



УДК 621.791.3

**ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ КОНСТРУКЦИИ ТИПА «БЛИСК»  
ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ СПЛАВОВ**

**В.С. Рыльников**

*кандидат технических наук*

**А.Н. Афанасьев-Ходыкин**

**И.А. Галушка**

**Октябрь 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№10, 2013 г.

*В.С. Рыльников, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, И.А. Галушка*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ КОНСТРУКЦИИ ТИПА «БЛИСК» ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ СПЛАВОВ**

*Освещена проблема получения высокопрочных неразъемных соединений разноименных сплавов: монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-4У и деформируемого никелевого жаропрочного сплава ЭП975 применительно к конструкции типа «блиск». Исследованы процессы, происходящие в процессе диффузионной пайки, и поведение легирующих элементов припоя и паяемых материалов в паяном шве и околошовных зонах.*

**Ключевые слова:** *пайка, припой, диффузионная пайка, интерметаллидный сплав, деформируемый сплав, монокристаллический сплав.*

*V.S. Rylnikov, A.N. Afanasiev-Khodykin, I.A. Galushka*

## **TECHNOLOGY OF BRAZE DESIGN TYPE «BLISK» FROM DISSIMILAR ALLOYS**

*In the article the problem of producing high-strength permanent connection of dissimilar alloys intermetallic alloy monocrystal VKNA-4Y and deformed nickel superalloy EP975 in relation to the construction type «blisk». The processes occurring in the process of diffusion brazing and soldering behavior of the alloying elements and solder in the solder materials and brazed heat-affected zones.*

**Key words:** *brazing, solder, diffusion brazing, intermetallic alloy, deformed alloy, monocrystal alloy.*

Рабочие лопатки и диски турбин авиационных двигателей (ГТД) работают в различных условиях и должны удовлетворять ряду специфических требований. Так, рабочие лопатки должны выдерживать длительную работу при температурах до 1150°C, одновременно диски колес ГТД работают при относительно невысоких температурах (до 850°C). Поэтому целесообразно применение для их изготовления различных сплавов [1–5]. Оптимальным комплексом технологических и эксплуатационных характеристик для изготовления лопаток обладают литейные

никелевые жаропрочные сплавы, а для изготовления дисков – никелевые деформируемые сплавы.

Традиционно для соединения лопаток с диском применяют механическое замковое соединение. Разъемные соединения характеризуются высокими контактными напряжениями ввиду наличия соединительных зазоров и деформаций соединяемых элементов в процессе работы изделия. Для развития площади контакта и снижения уровня контактных напряжений применяется замок типа «елочка». Такой тип замкового соединения позволяет снизить контактные напряжения до безопасного уровня, но при этом сохраняется необходимость увеличивать поперечное сечение замка со стороны лопатки. Поэтому для сохранения прочности обода диска необходимо увеличивать его толщину. Все это приводит к увеличению массогабаритных показателей рабочих колес в целом. Для решения данной проблемы разработана конструкция типа «блиск». В данной конструкции рабочие лопатки изготавливаются как единое целое с диском или соединяются с применением неразъемного соединения, что позволяет снизить массу изделия – до 30%. При изготовлении методом порошковой металлургии такой конструкции с лопатками возникает ряд недостатков: необходимость изготовления порошка дискового сплава и применение дорогостоящего оборудования – газостатов. Данных недостатков лишена конструкция типа «блиск», изготовленная с применением неразъемных соединений, выполненных методом пайки. Поэтому разработка технологии получения высокопрочных неразъемных соединений из разнородных материалов применительно к конструкции «блиск» является весьма актуальной задачей при проектировании и изготовлении новых высокоэффективных ГТД.

Одним из перспективных сочетаний сплавов применительно к конструкции «блиск» являются: деформируемый жаропрочный сплав ЭП975 для материала диска и литейный монокристаллический интерметаллидный сплав ВКНА-4У в качестве материала лопаток, имеющих следующие характеристики (табл. 1) [6–10].

