

УДК 669.018.29

О.Г. Оспенникова¹, В.И. Лукин¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, И.А. Галушка¹

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТИПА «БЛИСК» ИЗ РАЗНОИМЕННОГО СОЧЕТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-10-16

Рассмотрена перспективная конструкция ротора ГТД типа «блиск», позволяющая уменьшить массу и повысить коэффициент полезного действия двигателя. Показаны преимущества и недостатки такой конструкции по сравнению с традиционной конструкцией, в которой применяется замковое соединение. Проведен обзор технологий, применяемых для изготовления деталей типа «блиск» с разноименным сочетанием высокожаропрочных материалов на основе никеля – лопатки из литейного интерметаллидного сплава и диска из деформируемого сплава. Приведены результаты натурных испытаний ротора ГТД, изготовленного с применением технологии высокотемпературной диффузионной пайки.

Ключевые слова: пайка, диффузионная пайка, припой, жаропрочные никелевые сплавы, конструкция ротора ГТД, биметаллическая конструкция типа «блиск».

О.Г. Ospennikova¹, V.I. Lukin¹, A.N. Afanasev-Khodykin¹, I.A. Galushka¹

THE MANUFACTURE OF THE «BLISK» ROTOR DESIGN MADE FROM BIMETALLIC COMBINATION OF MATERIALS (review)

Considered the perspective of a GTE rotor design that called «blisk», which allows to reduce the weight and increase the efficiency of the engine. Shown the advantages and disadvantages between a «blisk» rotor design and a traditional «fir tree» rotor design. The review of technologies that can be used to manufacture a bimetallic «blisk» design from nickel based superalloys – foundry intermetallide blades and a deformable disk was made. The full scale tests of a gas turbine engine rotor, manufactured with a high temperature diffusive brazing technology were shown.

Keywords: brazing, a diffusive brazing, brazing alloy, nickel super alloys, rotor design GTE, a 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

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в качестве силовых установок для авиационной техники. Следуя современным тенденциям, в авиационной промышленности при разработке новых двигателей особое внимание уделяется увеличению характеристик удельной тяги, повышению коэффициента полезного действия и ресурса. Среди способов повышения энергоэффективности двигателя можно выделить два направления – увеличение температуры рабочего газа и снижение массы подвижных частей двигателя. Ограниченные возможности в повышении температуры рабочего газа ГТД приводят к возрастанию актуальности снижения массы подвижных частей двигателя, в первую очередь, рабочего колеса турбины – наиболее массивной детали двигателя, работающего на высоких оборотах [1–3].

Наиболее нагруженным местом колеса турбины является соединение диска с лопатками, которое работает при наиболее неблагоприятных условиях. В связи с этим оптимизация конструкции данного соединения может значительно снизить массу рабочего колеса.

Традиционно диск с лопатками соединяется механическим (разъемным) креплением типа «елочный профиль». Подобное соединение характеризуется неравномерностью распределения нагрузки по контактным поверхностям, которая возникает вследствие деформации замковых частей и диска в процессе работы. Необходимый запас прочности соединения достигается за счет увеличения площади контакта, что ведет к росту массогабаритных показателей замковых соединений и диска в целом.

В настоящее время активно обсуждается вопрос о замене традиционного рабочего колеса турбины конструкцией типа «блиск», в которой механический тип соединения заменен на неразъемный. Равномерное распределение нагрузки в подобном соединении позволяет снизить массу и размеры замковых частей диска и лопаток, что приведет к снижению массогабаритных показателей ступицы и полотна диска за счет уменьшения центробежной нагрузки. Так, потенциально, за счет изменения конструкции соединения лопаток с диском, суммарное снижение массы рабочего колеса может достигнуть 30% по сравнению с традиционным вариантом [4, 5].

При выборе материалов, из которых будут изготовлены рабочее колесо и лопатки турбины авиационного двигателя, следует учитывать высокую неравномерность механических и термических нагрузок, возникающих в процессе работы. Профильная часть лопаток работает при температурах 800–1150°C, поэтому при выборе материала лопаток предпочтение следует отдавать таким характеристикам, как высокая жаропрочность и длительная прочность. С другой стороны, температура диска рабочего колеса редко превышает 700–750°C, а основными требованиями к материалу диска являются высокие длительная прочность и сопротивление усталости [5]. С учетом условий работы изделия наиболее перспективной является конструкция типа «блиск», выполненная из разноименного сочетания сплавов: для диска – жаропрочные деформируемые, а для лопаток – литейные монокристаллические. В связи с этим для реализации конструкции типа «блиск» необходима разработка технологии получения высокопрочных неразъемных соединений из разноименных никелевых жаропрочных сплавов [6–12].

