «блиск» выбран метод высокотемпературной пайки. Данная технология обеспечивает ряд преимуществ перед остальными технологиями, в частности:

– реализация технологии не требует применения сложного дорогостоящего оборудования и может быть применена на вакуумных печах сопротивления, имеющихся на большинстве предприятий авиационной отрасли;

– позиционирование лопаток может быть реализовано за счет пазов в диске, что исключает необходимость применения сложной оснастки;

– при реализации технологии применительно к существующему технологическому процессу изготовления рабочих колес вносимые изменения будут минимальны и в основном связаны с упрощением технологических процессов и снижением трудоемкости.

Однако для успешной реализации выбранной технологии необходимо разработать припой и технологию пайки равноименного сочетания жаропрочных никелевых сплавов, которые обеспечат высокие прочностные свойства паяных соединений на уровне соединяемых материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Припой и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 20].

### Материалы и методы

Контроль химического состава никелевых жаропрочных сплавов осуществляли в условиях ФГУП «ВИАМ» методами атомно-эмиссионной спектрометрии и атомно-эмиссионного спектрального анализа. Для определения химического состава образцов использовали оптический спектрометр. Содержание углерода определяли на анализаторе Leco CS600, а содержание газов (кислорода и азота) – на анализаторе Leco TSN600.

Монокристаллические образцы и лопатки из сплава ВКНА-25 изготавливали на установке направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем УВНК-9А. Заготовки из жаропрочного деформируемого сплава ЭП975 получали методом индукционной выплавки с последующим вакуумно-дуговым переплавом и высокотемпературной деформацией. Выплавку опытных композиций припоя производили в атмосфере аргона в электродуговой печи с нерасходуемым электродом.

При выборе припоя и отработке режимов термической обработки паяных соединений использовали два типа образцов: плоский образец-шайба и образец с клиновым зазором. На плоских образцах-шайбах определяли угол смачивания по ГОСТ 23904–79 и оценивали величину эрозионной активности припоев по отношению к соединяемым сплавам марок ВКНА-25 и ЭП975. На образцах с клиновым зазором определяли ширину зоны диффузионного влияния припоя на основной материал и величину изотермически отвердевшего зазора, т. е. зазора в паяном соединении, при котором сплошные эвтектические прослойки отсутствуют.

Микроструктуру паяного соединения исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии. Величину эрозионного взаимодействия припоев с основным материалом, угол смачивания и величину изотермически отвердевшего зазора определяли на оптическом микроскопе OlympusGx51 при увеличении  $\times(50-500)$ . Исследование основных характеристик микроструктуры (морфологию и распределение структурных составляющих) проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV. 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 шифра Н03-025, изготовленные из цилиндрических заготовок.

Испытания образца-демонстратора конструкции типа «блиск» проводили на разгонной установке, состоящей из герметичной разгонной камеры и воздушной турбины, обеспечивающей максимальную скорость вращения ротора 45000 об/мин.

### Результаты и обсуждение

Выбор припоя для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25 проводили с учетом особенностей соединяемых материалов и режимов их термических обработок. В процессе выбора температуры пайки учитывали, что:

– деформируемый сплав ЭП975 требует проведения специальной термической обработки при температуре 1190–1220°C [21] для обеспечения высокого уровня прочностных свойств;

– интерметаллидный сплав ВКНА-25 не требует проведения закалки и старения, но в процессе пайки на механически обработанных поверхностях при температуре выше температуры рекристаллизации могут протекать рекристаллизационные процессы, снижающие механическую прочность отливок.

Для определения температуры рекристаллизации сплава ВКНА-25 (температуры нагрева, свыше которой происходит рекристаллизация механически обработанных поверхностей) шлифованные шайбы из сплава ВКНА-25 подвергали вакуумной термической обработке (ВТО) при различных температурах в интервале 1200–1260°C. После чего поперечные шлифы шайб исследовали с помощью растровой электронной микроскопии. Характерные микроструктуры образцов приведены на рис. 1. Видно, что ВТО при температуре не более 1220°C (рис. 1, а, б) не приводит к рекристаллизации отливок из сплава ВКНА-25, поэтому температура пайки сплава ВКНА-25 должна быть не более 1220°C для исключения процессов рекристаллизации.