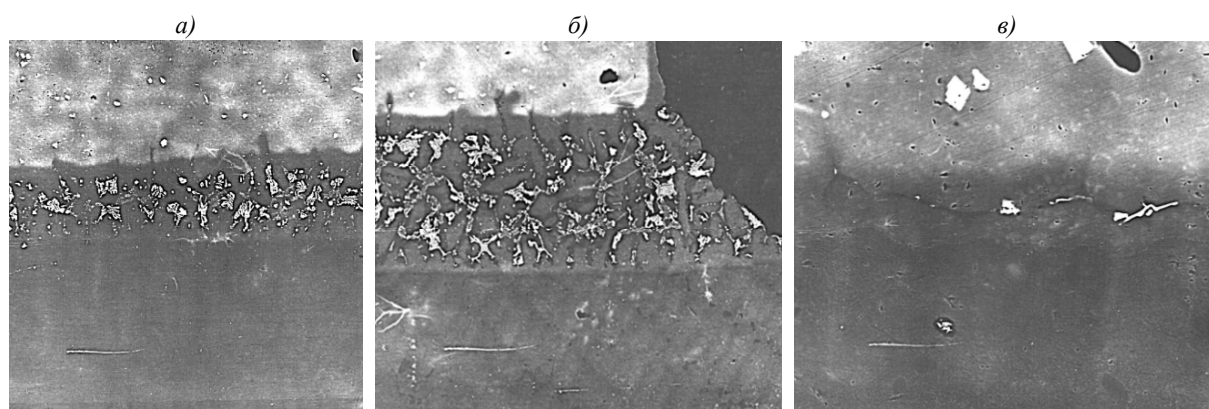
Таблица 1

**Прочностные свойства соединяемых никелевых жаропрочных сплавов**

Сплав	$\sigma_B$					$\sigma_{100}$	
	МПа, при температуре испытаний, °С						
	20	600	750	800	975	800	975
ВКНА-4У	1290	1050	850	800	510	600	200
ЭП975	1350	1250	1050	970	590	520	150

Для обеспечения высокого уровня прочностных характеристик обоих сплавов режим пайки должен объединять режимы термических обработок каждого из соединяемых сплавов [11–14]. Обеспечение оптимальной структуры сплава ЭП975 достигается за счет термической обработки. Сплав ВКНА-4У относится к сплавам интерметаллидного класса (на основе интерметаллида  $Ni_3Al$ ) и обладает высокой термической стабильностью. Данный сплав имеет упорядоченную структуру вплоть до начала плавления и поэтому не требует применения специальной термической обработки для обеспечения высоких прочностных характеристик. Поэтому пайку сплавов ЭП975 с ВКНА-4У необходимо проводить в соответствии с термической обработкой сплава ЭП975 (при температуре 1200–1240°C).

Опробование для пайки сплавов ЭП975 с ВКНА-4У припоев ВПр24, ВПр47, ВПр48, а также опытного припоя типа ВПр36 (с температурой пайки 1230–1240°C) показало, что все исследованные припои обладают хорошей растекаемостью и хорошо формируют паяные швы. Однако исследование микроструктур паяных соединений выявило, что даже при длительных выдержках припои ВПр24 и ВПр48 образуют сплошные эвтектические прослойки в паяных швах, которые значительно разупрочняют паяные соединения. Эвтектическая прослойка в паяных швах величиной до 80 мкм, выполненных припоем ВПр47, значительно фрагментирована и располагается отдельными островками. Но при этом припой ВПр47 обладает значительной эрозионной активностью по отношению к сплаву ЭП975 и склонностью к междендритному проникновению в сплав ВКНА-4У. Исследование микроструктур паяных соединений, выполненных опытным припоем, показало отсутствие эвтектических прослоек в паяных швах и минимальную эрозионную активность припоя по отношению к соединяемым материалам (рис. 1).