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 полного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Применение традиционных методов сварки плавлением для подобного сочетания жаропрочных сплавов невозможно ввиду жесткого термического воздействия, образования грубой литой структуры, а также горячих трещин из-за высокого содержания γ' -фазы и др., что в конечном счете отрицательно влияет на физико-механические свойства соединяемых материалов [14]. Поэтому в качестве технологии получения высокопрочного неразъемного соединения могут быть использованы: горячее изостатическое прессование (ГИП) порошкового диска совместно с лопатками, линейная сварка трением, диффузионные сварка и пайка.

Применение метода горячего изостатического прессования

При изготовлении конструкции типа «блиск» методом ГИП заранее изготовленные литые лопатки с помощью керамических элементов устанавливают в капсулу, которую в последующем заполняют порошком дискового сплава, герметизируют и проводят процесс ГИП. По окончании процесса капсулу удаляют с помощью травления, а диск

подвергают механической обработке. Реализация данного метода требует разработки и изготовления капсулы сложной геометрической формы, которая с учетом компактирования порошка деформируемого сплава должна обеспечить требуемую форму готового изделия и точность взаимного расположения лопаток относительно друг друга. Разработка конструкции капсулы значительно усложняется необходимостью точного расположения лопаток в готовом изделии, исправить положение которых после изготовления не представляется возможным. Данный метод также исключает возможность ремонта изделия после наработки [15].

Еще одна проблема, возникающая при реализации метода ГИП обусловлена требованиями к целому комплексу сложного технологического оборудования: установке для получения порошков жаропрочного сплава, высокоточному комплексу механической обработки для изготовления капсул, комплексу оборудования для наполнения капсул порошком и их герметизации, газостату.

Применение метода диффузионной сварки

Одним из методов сварки в твердой фазе, при котором не происходит расплавления соединяемых материалов, является диффузионная сварка. Технологически метод диффузионной сварки можно разделить на три фазы, протекающих последовательно друг за другом.

Первая фаза связана с формированием физического контакта между соединяемыми поверхностями, находящимися на расстоянии, при котором происходит валентное межатомное взаимодействие. На образование физического контакта между соединяемыми поверхностями оказывают влияние: микропластическая деформация контактных поверхностей, деформационный рельеф, температура и сварочное давление.

Вторая фаза – активация контактных поверхностей. В процессе сварки разнородных материалов возникают активные центры на поверхности наиболее твердого материала. Результатом активации поверхностей разнородных материалов будет валентное межатомное взаимодействие, при котором между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи. Оценкой полноты протекания процесса активации контактных поверхностей служит прочность сварного соединения. Наибольшая прочность получаемого неразъемного соединения достигается при наличии на поверхности максимального числа активных центров.

Заключительная, третья фаза – объемное взаимодействие, наступающее с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В этой фазе происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта, так и в объеме зоны контакта [16].

Как результат, в зоне контакта возникает взаимная диффузия атомов свариваемых металлов и образуется прочное соединение. Недостатками процесса сварки в твердой фазе является значительный рост зерна, а также литейные напряжения в зоне сварного соединения.

Однако диффузионная сварка не исключает возможной рекристаллизации монокристаллических лопаток, приводящей к значительному снижению их механической прочности. Кроме того, получение высокопрочного соединения методом диффузионной сварки при условии контроля положения лопатки является сложной технической задачей ввиду значительной разницы в деформационных характеристиках у литейных и деформируемых сплавов во время сварки. Применение метода диффузионной сварки для развитых поверхностей еще более усложняется из-за высоких требований к подготовке соединительных поверхностей, необходимой для получения стабильного качества сварных соединений. Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют неразрушающие методы контроля качества сварного соединения, полученного посредством диффузионной сварки, что затрудняет контроль качества готового изделия.

Применение линейной сварки трением

Существует еще один метод сварки в твердой фазе – линейная сварка трением, при которой предъявляются менее жесткие требования к чистоте подготавливаемых поверхностей. При применении этого метода детали нагреваются благодаря преобразованию механической энергии в тепловую в результате трения при возвратно-поступательном движении. В процессе трения свариваемых изделий происходит разогрев металла в зоне контакта, повышение его пластичности и выдавливание в грат из места контакта вместе с оксидными пленками. Малая продолжительность процесса сварки (несколько секунд) обеспечивает малую зону термического влияния на изделие. Благодаря высокой стабильности и производительности процесса данный метод сварки широко распространен в современной промышленности [17]. Однако при формировании соединения монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов, применяемых для лопаток, в зоне сварки с деформированными сплавами, применяемыми для дисков, велика вероятность рекристаллизации монокристаллического сплава ввиду значительных пластических деформаций и высокой температуры, что приводит к значительной потере прочности монокристаллического сплава в околосварочной зоне.

