

УДК 521.438-253:621.452.3-226.2-71«313»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ-ИМИТАТОРОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МОНОКОЛЕСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТУРБИНЫ С ОХЛАЖДАЕМЫМИ ЛОПАТКАМИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2015 Л. А. Магеррамова, А. Н. Стадников

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Традиционный подход к конструированию рабочих колёс турбин, основанный на применении замковых соединений лопаток с диском, не позволяет совершенствовать конструкции в направлении увеличения долговечности, уменьшения массы колеса и в целом увеличения эффективности. Эта проблема может быть решена использованием разнородных материалов в интегральной конструкции колеса в виде биметаллического блиска. Для исследования прочностной надёжности рабочего колеса высокотемпературной турбины, образованного соединением полых лопаток с дисковой частью с помощью методов гранульной металлургии, разработаны и изготовлены образцы-имитаторы, включающие диффузионное соединение охлаждаемой лопатки турбины высокого давления из монокристаллического сплава с элементом дисковой части из жаропрочного никелевого гранулируемого сплава. Разработана капсульная оснастка для изготовления образцов-имитаторов, обеспечивающая герметичность зоны соединения элементов моноколеса и сохранение каналов охлаждения в лопатках в процессе горячего изостатического прессования. Проведены исследования макро- и микроструктуры зон соединения элементов конструкции. Проведены предварительные испытания образцов-имитаторов на многоцикловую усталость, в результате которых установлено, что трещины усталости зарождались в материале лопатки, а зона диффузионного соединения двух сплавов в условиях испытаний оказалась прочнее материала лопатки.

*Биметаллические моноколеса, блиски, охлаждаемые лопатки турбины, газотурбинные двигатели, экспериментальные исследования.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-114-121

### Введение

Создание конкурентоспособных перспективных газотурбинных двигателей возможно только при обеспечении выполнения высоких (и постоянно возрастающих) требований к безопасности эксплуатации, экологической безопасности и экономической эффективности. Это приводит к необходимости применять новые материалы, искать новые конструктивные решения, использовать новые технологии.

Традиционные методы изготовления ограничивают возможности получения сложных ответственных деталей двигателей. В настоящее время широко применяются методы порошковой (гранульной) металлургии. Горячее изостатическое прессование (ГИП) порошковых материалов – процесс высокотемпературного уплотнения пористых заготовок и изготовления деталей из порошков металлов под действием высокого внешнего давления (компактирование) – позволяет получать

детали сложной конфигурации ответственного назначения. Горячим изостатическим прессованием изготавливают такие детали как крыльчатки, диффузоры, диски турбин и компрессоров и т. п.

Методы ГИП могут быть применены к изготовлению рабочего колеса турбины, представляющего собой неразъёмное соединение монокристаллических лопаток и дисковой части из жаропрочного гранулируемого никелевого сплава (биметаллических блисков). Такая конструкция, благодаря отсутствию традиционных замковых соединений, являющихся концентраторами напряжений, позволяет уменьшить массу колеса и повысить его долговечность [1].

### Конструктивно-технологическое решение

Для изготовления рабочего биметаллического моноколеса высокотемпературной турбины разработано конструктивно-

технологическое решение [2], основанное на соединении методом ГИП неохлаждаемых монокристаллических лопаток и

дисковой части из гранулируемого сплава (рис. 1).



Рис.1. Биметаллический блиск с неохлаждаемыми лопатками из ЖС32 <001> и дисковой частью из ЭП741НП

Для получения биметаллического моноколеса с охлаждаемыми лопатками должны быть осуществлены мероприятия, препятствующие закрытию полостей охлаждаемых лопаток во время действия высокого давления и температуры в процессе ГИП. Одно из основных требований, необходимых для изготовления биметаллических образцов-имитаторов и биметаллических моноколёс с охлаждаемыми лопатками – разработка технологии, обеспечивающей герметичность сборной капсулы в условиях технологического процесса ГИП. Отработка технологии герметичного паяного соединения элементов, изготовленных из лопаточного сплава и сплава капсулы, проведена на специальных образцах с контролем качества паяного шва.

Разработано технологическое решение [3] для изготовления рабочего биметаллического моноколеса соединением заранее изготовленных охлаждаемых лопаток с дисковой частью методом горячего изостатического прессования. Для этого спроектирована оснастка, позволяющая вывести лопатки из капсулы, в которой происходит их диффузионное соединение с дисковой частью, для возможности сохранения полостей охлаждаемых лопаток [4].

