

УДК 621.791:669.018.44

О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, В.И. Лукин<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>, И.А. Галушка<sup>1</sup>,  
О.В. Шевченко<sup>1</sup>

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-144-158

*Рассмотрены преимущества технологий высокотемпературной пайки при изготовлении деталей и узлов современных ГТД. Приведены результаты исследований в области технологий получения порошков никелевых жаропрочных припоев методом газоструйного распыления. Разработаны составы и технологии изготовления новых отечественных полуфабрикатов недеформируемых припоев — лент и паст порошковых припоев на органическом связующем. Представлены результаты работ по исследованию и разработке технологии пайки никелевых жаропрочных сплавов в разномноименном сочетании применительно к перспективной конструкции типа «блиск» рабочего колеса ГТД, изготовленного с применением неразъемных соединений. Приведены результаты работ по разработке технологии получения неразъемных соединений методом пайки интерметаллидных никелевых жаропрочных сплавов типа ВКНА и ВИН в одноименном сочетании применительно к деталям и узлам горячего тракта ГТД.*

**Ключевые слова:** припой, монокристаллические никелевые жаропрочные сплавы, пайка, паяные соединения, органическое связующее, ленты, пасты.

O.G. Ospennikova, V.I. Lukin, A.N. Afanasiev-Khodykin, I.A. Galushka,  
O.V. Shevchenko

### Advanced developments in the field of the high-temperature soldering of heat resisting alloys

*This article describes the advantages of brazing technology at manufacturing the parts and components of modern gas turbine engines. The results of research in the field of production technologies of high-temperature nickel-based solder powders by the gas-jet spraying technique are shown. Compositions and technologies of new domestic nondeformable semi-manufactured solders in tapes and pastes based on organic binding are developed. The results of works on research and development of soldering technology of nickel-based superalloys in opposite combinations for perspective «blisk»-type design of jet engine impeller*

---

<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

*made by using the permanent joints are shown. The results of development of soldering technology for manufacturing the permanent joints of intermetallic nickel superalloys of VKNA and WIN-types in the same combination in relation to parts and assemblies of jet engine hot sections are shown.*

**Keywords:** *solder, monocrystal nickel superalloys, brazing, brazed joints, organic binding, tapes, pastes.*

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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») [1, 2]. Многие детали ГТД изготавливают с применением технологии пайки: рабочие лопатки, сопловые лопатки, блоки сопловых аппаратов, топливные коллекторы и т. д. [3–10]. Высокая востребованность припоев и технологий пайки при изготовлении деталей и узлов современных ГТД обусловлена невозможностью соединять сваркой плавлением многие жаропрочные деформируемые и литейные сплавы, которые содержат значительное количество  $\gamma'$ -фазы, что приводит к росту напряжений при кристаллизации и образованию трещин как в наплавленном металле – «горячих», так и в околошовной зоне – «холодных». Особые проблемы возникают при разработке технологий соединения жаропрочных литейных сплавов, в том числе содержащих рений и рутений, получаемых по технологии высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК). При пластической деформации в случае сварки в твердой фазе и при последующем нагреве происходят процессы поверхностной рекристаллизации в деформированных областях, что приводит к разрушению монокристаллической структуры со значительным снижением прочностных характеристик сплавов, – в первую очередь длительной прочности при высоких температурах [11–18]. Поэтому в ряде случаев единственным методом соединения материалов нового поколения является пайка, к технологическим преимуществам которой относятся: возможность автоматизации процесса и одновременного соединения нескольких узлов сложной геометрической формы или деталей со значительной протяженностью паяного шва, в том числе в труднодоступных местах; достижение высокой производительности и более низкой себестоимости продукции по сравнению с любыми другими способами соединения [19–24].

При этом к паяным соединениям предъявляются высокие требования по механической прочности (прочность паяных соединений в отдельных случаях должна быть сопоставима с прочностью соединяемых материалов) и рабочей

температуре, соответствующей рабочей температуре соединяемых материалов (до 1150°C). Столь высокие показатели могут обеспечивать только сложнелегированные припои с системой легирования, близкой к системе легирования соединяемых материалов. Из-за сложного химического состава многие припои являются недеформируемыми и не могут быть получены традиционными методами в виде полос, фольги или прутков. Наиболее технологичными полуфабрикатами таких припоев являются порошки, ленты и пасты порошковых припоев на органическом связующем.