Применение метода диффузионной пайки

Еще одним способом формирования высокопрочного неразъемного соединения при температурах ниже температуры плавления соединяемых материалов является метод диффузионной пайки. В данном случае формирование неразъемных соединений происходит при температуре выше, чем солидус припоя, в условиях отвода легкоплавких составляющих припоя или депрессантов из шва. При растекании припоя при температуре пайки, происходит взаимодействие жидкой фазы припоя с паяемыми материалами, проявляющееся в растворении и диффузии металлов, в результате чего на границах твердой и жидкой фаз образуются растворно-диффузионные прослойки, представляющие собой микрзоны расплавов, включающих припой и контактирующий с ним материал. Скорость протекания этих процессов и, соответственно, ширина зоны взаимодействия зависят от природы взаимодействующих материалов, температуры и продолжительности нагрева, а также от остаточных напряжений в паяемых материалах. Так, интенсивность растворения основных материалов в расплаве припоя увеличивается с повышением температуры и длительности контакта твердой и жидкой фаз, при этом происходят разрушение кристаллической решетки твердых металлов и переход их в расплав припоя за счет диффузии, что проявляется в смещении границы контакта жидкой и твердой фаз в сторону соединяемых материалов. Процесс диффузии в этом случае протекает как в сторону припоя (для химических элементов основного материала), так и в сторону паяемого материала (для химических элементов припоя). Таким образом, на границах «основной материал–припой» происходит взаимодиффузия атомов сопрягаемых материалов по поверхности сопрягаемых границ. Диффузионные процессы, протекающие при пайке, за счет сближения микроструктуры и состава паяного шва с паяемыми материалами позволяют повысить рабочую температуру и прочность паяных соединений [18–21].

Технология диффузионной пайки применительно к конструкции типа «блиск» обладает рядом преимуществ: получение всех паяных соединений диска с лопатками за одну технологическую операцию, отсутствие повышенных требований к подготовке соединяемых поверхностей и специфическому дорогостоящему оборудованию, возможно проведение ремонта с удалением изношенных лопаток.

Основными задачами, которые необходимо решить при реализации данной технологии, являются: выбор состава припоя, отработка режимов пайки и термической обработки паяного соединения и изделия в целом. Весь этот комплекс задач должен

обеспечить качественное, равномерное заполнение соединительных зазоров расплавом припоя, диффузионное отверждение припоя и гомогенизацию паяного шва. Кроме того, выбранные режимы пайки и термической обработки паяных соединений должны учитывать режим термической обработки соединяемых материалов.

Остановив свой выбор на реализации метода высокотемпературной пайки при получении неразъемных соединений диска с лопатками применительно к конструкции типа «блиск», потребуется внести минимальные изменения в существующий технологический процесс. При изготовлении ротора ГТД по данной технологии, в диске нарезают пазы для установки лопаток, обеспечивающие точное позиционирование лопаток относительно друг друга без применения сложной и массивной оснастки. В процессе пайки не требуется приложение дополнительных усилий к лопаткам, что исключает связанные с этим проблемы.

Изготовление и опробование ротора ГТД конструкции типа «блиск»

ФГУП «ВИАМ» совместно с АО «ОДК-Климов» проведен комплекс работ по изготовлению и опробованию ротора ГТД конструкции типа «блиск», изготовленного методом диффузионной пайки из сплавов ЭП975 и ВКНА-25, применительно к вертолетному двигателю.

Специалистами АО «ОДК-Климов» проведен расчет прочности замкового соединения с целью определения возникающих в нем напряжений и последующей оптимизации. В качестве вариантов конструктивного исполнения конструкции типа «блиск» рассматривались варианты, представленные на рис. 1.

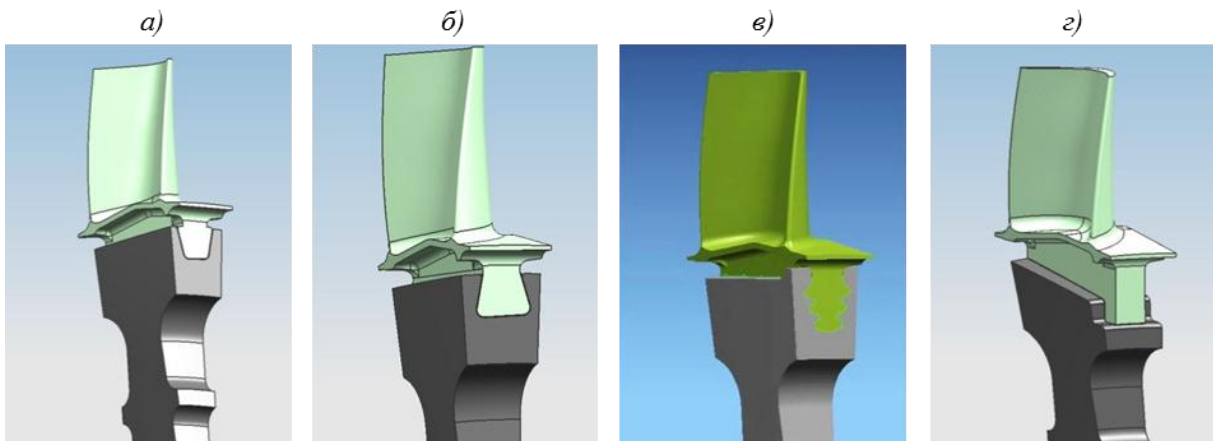


Рис. 1. Варианты конструкции типа «блиск» с пазом «равнобедренная трапеция» (а), «ласточкин хвост» (б), «елочный профиль» (в) и без паза (з)