Для отработки технологического процесса изготовления биметаллического моноколеса с охлаждаемыми лопатками

разработана конструкция биметаллического образца-имитатора соединения полых монокристаллических лопаток из сплава ЖС32<001> с элементом дисковой части из жаропрочного гранулируемого сплава на никелевой основе ЭП741НП, применяемого для дисков ТВД (рис. 2).

Образец-имитатор состоит из полый лопатки 1, имеющей удлинительную ножку четырехугольного поперечного сечения для впаивания в технологическую пластину, которая является частью конструкции капсульной оснастки, и имитатора дисковой части (фрагмента сектора ободной части диска, включающего одну лопатку) 2. В конструкции ножки, помещаемой в технологическую пластину, отсутствуют полости для охлаждения. Отверстие для подачи воздуха в лопатку находится в ножке выше зоны соединения лопатки с дисковой частью.

Процесс изготовления образца-имитатора включает операции отливки лопаток; обработки хвостовиков под соединение с дисковой частью; пайки лопаток с технологическими пластинами из Ст.20, которые являются частью капсулы; изготовления деталей капсулы и сборки их с технологической пластиной и элементами дисковой части; процессы подготовки и проведения операций газостатирования, последующей термической обработки; удаления капсулы и окончательной механической обработки.

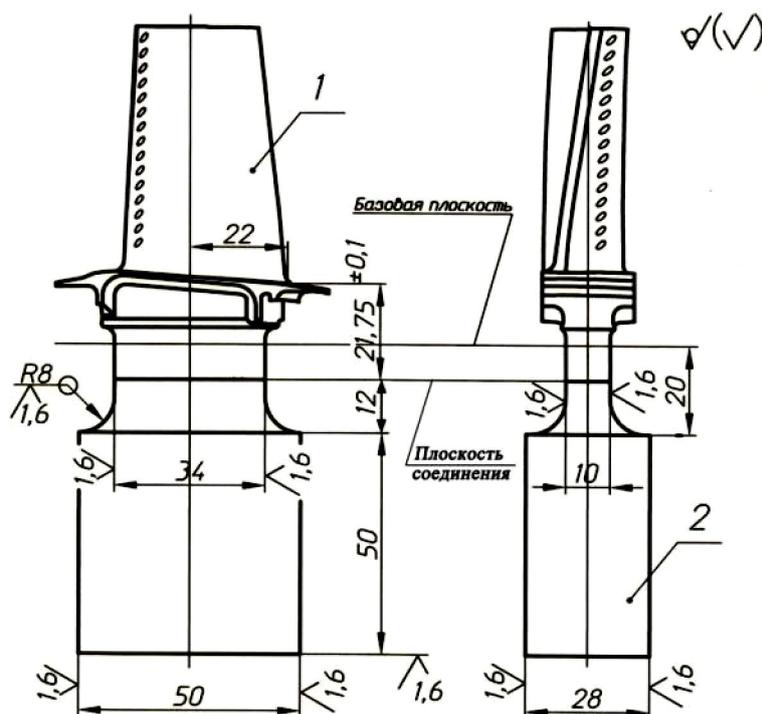


Рис. 2. Чертёж образца-имитатора биметаллического моноколеса  
1 – натурная лопатка; 2 – имитатор дисковой части

Паяные швы соединения разнородных материалов (монокристаллических лопаток и стальной пластины) должны оставаться работоспособными при температурах  $\sim 1200-1270^{\circ}\text{C}$  и давлении до 1500 атм. в среде аргона и обладать вакуумной плотностью, что означает отсутствие сквозных несплошностей (таких дефек-

тов, как газовая или усадочная пористость, непропаи и трещины).

На основе разработанной технологии соединения пайкой монокристаллических лопаток с элементами стальной оснастки [4] и последующих операций изготовлены образцы-имитаторы (рис. 3).