Для производства порошков припоев опробованы разнообразные методы изготовления: центробежное распыление, газоструйное распыление, механическое легирование, размол микрокристаллических лент, волокон, стружки и слитков. Наиболее высокими показателями качества порошка и производительности процесса обладает технология газоструйного распыления. Для ее реализации во ФГУП «ВИАМ» произведен запуск установки HERMIGA 10/100 V1, которая позволяет получать металлические гранулы сферической формы распылением струей нейтрального газа с узким интервалом размеров частиц порошка и минимальным содержанием газов.

Разработаны технологии производства порошков никелевых жаропрочных припоев, обеспечивающие:

- сферическую форму гранул (рис. 1);
- широкую номенклатуру фракционного состава порошков:
  - 1 класс – частицы с размером от 10 до 40 мкм;
  - 2 класс – частицы с размером от 40 до 100 мкм;
  - 3 класс – частицы с размером от 10 до 200 мкм;
  - 4 класс – частицы с размером от 10 до 100 мкм;
- низкое содержание кислорода – менее 0,010%.

Отличительными особенностями порошка припоя, получаемого на установке HERMIGA 10/100 V1, являются содержание большого

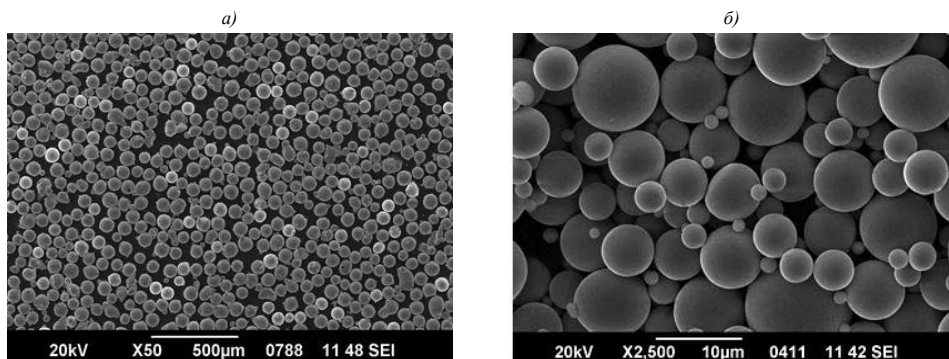


Рис. 1. Порошок припоя ВПр37

количества мелкой фракции и сферическая форма частиц. Применение мелкого порошка припоя затрудняется ввиду его малой сыпучести и склонности к комкованию. Для повышения удобства использования и точности дозировки порошковых припоев за рубежом используют ленты и пасты порошковых припоев на органическом связующем. При этом порошок припоя связывается органическим связующем в единую массу и наносится на паяемую деталь в пастообразном состоянии либо в виде ленты заданных геометрических размеров.

Существующие отечественные технологии изготовления лент и паст порошковых припоев не позволяют организовывать серийные поставки готовых полуфабрикатов предприятиям-потребителям ввиду малого срока годности: не более 1 мес – для паст и не более 3 мес – для лент. Поэтому проведены исследования и разработаны составы органических связующих для лент и паст порошковых припоев, а для организации централизованных поставок припоев приобретены и освоены в производстве вакуумный смеситель СДВ-2, пресс гидравлический ПС-3033 и валковая машина SCAMEX M88/150R3.

Проведены исследования различных органических веществ и разработаны составы органических связующих для изготовления лент и паст порошковых припоев. Основным требованием к основе органического связующего для лент и паст порошковых припоев является способность полного разложения связующего при нагреве в вакууме без образования зольного остатка. Наличие зольного остатка от органического связующего при начале плавления припоя может привести к появлению неметаллических включений в паяном шве или к значительному повышению содержания углерода в припое, что негативно скажется на качестве и прочности паяных соединений. С целью оценки полноты разложения различных органических веществ проведена серия экспериментов по исследованию наличия остатков органического связующего после нагрева в вакууме до температуры 900°С. Исследованию подвергали следующие органические связующие: смола эпоксидная Э-41, смола полиамидная ПО-300, смола эпоксидная ЭД-20, лак фторполиуретановый МАОК, фторкаучук СКФ-32, дисперсия поливинилацетата, сополимер БМК-5. Внешний вид образцов после испытаний приведен на рис. 2. Видно, что только два вещества полностью разлагаются при нагреве в вакууме – сополимер акриловой смолы БМК-5 и дисперсия поливинилацетата (рис. 2, *е*, *ж*). При разложении органического связующего возможно протекание процессов взаимодействия остатков связующего с порошком припоя, результатом которых может стать насыщение припоя углеродом, что может негативно сказаться на его технологических или эксплуатационных свойствах. Для выявления процессов взаимодействия органического связующего