Прочностной анализ показал, что наилучшие результаты применительно к выбранному сочетанию материалов демонстрирует замковая часть типа «елочный профиль», однако для упрощения технологических операций по изготовлению изделия принято решение о его (изделия) оптимизации. Дополнительно проведена оценка массы изделия (кг) до и после оптимизации:

	До	После
Лопатка	0,7227	0,6044
Припой	0,0178	0,0111
Диск	4,3738	4,1503
«Блиск»	5,1143	4,7658

Видно, что суммарный выигрыш в массе составляет 0,3485 кг.

Специально разработанный состав припоя и отработанная технология пайки обеспечили уровень длительной (100-часовой) прочности паяных соединений при температуре 850°C на уровне 0,8–0,85 от прочности сплава ЭП975 [22, 23].

В рамках совместной работы изготовлен опытный образец-демонстратор (рис. 2) – ротор ГТД, в котором применено неразъемное соединение, выполненное методом диффузионной пайки, что позволило:

- снизить массу обода рабочего колеса на 7%;
- снизить напряжения в ступице диска на 14%;
- исключить крепежные фиксирующие элементы лопаток.



Рис. 2. Опытный образец-демонстратор конструкции типа «блиск»

Испытания на динамическом стенде ротора ГТД по программе серийных сдаточных испытаний показали его работоспособность при частотах вращения ротора на уровне 105% от эксплуатационных значений.

Заключения

По результатам проведенных исследований установлена возможность изготовления ротора ГТД конструкции типа «блиск» из разноименных никелевых жаропрочных сплавов: ЭП975 в качестве материала диска и ВКНА-25 в качестве материала лопаток – с использованием технологии получения неразъемных соединений методом диффузионной пайки. Проведенные на динамическом стенде испытания ротора ГТД по программе серийных сдаточных испытаний показали работоспособность новой конструкции рабочего колеса турбины вертолетного двигателя. Следует отметить, что даже небольшая оптимизация конструкции замкового соединения диска с лопатками позволила снизить массу обода рабочего колеса на 7%, напряжения в ступице диска – на 14%, исключить крепежные фиксирующие элементы лопаток. Оптимизация конструкции рабочего колеса в целом при использовании паяных соединений диска с лопатками позволит снизить массу рабочего колеса турбины вплоть до теоретически возможных 30%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение, 2011. SP2. С. 98–103.
2. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д., Колесников В.И. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожье: Мотор Сич, 2003. Ч. II. 396 с.

3. Фалалеев С.В. Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов: электрон. учеб. пособие. Самара: 2012. С. 91 [Электронный ресурс]. URL: <https://rucont.ru/efd/230195> (дата обращения: 25.09.2018).
4. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин // Вестник УГАТУ, 2011. №4 (44). С. 33–38.
5. Магеррамова 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.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып.: Перспективные конструкционные материалы и технологии, 2011. С. 38–52.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
8. Поварова К.Б., Валитов В.А., Овсепян С.В., Дроздов А.А., Бзылева 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.
9. Магеррамова Л., Захарова Т., Громов М., Самаров В. Турбины: с «блиском» и без [Электронный ресурс]. URL: <http://engine.aviaport.ru/02page32.html> (дата обращения: 25.09.2018).
10. 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. 36–51.
11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Magerramova L.A. Achievement of bimetallic blisks integrated dissimilar alloys for promising high temperature aviation gas turbine engines. 28th International congress of the aeronautical sciences. 2012 [Электронный ресурс]. URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF (дата обращения: 25.09.2018).
16. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие. М.: Академия, 2006. 208 с.
17. Лукин В.И., Саморуков М.Л. Особенности формирования структуры сварных соединений жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175, полученных ротационной сваркой трением // Сварочное производство. 2017. №6. С. 12–18.
18. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Вопросы теории и технологии пайки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. 248 с.
19. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
20. 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.
21. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. М.: Metallurgia, 1976. 264 с.
22. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Припои на никелевой основе для пайки жаропрочных сплавов и сталей // Сварочное производство. 2014. №7. С. 36–42.
23. 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.