Припой в зазоре 0,2 мм

Припой в максимальном зазоре

Место исчезновения избыточных фаз в припое

Рисунок 1. Микроструктура (а, б –  $\times 100$ ; в –  $\times 400$ ) паяного соединения сплавов ЭП975 с ВКНА-4У, выполненного опытным припоем типа ВПр36

После выдержки при температуре 1230–1240°C в течение 4 ч на границе сплава ВКНА-4У сохраняется зона более крупных частиц  $\gamma'$ -фазы. По границам зерен в зоне шва около сплава ВКНА-4У карбиды и частицы  $\gamma'$ -фазы крупнее, чем по границам зерен в шве. Микроструктура сплава ВКНА-4У в этом состоянии около шва и вдали от него практически одинакова. Около эвтектики наблюдаются мелкие частицы  $\gamma'$ -фазы, что характерно для данного сплава при такой термообработке. Частиц  $\beta$ -фазы почти не наблюдается. Со стороны сплава ЭП975 после выдержки при температуре 1230–1240°C в течение 4 ч четкой границы нет, но наблюдается слой, параллельный шву, из карбидов или частиц избыточной фазы.

Микрорентгеноспектральный анализ паяного шва показывает, что эвтектические структуры, затвердевающие последними, состоят из боридов, содержащих сложный борид хрома, вольфрама и молибдена, имеющий вид китайского шрифта, и  $\gamma$ -твердого раствора припоя. Кроме того, в эвтектике присутствуют в относительно небольшом количестве карбобориды Nb–Ti–W и Cr–Mo–W. Это объясняется затрудненной диффузией данных элементов в виду их значительного атомного радиуса и малой диффузионной подвижностью, а также высокой склонностью к образованию карбидов и боридов.

Содержание алюминия, титана, хрома, кобальта, никеля, ниобия, молибдена и вольфрама определялось перпендикулярно плоскости соединения на расстояниях 10, 20, 50, 100 и 200 мкм от границ припоя вглубь соединяемых основных материалов (табл. 2, рис. 2). Из данных, представленных в таблице, следует, что в процессе выдержки происходит выравнивание химического состава припоя и паяемых материалов с диффузией легирующих элементов в сторону меньших концентраций. Диффузия бора из припоя идет преимущественно в сплав ЭП975 по границам зерен и сопровождается фазовыми реакциями, в частности, образованием боридов титана. Из приведенных данных также видно, что в процессе пайки сегрегации химических элементов, которые могли бы разупрочнить паяное соединение, отсутствуют как в паяном шве, так и в диффузионных зонах паяемых материалов. Наоборот, графики распределения химических элементов в диффузионных зонах сплавов ЭП975 и ВКНА-4У (см. рис. 2) указывают на образование плавных переходов от химического состава одного сплава к другому, за исключением малоподвижного ниобия, содержание которого в припое значительно превышает его содержание в соединяемых сплавах.

## Результаты МРСА диффузионных зон паяного соединения сплавов ВКНА-4У и ЭП975

Место анализа		Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W	Σ
Сплав ЭП975	200 мкм	5,2	1,4	9,0	13,4	60,8	0,9	1,3	7,6	99,6
	100 мкм	5,3	1,3	9,2	13,1	62,0	0,9	1,3	7,1	100,2
	50 мкм	5,4	1,1	9,4	12,8	62,1	0,8	1,4	7,0	100,0
	20 мкм	5,6	1,4	9,2	12,7	62,2	0,8	1,3	6,6	99,9
	10 мкм	5,8	1,3	8,7	12,4	63,0	1,1	1,7	6,3	100,3
	0 мкм	5,8	1,5	8,8	12,7	62,3	1,5	1,5	6,0	100,1
Сплав ВКНА-4У	0 мкм	5,9	1,0	8,6	12,1	63,4	1,0	1,9	6,5	100,4
	10 мкм	6,6	0,9	7,8	10,0	66,7	0,5	2,6	4,9	100,0
	20 мкм	8,1	1,1	6,3	6,7	71,8	0,5	4,2	1,6	100,3
	50 мкм	8,3	0,8	5,2	4,9	74,5	Н/о*	5,2	1,6	99,5
	100 мкм	8,6	0,8	4,8	4,4	75,0	Н/о	5,2	1,3	100,1
	200 мкм	8,7	1,0	4,7	4,3	74,6	Н/о	5,5	1,3	100,1

\* Н/о – не определялся.