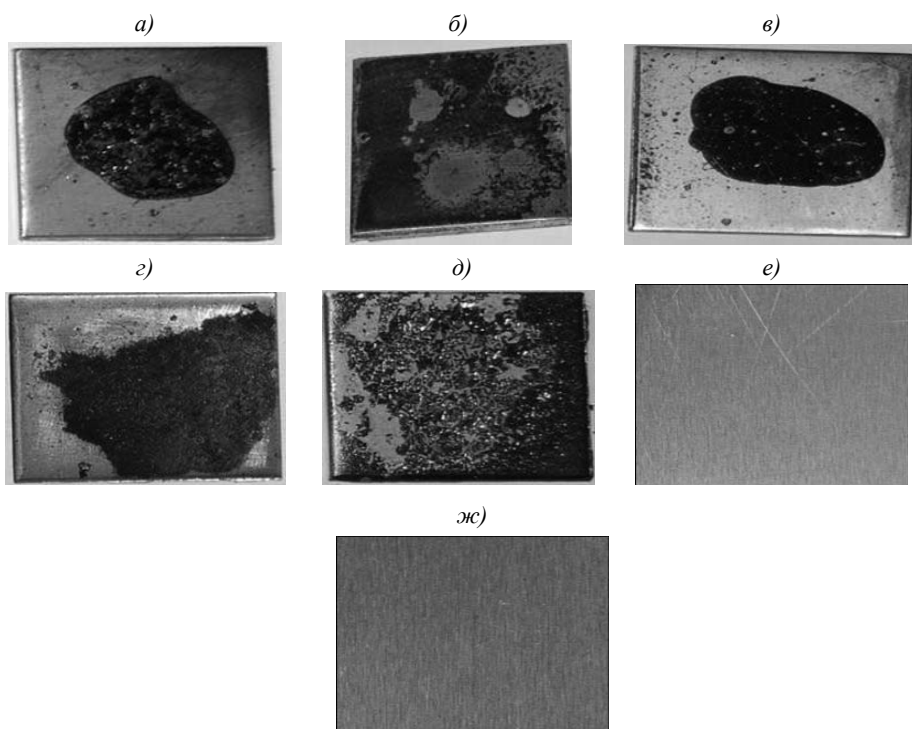


Рис. 2. Внешний вид проб на наличие зольного остатка после нагрева в вакууме до температуры 900°С:

*а* – смола эпоксидная Э-41; *б* – смола полиамидная ПО-300;  
*в* – смола эпоксидная ЭД-20; *г* – лак фторполиуретановый МАОК;  
*д* – фторкаучук СКФ-32; *е* – дисперсия поливинилацетата;  
*ж* – сополимер БМК-5

с припоем при высокотемпературном нагреве проведены исследования содержания углерода в припое в исходном состоянии и после нагрева в вакууме в смеси с исследуемыми веществами. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения примесей в припое в исходном состоянии и после нагрева с различными основами органического связующего**

| Основа органического связующего   | Содержание, % (по массе) |        |       |        |
|-----------------------------------|--------------------------|--------|-------|--------|
|                                   | С                        | S      | O     | N      |
| В исходном состоянии              | 0,011                    | 0,0017 | 0,071 | 0,0007 |
| Сополимер акриловой смолы БМК-5   | 0,026                    | 0,0031 | 0,040 | 0,0010 |
| Дисперсия поливинилацетата марок: |                          |        |       |        |
| Д50Н                              | 0,399                    | 0,0010 | 0,015 | 0,0034 |
| Д50С                              | 0,470                    | 0,0031 | 0,018 | 0,0009 |
| Д50В                              | 0,590                    | 0,0055 | 0,020 | 0,0008 |

Как видно из приведенных данных, сополимер БМК-5 не оказывает существенного влияния на состав припоя в отличие от дисперсии поливинилацетата, которая увеличивает содержание углерода в припое в 30–50 раз. Увеличение содержания углерода в припое более чем на 0,35% не может не сказаться на технологических и эксплуатационных характеристиках припоя. Поэтому в качестве основы органического связующего для лент и паст порошковых припоев выбран сополимер акриловой смолы БМК-5 [25].