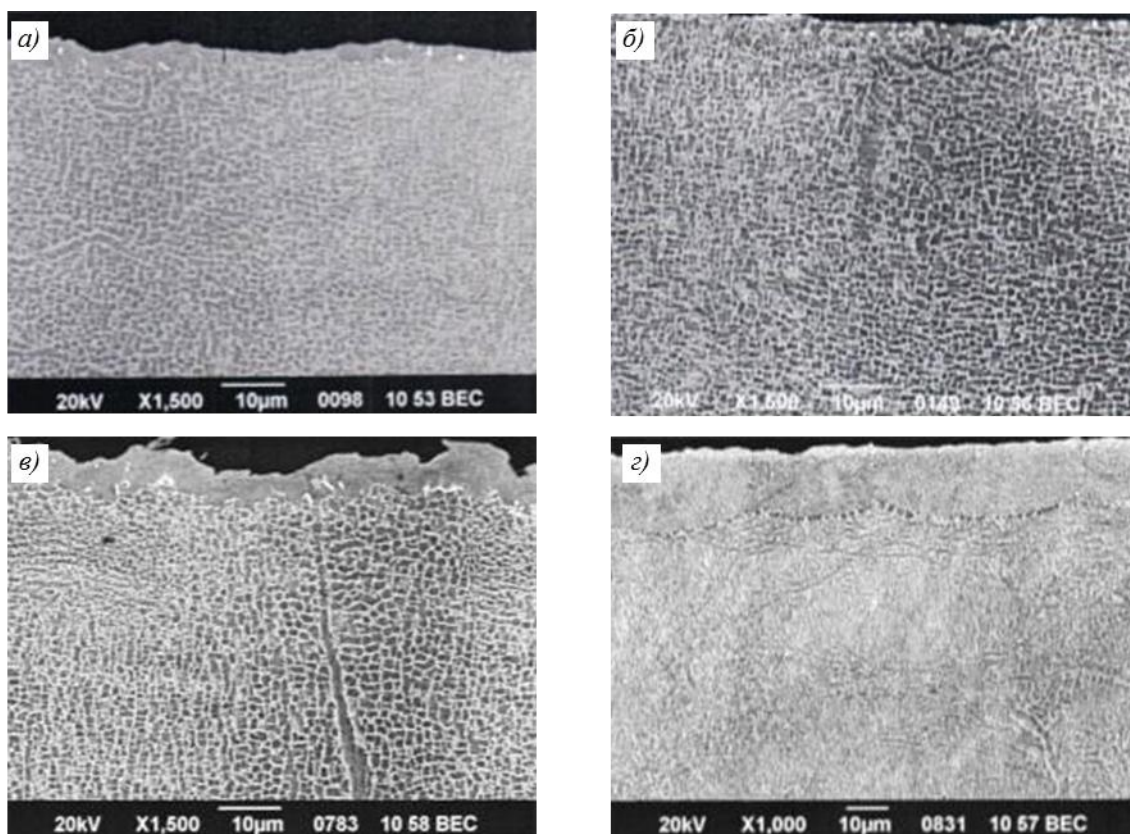








Рис. 1. Микроструктура приповерхностной зоны и основного материала образца из сплава ВКНА-25 (образцы а–г расположены по увеличению температуры нагрева)

Для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25 опробованы серийные припои марок ВПр50, ВПр42, ВПр48, ВПр47, ВПр24. Выбранные припои предназначены для пайки никелевых жаропрочных сплавов, обеспечивают температуру пайки в необходимом

интервале температур и благодаря сложному многокомпонентному составу обеспечивают высокие значения прочности паяных соединений. При опробовании серийных припоев оценивали такие технологические характеристики припоев, как площадь растекания, эрозионная активность по отношению к соединяемым материалам и величина изотермически отвердевшего зазора. Площадь растекания и эрозионная активность припоев определяют их технологичность, а величина изотермически отвердевшего зазора, с одной стороны, характеризует склонность припоя к упрочнению паяного соединения в процессе изотермической выдержки, а с другой – величину сборочных зазоров, которую необходимо обеспечить для получения высокой прочности паяных соединений [21–24]. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Технологические характеристики припоев  
для пайки сочетания сплавов ЭП975 и ВКНА-25**

Припой	Эрозионная активность, мкм		Площадь растекания, мм <sup>2</sup>	Величина изотермически отвердевшего зазора, мкм	Внешний вид пробы на растекаемость
	ВКНА-25	ЭП975			
ВПр24	118	45	130	30	
ВПр47	70	86	91,5	50	
ВПр48	115	183	132	50	
ВПр42	252	137	304	75	
ВПр50	212	259	231	95	
ВПр56	80	20	115,70	106	