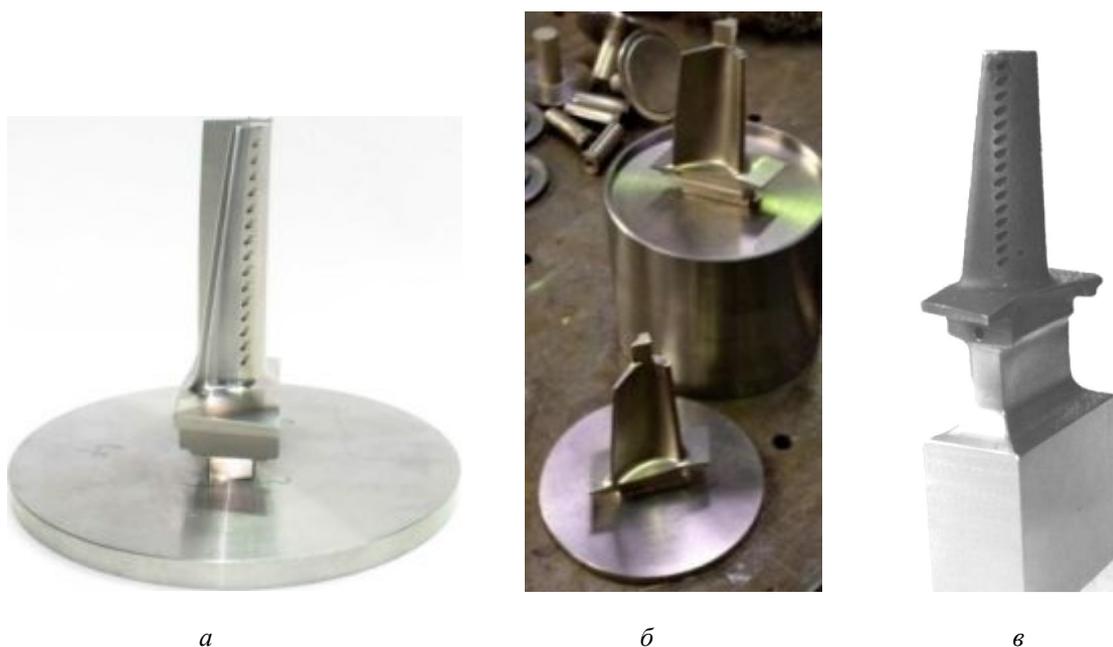


Рис.3. Лопатка, впаянная в технологическую пластину (а), сборка капсул (б), образец-имитатор (в)

### Исследование макро- и микроструктуры образцов-имитаторов

Исследования макро- и микроструктуры паяных соединений охлаждаемых лопаток с технологическими пластинами из стали и соединений лопаток с дисковым материалом, получаемых в процессе изготовления образцов-имитаторов (рис. 4), проведены в заводской лаборатории АО «НПЦ Газотурбостроения «Салют».

Специалистами этого предприятия установлено, что по всей длине паяного соединения монокристаллического сплава со сталью имеется равномерное затекание припоя по всей длине швов, дефектов в виде непропаев и трещин нет, ширина паяных швов 0.1 мм. Всё это обеспечивает герметичность капсулы в процессе ГИП.

Анализ зоны соединения лопаток с дисковой частью (рис. 5) выявил наличие диффузионного взаимодействия соединяемых материалов.