Для обеспечения оптимального комплекса технологических характеристик лент и паст на органическом связующем в состав органического связующего необходимо введение модифицирующих добавок:

- для обеспечения высокой пластичности лент в сочетании со способностью длительного сохранения геометрических размеров при хранении в связующее для лент припоев необходимо введение пластификатора;
- для обеспечения длительного срока хранения паст припоев без расслоения в состав связующего необходимо введение гелеобразующих компонентов.

Для выбора оптимального содержания пластификатора в связующем для изготовления лент проведены серии экспериментов по определению влияния содержания пластификатора на технологические и эксплуатационные свойства лент порошковых припоев на органическом связующем:

- $H_{\min}$  – минимальная толщина ленты, исключающая налипание ленты на валки при изготовлении;
- $R_{\min}$  – минимальный радиус изгиба ленты без появления растрескивания при нанесении на криволинейные поверхности.

Результаты исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние содержания пластификатора в органическом связующем на технологические характеристики лент порошкового припоя**

| Условное содержание пластификатора | $H_{\min}$ , мкм | $R_{\min}$ , мм |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| 1                                  | 250              | 4               |
| 2                                  | 280              | 3               |
| 3                                  | 380              | 1               |
| 4                                  | 400              | 1               |
| 5                                  | 480              | 1               |
| 6                                  | 650              | 1               |
| 7                                  | 690              | 1               |

На основании проведенных исследований разработан состав связующего и технология изготовления лент порошковых припоев, обеспечивающие:

- широкую номенклатуру размеров (толщина – от 0,4 до 10 мм, ширина – до 200 мм, длина – до 300 мм);
- высокую пластичность (допускают многократное изгибание с радиусом изгиба 1 мм);

- удобство использования (не требуют специального инструмента для раскроя);
- надежную фиксацию припоя при сборке и пайке (могут покрываться специальным клеевым слоем для фиксации лент на деталях);
- длительный срок хранения (не менее 12 мес) без формоизменения и потери технологических характеристик.

Основным требованием к составу органического связующего для изготовления паст порошковых припоев является обеспечение высокого сопротивления расслоению (седиментации) паст на составляющие (порошок и органическое связующее) в процессе хранения. Введение гелеобразующих веществ в состав органического связующего обеспечивает высокие статическую вязкость и динамическую жидкотекучесть. Выбор гелеобразующего вещества определяется в первую очередь типом применяемого растворителя. Так, для водных дисперсий различных органических связующих используют органические вещества типа поливинилового спирта, а для связующих на основе органических растворителей – микрофинирированный диоксид кремния Аэросил. Применение второго типа гелеобразующих веществ нежелательно, так как при нагреве в вакууме диоксид кремния не разлагается, а остается в расплаве припоя и может быть внесен в паяемый шов. Поэтому в качестве основы целесообразно применять водорастворимые дисперсии с добавлением гелеобразующих веществ типа поливинилового спирта.

Для выбора оптимального состава органического связующего для паст порошковых припоев проведены серии экспериментов с пастами припоев, изготовленными с различными составами органического связующего. При проведении экспериментов оценивали влияние срока хранения на основные технологические характеристики паст порошковых припоев:

- скорость экструзии пасты через сопло  $\varnothing 2$  мм при усиллии экструзии  $2 \text{ кН/м}^2$ ;
  - относительный объем неизвлекаемого остатка пасты.
- Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

**Зависимость скорости экструзии и объема неизвлекаемого остатка пасты от срока хранения**

| Срок хранения, мес | Скорость экструзии (г/с)/объем неизвлекаемого остатка (%) для состава с условным номером |        |        |         |
|--------------------|--|--------|--------|---------|
|                    | 1  | 2      | 3      | 4       |
| 1                  | 3,20/5   | 2,20/2 | 2,00/3 | 1,20/3  |
| 2                  | 1,60/21  | 2,10/2 | 2,00/3 | 1,18/4  |
| 3                  | 0,60/38  | 2,10/3 | 2,00/3 | 1,15/5  |
| 4                  | 0,10/82  | 2,10/4 | 1,90/4 | 1,10/6  |
| 5                  | –/100  | 2,00/4 | 1,90/4 | 0,90/8  |
| 6                  | –/100  | 2,00/5 | 1,90/4 | 0,70/10 |