Из приведенных результатов исследований видно, что:

– припой марок ВПр42 и ВПр50 обладают избыточной растекаемостью и большой эрозионной активностью по отношению к обоим соединяемым материалам. Это обусловлено значительным перегревом при пайке (1220°C) относительно их температур полного расплавления (1090 и 1120°C соответственно). Избыточная растекаемость делает данные припои нетехнологичными при данных условиях пайки и сильно затрудняет отработку технологии пайки на изделии;

– припой ВПр24 при значительной эрозионной активности по отношению к сплаву ВКНА-25 не склонен к диффузионному отверждению. Для обеспечения высокой прочности паяных соединений при пайке необходимо будет обеспечить сборочные зазоры не более 30 мкм, что, с одной стороны, затруднительно технологически, с другой – будет способствовать формированию пористости в протяженных паяных соединениях;

– припой ВПр47 при относительно небольшой эрозионной активности по отношению к обоим соединяемым материалам обладает малой площадью растекания и невысокой склонностью к диффузионному отверждению. Из-за малой площади растекания достаточно сложно будет сформировать качественное (бездефектное) паяное соединение с большой протяженностью, необходимое для соединения лопаток с диском;

– припой ВПр48 при высокой эрозионной активности по отношению к сплаву ЭП975 также обладает невысокой склонностью к диффузионному отверждению.

Таким образом, все опробованные припои имеют существенные недостатки, которые не позволят получить качественные высокопрочные паяные соединения применительно к данным условиям пайки. Поэтому проведена работа по разработке нового припоя для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-25 применительно к конструкции типа «блиск», обладающего оптимальным комплексом технологических характеристик для данных условий пайки. Разработку припоя вели с использованием математического моделирования. В качестве системы легирования принята система Ni–Co–Cr–Al–Ti–Nb–W. Такой сложный многокомпонентный состав припоя близок к составам соединяемых материалов и должен обеспечить высокую жаропрочность паяного шва. В качестве основных элементов, подвергаемых варьированию, выбраны Ti, Nb и W, оказывающие наиболее существенное влияние на технологические характеристики припоя данной системы легирования. В качестве функций отклика исследовали площадь растекания, эрозионную активность по отношению к соединяемым материалам и величину изотермически отвердевшего зазора. По результатам проведенных исследований разработан припой марки ВПр56, обеспечивающий:

- минимальную эрозию основных материалов;
- высокие технологические характеристики припоя (смачиваемость, растекаемость) при температуре пайки, оптимальной для данного сочетания материалов;
- высокую склонность к диффузионному отверждению.

Технологические характеристики нового припоя в сравнении с серийными приведены в табл. 1.

При кристаллизации припоя в паяном соединении, как правило, возникает неоднородность состава. Микроструктура паяного шва при пайке никелевыми сложнолегированными припоями обычно представлена зернами  $\gamma$ -твердого раствора, выделениями упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и большим количеством боридной эвтектики, образующей сплошные прослойки между зернами. Обычно эвтектические прослойки обладают высокой хрупкостью и в результате сплошного характера выделения снижают прочность паяных соединений. Для уменьшения количества эвтектических выделений и смены их характера со сплошного на точечный применяется гомогенизирующая термическая

обработка (ГТО), при которой содержание бора и других элементов, формирующих эвтектическую фазу, уменьшается в паяном шве вследствие их диффузии в основной материал. Как результат, применение ГТО позволяет значительно повысить прочность паяных соединений.

Для установления оптимальной длительности выдержки при гомогенизирующем отжиге исследовали структурные изменения в паяном шве: определяли величину изотермически отвердевшего зазора и ширину зоны диффузионного взаимодействия сплавов ЭП975 и ВКНА-25 с припоем ВПр56 в зависимости от продолжительности выдержки, которую определяли исходя из условий совместимости с режимом термической обработки сплава ЭП975. Результаты оценки представлены в табл. 2. Характерные микроструктуры паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 после ГТО по различным режимам приведены на рис. 2.