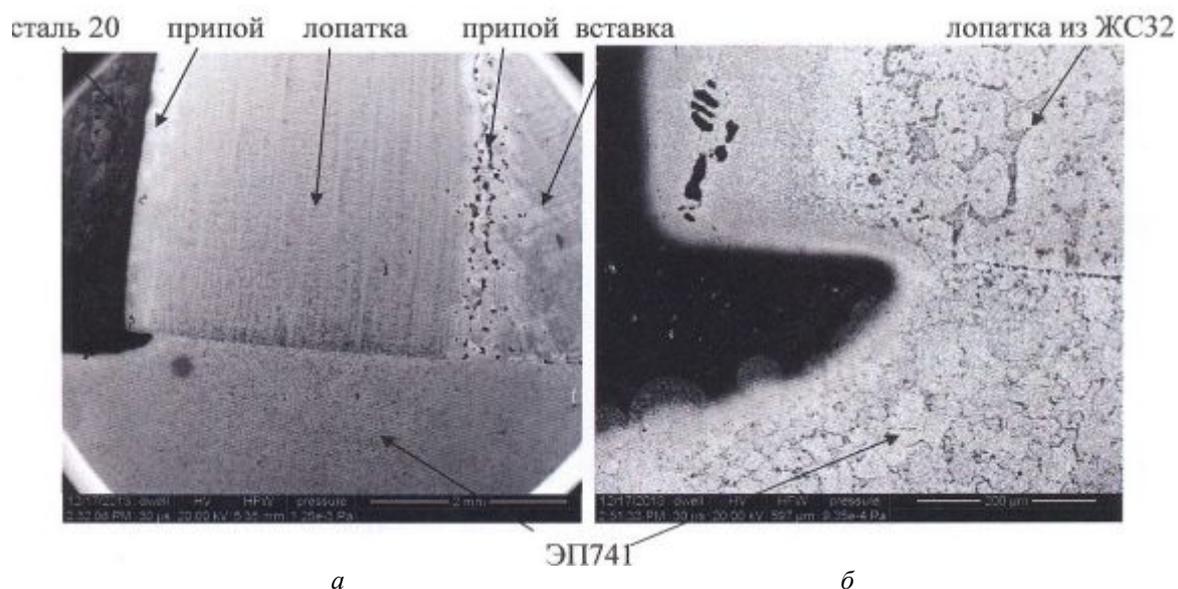


Рис. 4. Биметаллический образец-имитатор моноколеса турбины с охлаждаемыми лопатками (а) и микроструктура паяного соединения лопатки с технологической пластиной с дисковой частью после ГИП (б)



Рис.5. Структура в зоне диффузионного соединения монокристаллического и гранулируемого сплавов

Исследования макро- и микроструктуры изготовленных образцов-имитаторов показали, что:

- микроструктура материала лопатки не имеет признаков перегрева;
- микроструктура диска – удовлетворительная;
- диффузионное соединение лопатки с дисковым сплавом – плотное, поры и несплошности отсутствуют.

### Испытания образцов-имитаторов

Одной из задач при создании биметаллических моноколёс турбин является обеспечение их прочности при вибрационных нагрузках.

Для предварительных исследований вибрационной прочности зоны соединения монокристаллических лопаток с дисковой частью использованы разработанные биметаллические образцы-имитаторы (рис. 2). Фиксирование объекта в оснастке на испытательном стенде осуществлялось по элементу дисковой части образца-имитатора (рис. 6).

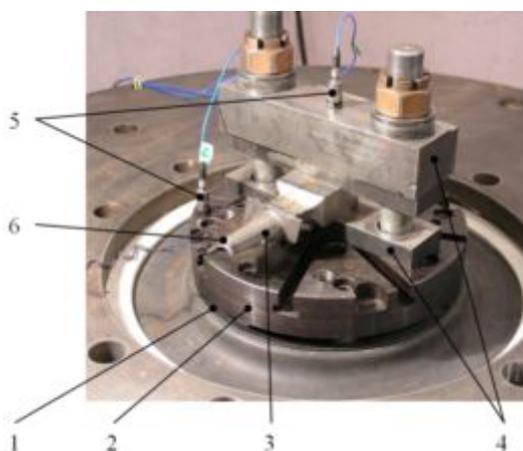


Рис. 6. Приспособление в сборе для холодных испытаний

- 1 – подвижной стол вибростенда; 2 – переходник;  
3 – образец-имитатор; 4 – приспособление;  
5 – акселерометры; 6 – проекция лазерного луча

В качестве испытательного стенда для возбуждения колебаний использован вибрационный электродинамический стенд (вибростенд). В качестве средств измерений использовались вибродатчики (акселерометры), которые устанавливались на приспособлении на подвижном

столе вибростенда, а также лазерный виброметр, позволяющий измерять размах перемещений при колебаниях выбранной точки на поверхности образца-имитатора в любом направлении.

В результате анализа конструкции образца-имитатора были определены зоны для препарирования тензорезисторами (рис. 7).

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) образцов - имитаторов проводились при резонансных колебаниях по основному тону при нормальной температуре (частота  $f=1440$  Гц) и при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  ( $f=1280$  Гц), которая соответствует типовой рабочей температуре в зоне соединения лопаток с дисковой частью рабочего колеса высокотемпературной турбины в условиях эксплуатации. База испытаний составляла  $N_0 = 2 \cdot 10^7$  циклов.