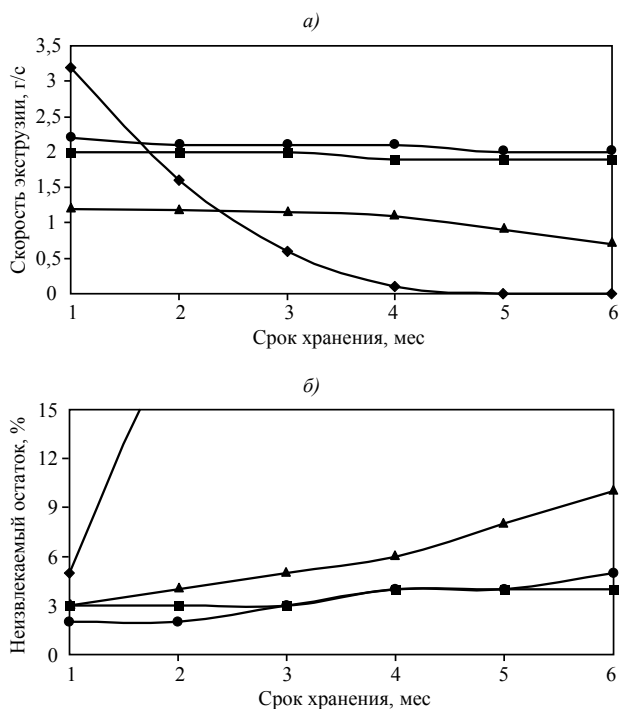


Рис. 3. Зависимость скорости экструзии (а) и неизвлекаемого остатка пасты (б) от срока хранения составов 1 (◆), 2 (●), 3 (■) и 4 (▲)

Из приведенных данных видно, что состав 1 из-за недостаточной статической вязкости не может обеспечить длительного срока хранения, о чем свидетельствует значительное снижение значений технологических характеристик при хранении в течение 2 мес: снижение скорости экструзии в 2 раза и увеличение объема неизвлекаемого остатка до 21%. Состав 4 в процессе хранения приобретает значительную динамическую вязкость, что приводит к снижению скорости экструзии  $< 1$  г/с. При этом составы 2 и 3 обеспечивают сохранение высокой скорости экструзии пасты (1,9–2,2 г/с) на протяжении всего срока хранения (6 мес) и незначительное увеличение объема неизвлекаемого остатка (с 2 до 5%), что свидетельствует о высокой стабильности технологических характеристик паст порошковых припоев.

Разработанные состав связующего и технологии изготовления паст порошковых припоев, обеспечивают:

- возможность нанесения пасты шпателем или экструзией из шприца;
- низкое усилие экструзии ( $< 2$  кН/м<sup>2</sup>);
- длительный срок хранения (не менее 6 мес) без потери уровня технологических характеристик.



Внешний вид лент и паст порошкового припоя приведен на рис. 4.

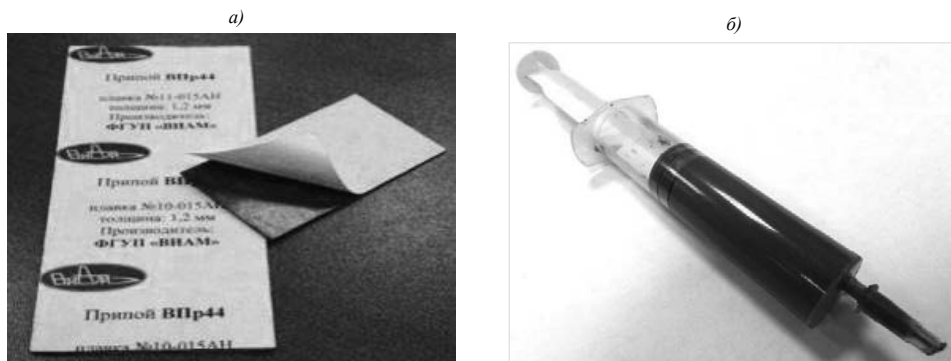


Рис. 4. Лента (а) и паста (б) порошкового припоя на органическом связующем

Условия работы рабочих колес турбины ГТД отличаются высоким уровнем нагрузок. Поиск путей достижения наибольшего сопротивления разрушению материала конструкции в неравномерном температурном поле привел к применению биметаллических соединений. В конструкции ротора типа «блиск» используются высокожаропрочные дисковые сплавы с рабочими температурами на ободе диска до  $850^{\circ}\text{C}$ , которые обладают повышенными надежностью и ресурсом, а для лопаток – монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы с рабочими температурами до  $1150^{\circ}\text{C}$ , т. е. с существенно большими, чем на ободе. При изготовлении конструкций типа «блиск», когда лопатки изготавливаются заодно с диском из одной заготовки с помощью механической обработки, значительные трудности вызывает обработка профиля лопаток. Диск и лопатки работают в разных условиях, и требования к материалам, из которых они изготовлены, существенно различаются. Если такой диск с лопатками изготавливать из одного сплава (например, дискового), то придется значительно снижать температуру на рабочих лопатках. Снижение массы конструкции типа «блиск» достигается за счет снижения массы замковой части лопаток.