Таблица 2

**Влияние режима гомогенизирующей термической обработки (ГТО) на микроструктуру паяного шва**

Условный номер режима ГТО	Величина изотермически отвердевшего зазора, мкм	Ширина зоны диффузионного взаимодействия, мкм, сплава	
		ВКНА-25	ЭП975
1	120	30	100
2	180	40	110
3	210	55	155

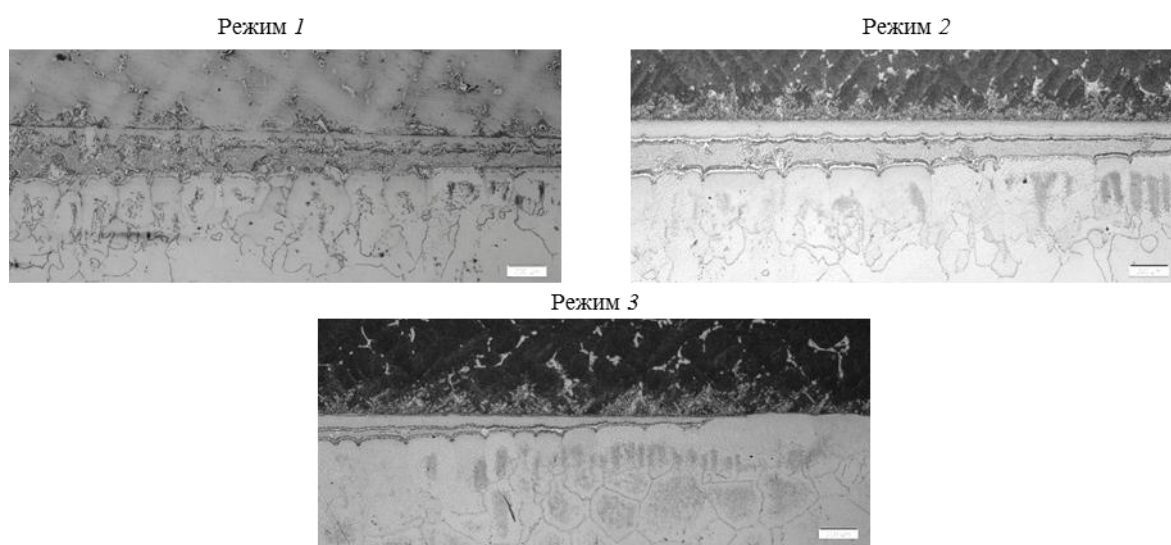


Рис. 2. Микроструктура клиновидных паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 после гомогенизирующей термической обработки, проведенной по различным режимам

Из приведенных данных видно, что с увеличением длительности выдержки при ГТО увеличивается величина изотермически отвердевшего зазора. Характер выделения эвтектических включений сменяется со сплошного непрерывного слоя в середине зазора на точечный в виде отдельных включений между зернами  $\gamma$ -твердого раствора. Полученные данные показали, что диффузионный взаимообмен легирующими элементами между паяным швом и сплавом ЭП975 значительно более интенсивный (зона диффузионного влияния 100–155 мкм), чем со сплавом ВКНА-25 (30–55 мкм). Исследования микроструктуры диффузионных зон в основном материале вблизи паяного соединения,

выполненного припоем ВПр56, показали, что в сплаве ВКНА-25 выделения избыточных фаз практически отсутствуют, а в сплаве ЭП975 они выделяются в основном по границам зерен. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что выделениями по границам зерен в околошовной зоне сплава ЭП975 являются карбиды, бориды и сложные карбобориды, по-видимому образовавшиеся в результате диффузии бора в основной материал из паяного шва. При этом характер их выделения является точечным и не должен приводить к существенному снижению прочности сплава ЭП975.

После ГТО по режиму 3 паяный шов с величиной сборочных зазоров характеризуется изотермически отвердевшей микроструктурой и представляет собой зерна  $\gamma$ -твердого раствора с мелкодисперсными частицами  $\gamma'$ -фазы (рис. 3).