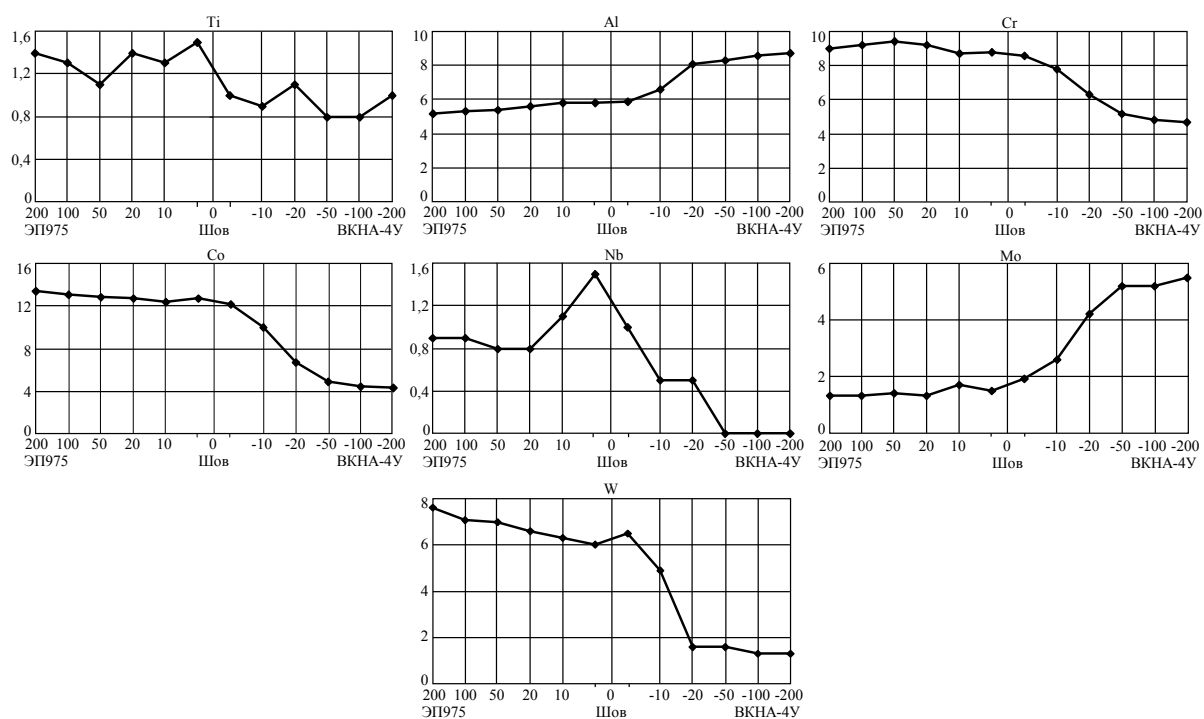


Рисунок 2. Диаграммы распределения химических элементов в диффузионных зонах паяного соединения сплавов ВКНА-4У и ЭП-975

Образцы для определения прочностных характеристик соединений, имитирующие соединения лопаток с дисками, изготавливали из монокристаллических отливок сплава ВКНА-4У и цилиндрических заготовок сплава ЭП975 (рис. 3) Цилиндрические поверхности образцов из сплавов ВКНА-4У входили в отверстие в торцах цилиндров из сплава ЭП975 с зазором 0,1 мм. Величина нахлестки соответствовала удвоенному диаметру рабочей части образца. В цилиндрическую полость  $\varnothing 5$  мм образца из сплава ЭП975 засыпался припой и закреплялся на акриловой смоле. Пайка образцов производилась в вертикальном положении при температуре 1230–1240°C. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