Основной задачей, требующей решения при создании ротора конструкции типа «блиск», является обеспечение надежного неразъемного соединения монокристаллических лопаток из никелевых литейных жаропрочных сплавов и диска из никелевых деформируемых сплавов. В настоящее время в качестве методов соединения рассматриваются следующие технологии: горячее изостатическое прессование (ГИП) порошкового диска совместно с лопатками, линейная сварка трением, диффузионная сварка и диффузионная пайка. Применение метода ГИП при создании конструкции типа «блиск» осложняется требованием к точному расположению лопаток относительно друг друга при компактировании диска и необходимостью

изготовления капсул сложной геометрической формы. Реализация методов сварки в твердой фазе методами линейной сварки трением и диффузионной сварки требует приложения значительных усилий, что может приводить к деформации тонких частей лопаток и нарушению монокристаллической структуры лопаток, что неизбежно приводит к снижению значений механических характеристик материала лопаток. Этих недостатков лишен метод диффузионной пайки, немаловажным преимуществом которого является отсутствие потребности в сложном дорогостоящем оборудовании, небольших изменениях в конструкциях дисков и лопаток, а также минимальных изменениях в существующем технологическом процессе изготовления. При изготовлении конструкции типа «блиск» с применением технологии пайки в диске нарезают пазы для установки лопаток, тем самым обеспечивается точное позиционирование лопаток относительно друг друга без применения сложной оснастки. В процессе диффузионной пайки не требуется приложения дополнительных усилий к лопаткам, что исключает связанные с этим проблемы.

Для разработки технологии изготовления рабочего колеса ГТД конструкции типа «блиск» в качестве дискового выбрали деформируемый сплав ЭП975, а в качестве сплава для лопаток – интерметаллидный сплав ВКНА-25, т. е. сплавы с одними из самых высоких рабочих температур: 975°С – для сплава ЭП975, 1150°С – для сплава ВКНА-25.

В ходе проведенных работ по созданию надежного неразъемного соединения разноименных никелевых жаропрочных сплавов разработан припой и выбран режим термической обработки, которые позволяют совместить пайку с термической обработкой соединяемых материалов. Исследование микроструктур паяных соединений показало, что новый припой обеспечивает качественное формирование паяных соединений без образования пор, непропаев, эррозионного взаимодействия с паяемыми материалами. Режим термической обработки обеспечивает изотермическое отверждение паяного соединения без образования хрупких включений и диффузионной пористости. Диффузионный обмен легирующими элементами припоя более интенсивно протекает на границе со сплавом ЭП975, чем со сплавом ВКНА-25 (рис. 5, б). При этом в процессе диффузионного отверждения в сплаве ВКНА-25 выделения избыточных фаз практически не происходит. В сплаве ЭП975 карбиды и бориды в основном выделяются по границам зерен, но не образуют при этом сплошной хрупкой прослойки, что не должно отрицательно сказаться на механических свойствах диффузионной зоны сплава ЭП975. Механические испытания паяных соединений сплавов ЭП975 и ВКНА-25 подтвердили правильность выбора состава припоя, режимов пайки и термической обработки паяных соединений.

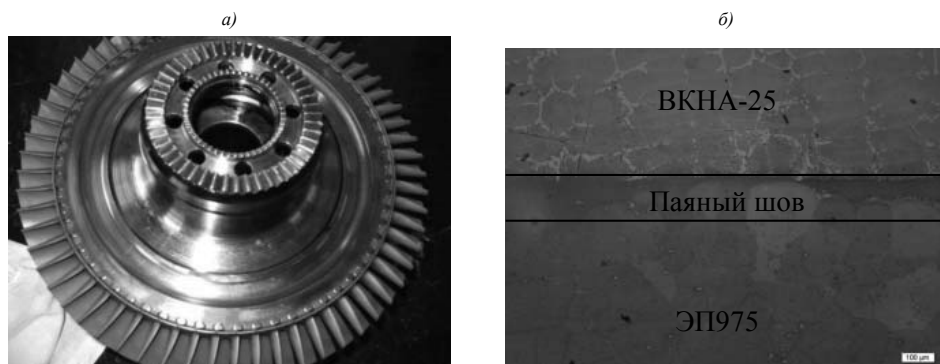


Рис. 5. Внешний вид (а) и микроструктура паяного соединения (б) образца-демонстратора конструкции типа «блиск» из сплавов ЭП975 и ВКНА-25