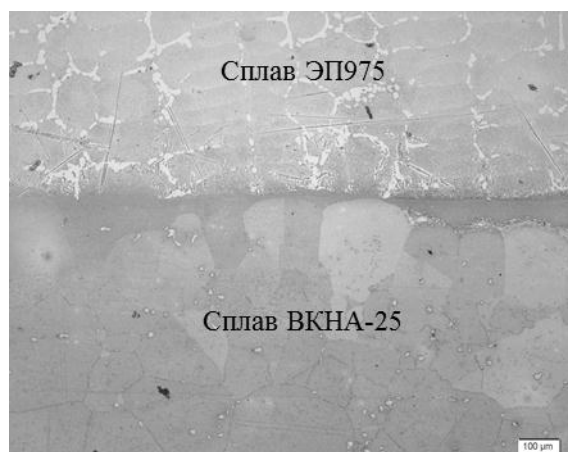


Рис. 3. Микроструктура паяного соединения сплавов ЭП975 и ВКНА-25 после термической обработки по режиму 3

В процессе исследований проводили оценку влияния режима термической обработки на химический состав паяного шва и околошовной зоны. Для проведения оценки выбрали величину зазора в 140 мкм, которая характеризуется уменьшением ширины изотермически твердого раствора (вплоть до его полного исчезновения) с увеличением времени ГТО. Подобные изменения могут происходить вследствие диффузионного обмена элементов в паяном шве и диффузионной зоне.

Для режимов 1 и 3 определяли содержание алюминия, титана, хрома, кобальта, ниобия, молибдена, вольфрама и рения перпендикулярно плоскости соединения на расстояниях 100, 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мкм от центра паяного шва в сторону соединяемых основных материалов. Полученные значения распределения химических элементов в зоне паяного шва и приграничных диффузионных зонах паяного соединения приведены на рис. 4. Данные графики строили из расчета, что положительные значения по оси абсцисс – для сплава ЭП975, а отрицательные – для сплава ВКНА-25.

На графиках распределения легирующих элементов в паяном соединении после ГТО по режиму 1 видны резкие переходы от соединяемых материалов к твердому раствору припоя. После ГТО по режиму 3 переходы между соединяемыми материалами приобретают более пологий характер, величина пиков в центре паяного шва уменьшается, в то время как ширина зоны диффузионного влияния увеличивается. Следует отметить, что наиболее интенсивно диффузионные процессы обмена легирующими элементами происходят на границе «припой–сплав ЭП975». Полученные результаты подтверждают предыдущие опыты по измерению ширины зоны диффузионного взаимодействия.

Приведенные графики показывают, что при ГТО по режиму 3, благодаря процессам диффузии легирующих элементов в сторону меньших концентраций, происходит выравнивание химического состава паяного шва и околошовных зон, что способствует повышению прочности паяного соединения за счет смягчения градиента структурных составляющих и, соответственно, физико-механических характеристик отдельных участков паяного шва.