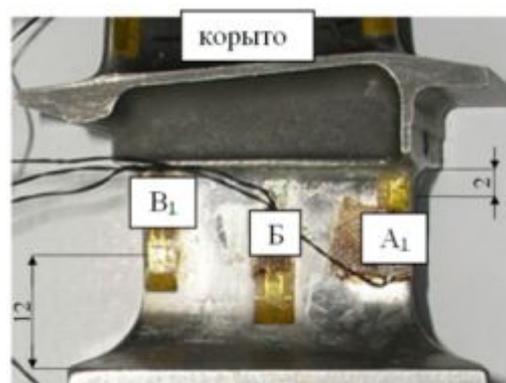
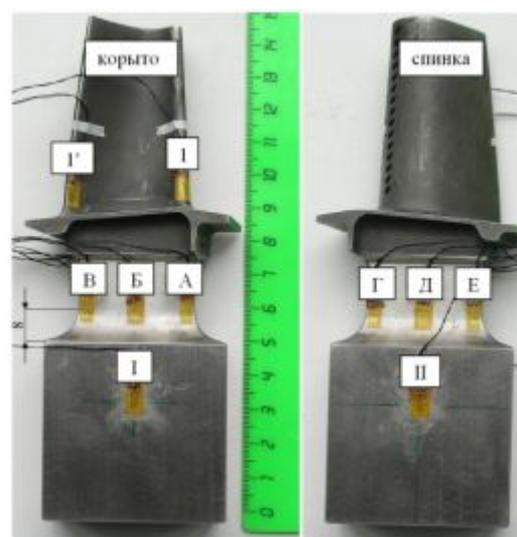


Рис. 7. Схема размещения тензорезисторов на образцах-имитаторах

Контроль уровня нагружения образца при «холодных» испытаниях осуществлялся по сигналам, снимаемым с работоспособных тензорезисторов, или по величине размаха перемещений при колебаниях выбранной точки на поверхности образца. Контроль уровня нагружения образца при «горячих» испытаниях осуществлялся по величине размаха перемещений при колебаниях выбранной точки на поверхности образца, рассчитанного с учётом модуля упругости материала образца-имитатора для заданной температуры. За критерий разрушения образца (образования усталостной трещины) принято падение резонансной частоты колебаний на величину  $\Delta f \approx 3\%$  ( $\sim 40$  Гц). После испытаний образцы были подвергнуты контролю состояния поверхности с целью выявления усталостных трещин визуальным методом и с помощью оптического микроскопа.

Результаты испытаний показали следующее. Максимальные деформации ( $\varepsilon_{\max}$ ) при испытаниях с нормальной температурой в образцах-имитаторах были измерены на поверхности в зоне перехода ножки в трактовую полку лопатки (зона №1, тензорезистор А1). При этом в зоне перехода призмы-заделки в ножку (зона № 2, тензорезисторы А ... Е) и в зоне диффузионного соединения ножек призмы-заделки и лопатки (зона № 3, тензорезистор В1) деформации составляли  $0.67 \dots 0.74 \varepsilon_{\max}$ . С учётом значений модулей упругости соединённых материалов

напряжения в зонах №1 и 3 были примерно одинаковы.

При нормальной температуре и максимальных напряжениях  $\sigma_{\max} = 18$  кгс/мм<sup>2</sup> в ножке образца-имитатора (а именно, в зонах перехода заделки в ножку, соединения элемента дисковой части с лопаткой и перехода ножки в трактовую полку лопатки) образец прошёл базу испытаний  $N = 2.0 \cdot 10^7$  циклов без разрушения. Таким образом, соединение элемента дисковой части и лопатки этот режим нагружения выдержало.

При  $\sigma_{\max} = 21$  кгс/мм<sup>2</sup> образец разрушился по переходу ножки в трактовую полку лопатки. Следовательно, зона соединения элемента дисковой части и лопатки как минимум «не слабее» зоны перехода ножки в трактовую полку лопатки.

При температуре  $700^\circ\text{C}$  и  $\sigma_{\max} = 21$  кгс/мм<sup>2</sup> образец прошёл базу испытаний  $N = 2.0 \cdot 10^7$  циклов без разрушения. Таким образом, соединение элемента дисковой части и лопатки этот режим нагружения выдержало.

При  $\sigma_{\max} = 24$  кгс/мм<sup>2</sup> образец разрушился по прикорневому сечению пера лопатки. Замеренные напряжения в этой зоне составляли  $17$  кгс/мм<sup>2</sup>. Можно считать, что зона соединения элемента дисковой части и лопатки как минимум «не слабее» опасной зоны в пере лопатки.