Разработанные состав припоя и технология пайки сплавов ВКНА-25 и ЭП975 обеспечивают:

- формирование качественного паяного соединения сложной геометрической формы (суммарная протяженность дефектов <1% даже при пайке соединяемых поверхностей, подвергнутых электроэрозионной обработке);
- совмещение пайки и термической обработки паяного соединения с термической обработкой соединяемых материалов;
- пайку зазоров большой величины (до 200 мкм) без формирования хрупких эвтектических включений в паяном соединении;
- длительную (стochasticую) прочность паяных стыковых соединений на уровне 0,85–0,9 от прочности сплава ЭП975 при рабочей температуре изделия.

В АО «Климов» разработана конструкция замкового соединения применительно к ротору ГТД вертолетного двигателя конструкции типа «блиск». Изменение конструкции замкового соединения диска с лопатками без переработки конструкции самого диска обеспечило:

- снижение массы ротора на 7% на перефирической части диска;
- снижение напряжений в ступице диска на 14%;
- исключение крепежных элементов лопаток.

Оптимизация конструкции самого диска и ступицы приведет к еще большему снижению массы ротора вплоть до теоретически возможной величины 30%.

Совместно с АО «Климов» изготовлен образец-демонстратор конструкции типа «блиск» из сплавов ЭП975 и ВКНА-25 (рис. 5, а). Динамические испытания опытного образца-демонстратора конструкции типа «блиск» из сплавов ЭП975 и ВКНА-25 по программе сдаточных испытаний серийных изделий подтвердили работоспособность конструкции.

КПД газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от рабочей температуры газа в горячем тракте ГТД. Поэтому наиболее широко используемым путем увеличения мощности и экономичности ГТД является увеличение рабочей температуры газа, что приводит к соответствующему росту требований к материалам деталей горячего тракта и в первую очередь к рабочим и сопловым лопаткам. Интерметаллидные сплавы типа ВКНА и ВИН (на основе интерметаллида  $Ni_3Al$ ) обладают уникальным комплексом рабочих характеристик: низкая плотность, работоспособность до температур  $1150^{\circ}C$  и даже – до  $1200^{\circ}C$ . Основным недостатком данного типа сплавов является сложность отливки, из-за чего сложные детали (такие как блоки сопловых аппаратов) целесообразно отливать с отдельными лопатками с последующим их соединением методом пайки. Однако для реализации данного способа изготовления необходима разработка технологии пайки, обеспечивающей прочность соединения, которая близка к прочности основного материала.

В ходе сравнительных исследований для пайки сплавов ВКНА и ВИН выбран припой ВПр37, который склонен к диффузионному отверждению. При диффузионной пайке припой ВПр37 – за счет диффузионного обмена легирующими элементами между припоем и паяемым материалом – теряет депрессанты (легирующие элементы, понижающие его температуру плавления), что приводит к его изотермической кристаллизации и формированию качественного паяемого шва без эвтектических прослоек. Проведено исследование влияния режима термической обработки на микроструктуру паяных соединений, выполненных припоем ВПр37, и выбран оптимальный режим термической обработки, обеспечивающий диффузионное отверждение припоя без негативного влияния на микроструктуру сплавов типа ВКНА. Микроструктура паяных соединений, выполненных припоем ВПр37 без термической обработки, представляет собой зерна  $\gamma'$ -фазы, обрамленные значительным количеством выделений избыточных фаз. Вблизи паяного шва в основном материале наблюдается зона диффузионного взаимодействия с припоем, в которой видны игольчатые выделения избыточных фаз. После термической обработки размер и количество выделений избыточных фаз в паяном шве и окошовой зоне значительно уменьшаются, и они становятся сопоставимыми с основным материалом. Избыточные выделения в паяном шве и диффузионной зоне почти полностью отсутствуют (рис. 6).