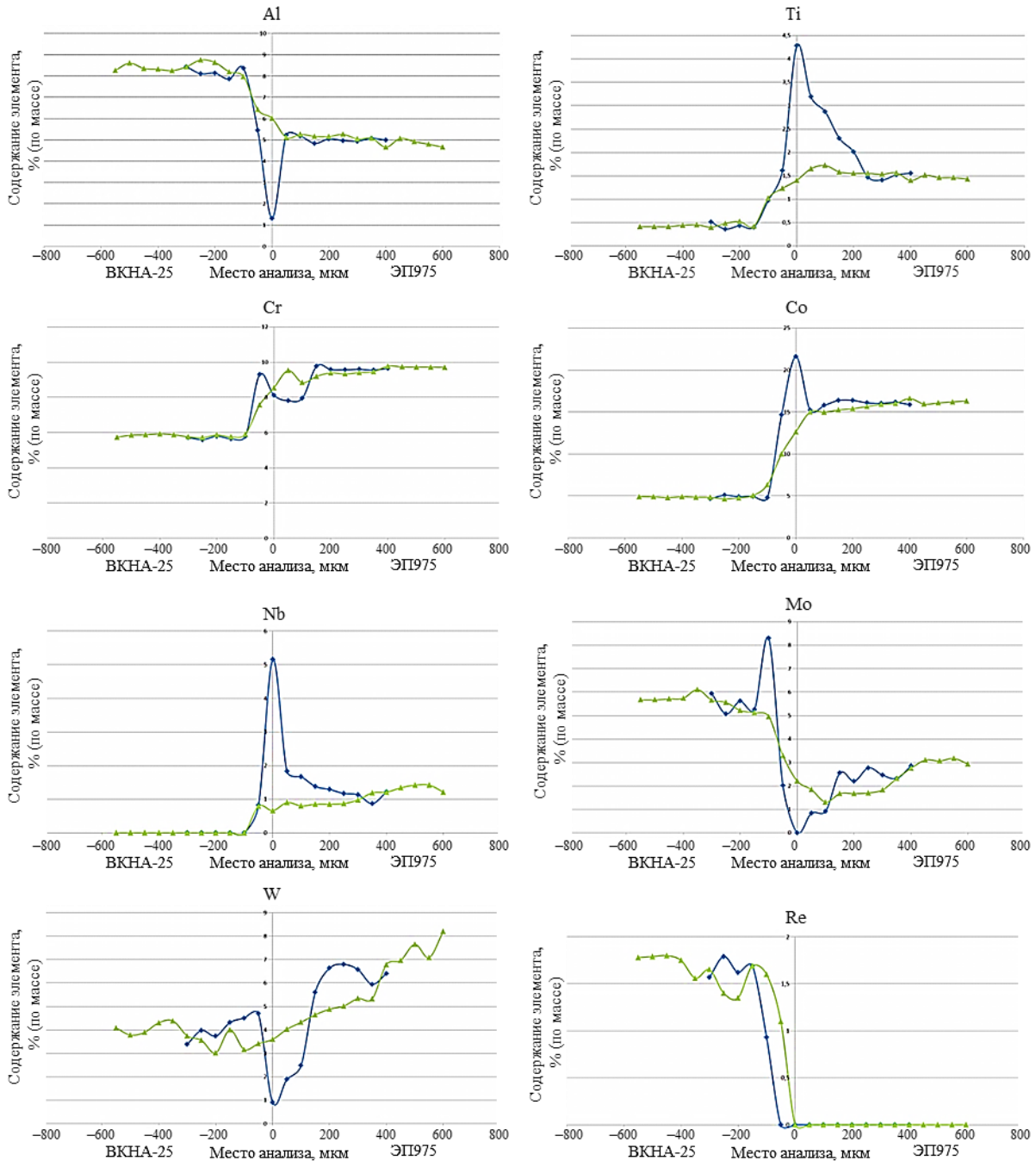


Рис. 4. Сравнение распределения легирующих элементов в зоне паяного шва и диффузионных зонах сплавов ВКНА-25 и ЭП975 при температуре 1210–1220°C и режимах термической обработки 1 (—) и 3 (—)

На основании проведенного комплекса исследований выбран режим 3 для проведения механических испытаний паяных соединений. Оценка 100-часовой прочности паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 при температуре 975°C показала, что прочность паяных соединений находится в пределах 313–352 МПа, что соответствует прочности 0,8–0,9 от прочности материала ЭП975.

По разработанной технологии изготовлен образец-демонстратор конструкции типа «блиск» (рис. 5). Испытания образца-демонстратора проводили в два этапа по специально разработанной программе с выполнением контрольных замеров давления и температуры в разгонной камере.



Рис. 5. Образец-демонстратор конструкции типа «блиск»

На первом этапе образец-демонстратор конструкции типа «блиск» плавно последовательно разгоняли до различных частот вращения (23000, 30000, 37000 и 45000 об/мин), выдерживали при заданных оборотах в течение 5 мин и плавно останавливали. По завершении первого этапа испытаний образец-демонстратор демонтировали и измеряли его основные геометрические размеры для обнаружения отклонений и подвергали люминесцентному контролю для выявления трещин. Результаты исследований показали, что отклонение контрольных размеров составляло <math><1\%</math>, а трещины на образец-демонстраторе не обнаружены.

На втором этапе испытаний образец-демонстратор подвергали динамическим испытаниям, аналогичным принятым для серийных рабочих колес турбины компрессора вертолетного двигателя. Скорость вращения образца-демонстратора составляла 105% от рабочей частоты. Превышения допустимого уровня вибрации опор в ходе испытаний не обнаружено, что свидетельствует об успешном прохождении образца-демонстратора конструкции типа «блиск» испытаний и подтверждает его соответствие требованиям, предъявляемым к рабочему колесу турбины компрессора вертолетного двигателя.

### Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что серийные никелевые жаропрочные припои не обеспечивают приемлемого комплекса технологических характеристик и не могут использоваться для пайки литейного сплава ВКНА-25 и деформируемого сплава ЭП975 в разноименном сочетании. Разработанный в рамках проведенных работ припой ВПр56 на базе системы легирования сплава ЭП975 обладает рядом преимуществ перед серийными припоями, обеспечивает оптимальный комплекс технологических характеристик для сочетания сплавов ЭП975 и ВКНА-25 и способствует формированию качественного паяного соединения.