На рис. 8 приведены фотографии зон образования усталостных трещин в образцах-имитаторах при «холодных» (слева) и «горячих» испытаниях.

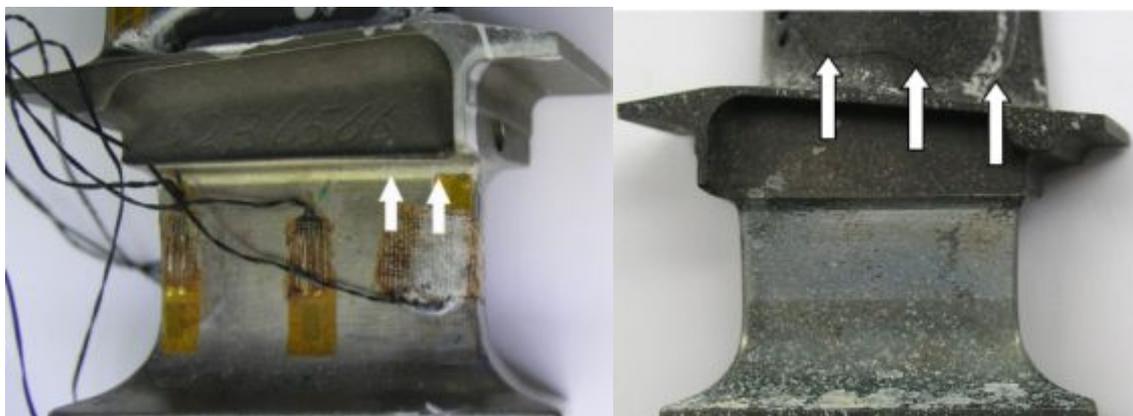


Рис. 8. Фрагмент биметаллического образца-имитатора с трещиной после «холодных» (слева) и «горячих» испытаний (трещины показаны белыми стрелками)

### Заключение

С целью обеспечения создания биметаллических блисков высокотемпературных турбин из современных материалов разработаны конструкция и технологический процесс изготовления неразъёмного соединения охлаждаемых монокристаллических лопаток с дисковой частью из гранулируемого сплава.

Изготовлена партия образцов-имитаторов биметаллического моноколеса с охлаждаемыми лопатками. Исследования микроструктуры паяных швов элементов технологической оснастки с охлаждаемыми лопатками, предназначенных для обеспечения изготовления биметаллических блисков разработанным методом, и зоны ГИП соединения лопаточного и дискового сплавов показали удовлетворительное состояние структур, отсутствие дефектов в виде пор и несплошностей.

Результаты испытаний на многоцикловую усталость образцов-имитаторов при температурах 20 и 700°C показали, что трещины усталости зарождались в материале лопатки, а зона диффузионного соединения двух сплавов в условиях испытаний обладала более высокой прочностью, чем материал лопатки.

Эти исследования подтверждают перспективность проведения работ по созданию биметаллических блисков высокотемпературных турбин газотурбинных двигателей.

Авторы благодарят сотрудников ФГУП «НПЦ Газотурбостроения «СА-ЛЮТ» Быкова Ю.Г., Бакулина С.С., Ларшина А.А. за изготовление образцов-имитаторов и Каменеву М.Н., Коломенскую Н.И. за проведение макро- и микроструктурного анализа образцов.

### Библиографический список

1. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулированных и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надёжности и ресурса газовых турбин // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, №4(44). С. 33-38.

2. Магеррамова Л.А., Кратт Е.П., Ясинский В.В. Способ изготовления интегрального блиска с неохлаждаемыми рабочими лопатками для газотурбинного двигателя и интегральный блиск: патент РФ №2457177; опубл. 2012; бюл. № 32.

3. Магеррамова Л.А., Кратт Е.П., Ясинский В.В. Способ изготовления интегрального блиска с охлаждаемыми лопатками, интегральный блиск и охлаждаемая лопатка для газотурбинного двигателя: патент РФ № 2478796; опубл. 20.02.2013; бюл. № 10.

4. Быков Ю.Г., Магеррамова Л.А., Кратт Е.П., Бакулин С.С. Опыт разработки технологии изготовления биметаллического турбинного блиска перспективного газотурбинного двигателя // Наука – производству. 2014. №9. С. 148-156.