В результате проведенных исследований разработаны технологии пайки сплавов ВКНА-25, ВКНА-1ВР и ВИН3 в одноименных сочетаниях, обеспечивающие:

– качественное формирование паяных соединений с величиной сборочных зазоров от 20 до 200 мкм;

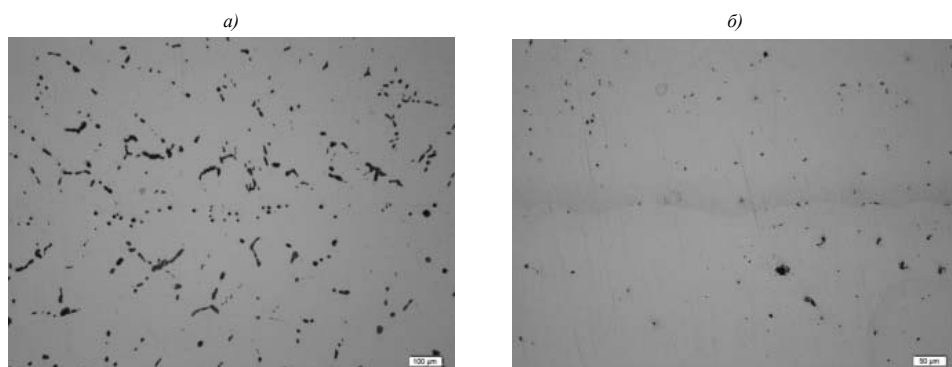


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 1000$ ) паяных соединений сплавов ВКНА-25 (а) и ВИНЗ (б) в одноименных сочетаниях

- практически полное отсутствие эрозионного повреждения основного материала при пайке ( $< 15$  мкм);
- изотермическое отверждение припоя (без образования избыточных фаз) в зазорах до 150–170 мкм;
- рабочую температуру соединений до 1150–1200°C;
- кратковременную прочность паяных стыковых соединений на уровне 0,8–1,0 от прочности основного материала.

#### 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. 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.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 57–60.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
5. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 105–117.

6. 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.
7. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
8. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 38–52.
9. Симс Ч., Хагел В. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 393 с.
10. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
11. Лукин В.И., Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // Сварочное производство. 1997. №6. С. 12–17.
12. Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов // Митом, 2007. №12. С. 7–14.
13. Lukin V.I., Semenov V.N., Starova L.L., Zhegina I.P. at al. Formation of hot cracks in welding of refractory alloys // Metal Science and heat Treatment. 2001. P. 476–480.
14. Lukin V.I., Semenov V.N., Starova L.L., Morozova G.I. at al. Structure of the weld and near-weld zone in nickel alloys EP202 and EK61 // Ibid. P. 484–488.
15. Lukin V.I., Kovalchuk V.G., Samorukov M.L. at al. Effect of friction welding parameters and heat treatment on the quality of welded joints in creep-resisting deformable nickel alloys // Welding International. 2012. Vol. 26. No. 9. P. 728–731.
16. Lukin V.I., Kovalchuk V.G., Samorukov M.L., Gridnev Y.M. at al. Special features of friction welding joints in creep-resisting nickel alloys VKNA-25 and EP975 // Welding International. 2011. Vol. 25. No. 10. P. 800–804.
17. Lukin V.I., Kovalchuk V.G., Golev E.V., Mazalov I.S., Ovchenkova I.I. Welding a creep-resisting Ni–Co–Cr (VZH171) alloy strengthened by nitriding // Welding International. 2013. Vol. 27. No. 11. P. 897–902.
18. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. М.: Изд-во Саратовск. ун-та, 1974. 248 с.
19. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
20. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Особенности получения паяных соединений из сплава ЖС36 // Технологии машиностроения. 2010. №5. С. 21–25.
21. Хорунов В.Ф., Максимова С.В. Пайка жаропрочных сплавов на современном этапе // Сварочное производство. 2010. №10. С. 24.

22. Chaturvedi M.C., Ojo O.A., Richards N.L. Diffusion brazing of cast Inconel 738 superalloy // *Advances in Technol.: Materiales & Materiales Proc.* 2004. No. 6. P. 206–213.
23. Kenyon N., Hrubec R.Y. Brazing of a dispersion strengthened nickel base alloy made by mechanical alloying // *Welding Research Supplement*. April, 1974. P. 145s–152s.
24. Лукин В.И., Столянков Ю.В., Рыльников В.С., Щербаков А.И. Пайка аморфными припоями // *Авиационные технологии*. 2002. С. 96–102.
25. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Высокотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №9. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2016).