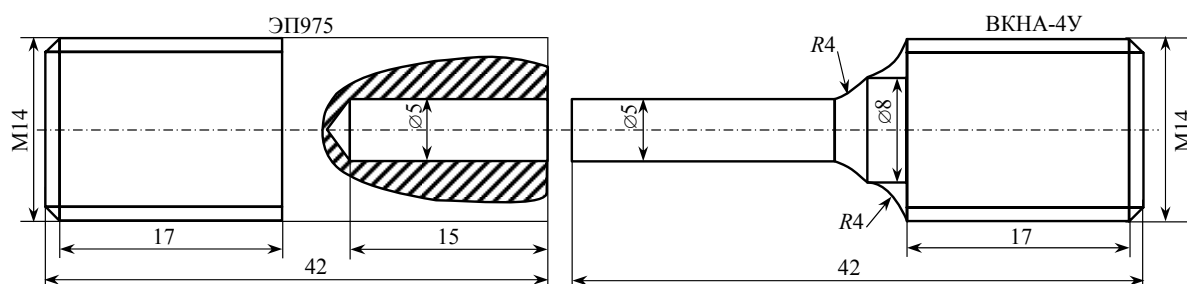


Рисунок 3. Эскиз образца под пайку для определения прочностных характеристик паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-4У

Таблица 3

Механические свойства паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-4У

Температура испытания, °С	Кратковременные испытания		Длительные испытания		
	$\sigma_b$ , МПа	Место разрушения	$\sigma_{100}$ , МПа	Время до разрушения	Место разрушения
20	1177	ВКНА-4У	–	–	–
975	535	ВКНА-4У	180	118	Снят до разрушения

Испытания показали высокую прочность паяных соединений. Разрушение всех образцов происходило по основному материалу – сплаву ВКНА-4У.

На основании проведенной работы по созданию ротора конструкции типа «блиск» для перспективных ГТД из жаропрочных дисковых и лопаточных материалов получены следующие результаты:

- показана возможность использования в качестве материала лопатки в конструкции «блиск» сплава ВКНА-4У;
- разработан припой для пайки сплавов ЭП975 и ВКНА-4У на основе системы легирования серийных припоев;

– выбран режим термообработки паяного соединения сплавов ЭП975 и ВНКА-4У, обеспечивающий получение регламентированной структуры обоих сплавов;

– определены прочностные свойства паяного соединения сплавов ЭП975 и ВНКА-4У  
– прочность паяного соединения диск–лопатка находится на уровне ~0,9 от прочности сплава ВКНА-4У.

Применение конструкции типа «блиск», выполненной методом высокотемпературной пайки, перспективно при изготовлении малоразмерных дисков ГТД. Для успешного внедрения новой технологии изготовления дисков необходимо проработать конструктивное оформление соединения диска с лопатками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 13–19.
6. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Саморуков М.Л., Гриднев Ю.Л. Исследование влияния технологии ротационной сварки трением деформируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 на структуру и прочностные характеристики сварных соединений //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». 2011. С. 114–121.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 98–103.
8. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
9. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях //Сварочное производство. 1997. №4. С. 4–11.

10. Лукин В.И., Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 //Сварочное производство. 1997. №6. С. 12–17.
11. Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов //МиТОМ. 2007. №12. С. 7–14.
12. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36 //Технология машиностроения. 2010. №5. С. 21–25.
13. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе //Сварочное производство. 2010. №10. С. 24–27.
14. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Орехов Н.Г. Особенности пайки монокристаллических отливок из сплава ЖС32 //Сварочное производство. 2012. №5. С. 24–30.