В процессе исследований паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25, выполненных припоем ВПр56, установлено, что после пайки микроструктура паяного шва представляет собой сложную многокомпонентную структуру, состоящую из:

– зерен  $\gamma$ -твердого раствора, кристаллизующихся в первую очередь на соединяемых поверхностях;

– сложной эвтектической прослойки в центре паяного шва, состоящей из твердого раствора, обогащенного ниобием, кобальтом и титаном, и боридной эвтектики.

Исследование влияния ГТО на микроструктуру паяного шва показало, что в результате диффузионного обмена между структурными составляющими паяного шва и соединяемыми материалами происходит выравнивание химического состава паяного шва и соединяемых материалов. В паяном шве сначала исчезает боридная эвтектика за счет диффузии атомов бора в паяемые материалы, при этом диффузия бора идет преимущественно в сплав ЭП975, формируя бориды на границах зерен сплава, в отличие от монокристаллического сплава ВКНА-25, где боридные выделения в виде мелких отдельных включений распределяются равномерно в околошовной (диффузионной) зоне. Дальнейшее увеличение длительности выдержки при ГТО приводит к растворению прослойки твердого раствора, обогащенного ниобием, кобальтом и титаном. В результате чего химический состав паяного шва представляет собой плавный градиент концентраций легирующих элементов соединяемых материалов без формирования избыточных и неравновесных фаз.

Определение прочности паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 в разноименном сочетании показало, что при оптимальной продолжительности ГТО длительная прочность паяных соединений при температуре 975°C находится в пределах 313–352 МПа, что соответствует прочности 0,8–0,9 от прочности сплава ЭП975. Столь высокие показатели прочности достигаются при оптимальном химическом составе припоя, который разработан специально для данного сочетания сплавов, а также подобранным режимом ГТО паяного соединения, что позволяет использовать данную технологию пайки для такой ответственной детали ГТД, как рабочее колесо турбины.

По результатам проведенных работ изготовлен образец-демонстратор рабочего колеса турбины вертолетного двигателя конструкции типа «блиск» из сплавов ЭП975 и ВКНА-25. Результаты динамических испытаний образца-демонстратора показали работоспособность конструкции на уровне серийных изделий. Необходимо отметить, что даже небольшая оптимизация конструкции замкового соединения диска с лопатками позволила снизить массу обода рабочего колеса на 7%, а также снизить напряжения, возникающие в ступице диска, на 14% и исключить применение крепежных фиксирующих элементов лопаток. Оптимизация конструкции рабочего колеса в целом при использовании паяных соединений диска с лопатками позволит еще больше снизить массу рабочего колеса турбины – вплоть до теоретически возможных 30%.

### ЛИТЕРАТУРА

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. 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. 7–17.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.

5. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. Т. 2: Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. С. 259–272.
6. Лунев А.Н., Курылев Д.В. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей // *Фундаментальные исследования*. 2016. №6–1. С. 78–82. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40375> (дата обращения: 18.06.2019).
7. Маггеррамова Л.А., Васильев Б.Е. Биметаллические блиски турбин с бандажированными лопатками для газотурбинных двигателей // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015. №6. С. 143–156.
8. Yuan J., Scarpa F., Titurus B. et al. Efficient computational techniques for mistuning analysis of bladed discs: a review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 87. Part A. P. 71–90.
9. Маггеррамова Л., Захарова Т., Громов М., Самаров В. Турбины: с «блиском» и без [Электронный ресурс]. URL: <http://engine.aviaport.ru/02page32.html> (дата обращения: 05.09.2019).
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. Спецвыпуск: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 38–52.
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. №35. 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. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Иода Е.Н. Сварка плавлением – основа сварочного производства // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 130–143. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-130-143.
17. 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.-технич. журн*. 2018. №10 (70). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-10-16.
18. Magerramova L.A. The advantages of bimetallic blisks manufactured by HIP from powder and cast Ni-base super alloys application to gas turbine with high speed // *Proceedings of International Conference on Hot Isostatic Pressing, (HIP02)*. International Academic Publishers, 2002. P. 59–67.
19. 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.
20. 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.
21. Кишкин С.Т., Качанов Е.Б., Булыгин И.П. Авиационные материалы: справочник в 9 т. / под ред. Р.Е. Шалина. 6-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 1989. Т. 3: Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. Ч. 1 Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. С. 448–452.
22. 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.
23. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
24. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе // *Сварочное производство*. 2010. №10. С. 24–27.