### Информация об авторах

**Магеррамова Любовь Александровна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник сектора отделения «Динамика и прочность авиационных двигателей», Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [lamagerramova@mail.ru](mailto:lamagerramova@mail.ru). Область научных интересов: анализ прочности деталей и узлов авиационных двигателей, методы изготовления деталей авиационных двига-

телей, включая горячее изостатическое прессование и аддитивные технологии.

**Стадников Александр Николаевич**, ведущий конструктор отделения «Динамика и прочность авиационных двигателей», Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [ustalost@rtc.ciam.ru](mailto:ustalost@rtc.ciam.ru). Область научных интересов: экспериментальные исследования усталостных характеристик лопаток газотурбинных двигателей.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF PROTOTYPE MODELS OF BIMETALLIC BLISKS OF A HIGH-TEMPERATURE TURBINE WITH COOLED BLADES FOR ADVANCED GAS TURBINE ENGINES

© 2015 L. A. Magerramova, A. N. Stadnikov

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The traditional approach to designing turbine blisks based on the application of disk-blade pawl-coupling does not allow improving the design from the point of view of increasing the service life, reducing the wheel mass and improving the engine efficiency on the whole. This problem can be solved by using dissimilar materials in the integrated bimetallic wheel (blisk). Bimetallic blisk prototype models of a high-temperature turbine have been produced for strength durability research. The bimetallic blisk prototype model consists of one monocrystal cooled blade and a granulated Ni-based disk part. These elements are connected by the hot isostatic pressing (HIP) method. Capsular equipment is designed for producing the prototypes. It ensures the air tightness of the zone of joining of the blisk elements and preservation of the cooling lines in the blades during the HIP process. Investigations of micro- and macrostructures of prototype joining zones have been carried out. High-cycle fatigue tests of bimetallic blisk prototype models have been carried out. It has been found that fatigue cracks originate in the blade material, whereas the zone of diffusion bonding of the two alloys in test conditions proved to be stronger than the blade material.

*Bimetallic blisk, cooled blades, gas-turbine engines, experimental investigations.*

### References

1. Magerramova L.A. Application of bimetallic blisks manufactured by HIP from powder and cast Ni-based superalloys for gas turbine life increase. *Vestnik UGATU*. 2011. V. 15, no. 4(44). P. 33-38. (In Russ.)
2. Magerramova L.A., Kratt E.P., Yasinskiy V.V. *Sposob izgotovleniya integralnogo bliska s neokhlazhdayemyimi rabochimi lopatkami dlya gazoturbinnogo dvigatelya i integralnyu blisk* [Method of integral bladed disc with uncooled blades for gas turbine engine and integral bladed disc]. Patent RF, no 2457177, 2012. (Publ. 2012, bull. no. 32.)
3. Magerramova L.A., Kratt E.P., Yasinskiy V.V. *Sposob izgotovleniya integralnogo bliska s okhlazhdayemyimi lopatkami, integralnyu blisk i okhlazhdayemaya lopatka dlya gazoturbinnogo dvigatelya* [Procedure of manufacturing an integrated blisk with cooled blades, integrated blisk and cooled blades for aircraft engines]. Patent RF, no. 2478796, 2013. (Publ. 20.02.2013, bull. no. 10.)
4. Bykov Yu.G., Magerramova L.A., Kratt E.P., Bakulin S.S. Experience in developing a technology of designing a bimetallic turbine blisk of an advanced gas turbine engine. *Nauka – proizvodstvu*. 2014. No. 9. P. 148-156. (In Russ.)

### About the authors

**Magerramova Liubov Alexandrovna**, Doctor of Science (Engineering), Senior Researcher, Head of Sector, the Department of Dynamics and Strength of Aviation Engines, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Moscow, Russian Federation. E-mail: [lamagerramova@mail.ru](mailto:lamagerramova@mail.ru). Area of Research: strength analysis of parts and assemblies of aircraft engines, methods of aircraft engine parts manufacturing includ-

ing hot isostatic pressing and additive technologies.

**Stadnikov Alexander Nikolaevich**, Project Design Leader, the Department of Dynamics and Strength of Aviation Engines, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Moscow, Russian Federation. E-mail: [ustalost@rtc.ciam.ru](mailto:ustalost@rtc.ciam.ru). Area of Research: experimental study of fatigue characteristics of gas turbine engine blades.