

А. О. КРАСНИКОВ, Ю. И. ТОРБА, А. Е. ЗАНИН, Р. Р. КЛИМИК

ГП-«Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ПРОВЕРКА ИЗНОСОСТОЙКИХ И ПРИРАБАТЫВАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Приведены некоторые результаты работ по созданию и доводке (доработке) установки по врезанию, для проверки различных систем покрытий (износостойких, прирабатываемых и т.п.), компрессорных или турбинных. Изложены проблемы при создании установки и критерии, которые было необходимо учесть при доработке и модернизации установки. Приведены некоторые расчеты для определения режимов работы, установки, которые должны обеспечивать возможность моделировать (имитировать) работу покрытия турбинных и компрессорных, на различных типах двигателей как современных, так и создаваемых в будущем двигателей. Установка должна обеспечивать широкий диапазон температур и скоростей врезания и т.д., конструкция деталей установки должна быть технологичной и обеспечивать возможность наносить на имитатор лопатки и проставки различные системы покрытий. Предложенный метод испытаний покрытий на врезание позволит сократить затраты по проверке вновь разрабатываемых покрытий, а также сократить сроки по проверке вновь разрабатываемых покрытий. При первоначально проведенных испытаниях установки (после проектирования и изготовления) требования технического задания были не обеспечены. С целью обеспечения требований технического задания проведены работы по модернизации установки, а именно, для получения необходимых требований, по нашему мнению, необходимо было уменьшить массу и сопротивление воздушной среде имитатора рабочей лопатки. Снизить массу удалось за счет применения замкового соединения «ласточки хвост», взамен болтового соединения, а также применения профиля пера, приближенному к реальной рабочей лопатке, по результатам проведенного анализа было принято решение использовать рабочие лопатки компрессора реальных двигателей, из различных материалов ЭП 718-ИД и ВТ-8 в качестве имитаторов рабочих лопаток, для проверки турбинных покрытий, будет разработан имитатор из жаропрочного никелевого сплава. Для применения новых имитаторов рабочих лопаток были проведены работы по доработке имеющегося имитатора диска, для чего выполнено отработка технологии получения замков «типа ласточкин хвост» фрезерованием. Выполнена доработка имитатора диска фрезерованием пазов типа «ласточкин хвост».

Ключевые слова: износостойкое покрытие; прирабатываемое покрытие; износ; выработка; радиальный зазор; проверка покрытий.

Введение

Одними из основных параметров двигателя, влияющими на его КПД и запасы газодинамической устойчивости, являются радиальные зазоры между безбандажными рабочими лопатками турбины компрессора и статорными деталями (надроторными вставками). Для оптимизации радиального зазора на всех режимах работы двигателя применяются системы активного регулирования радиального зазора или различные типы прирабатываемых покрытий (ПП), сотовых уплотнений и т.п., которые обеспечивают оптимальный зазор за счет местной выработки покрытия или сот статорных узлов, и не допускающие износа рабочих лопаток. Таким образом, применение на надроторных вставок с ПП и износостойких покрытий для ротора, допускающих местное врезание ротора в статор без износа торцев рабочих лопаток, позволяет уменьшить величину радиального зазора и значительно увеличить КПД

ступени.

По имеющимся данным для ступеней с безбандажными рабочими лопатками при уменьшении радиального зазора на 1 % от длины лопаток КПД ступени увеличивается на 1,6...2,5 %. Так же радиальные зазоры имеют большое влияние на газодинамическую устойчивость двигателя согласно проведенным исследованиям на двигателе АИ-20 ГП «Ивченко-Прогресс», при увеличении радиального зазора между рабочими лопатками КВД и рабочими кольцами на 1% от длины лопатки (0,75 мм) двигатель на взлетном режиме выходил в помпаж. При том, что до этого не было отмечено ни одного случая помпажа на двигателе АИ-20.

До принятия решения о проведении испытания покрытия на двигателе необходимо выполнить большой объем проверок (адгезия, термоциклирование и т.д.). Т.к. испытание покрытия на двигателе требует значительных затрат (топливо, сборка двигателя и т.д.), и при этом на испытаниях могут воз-

никнуть дефекты из-за неэффективного прирабатываемого покрытия (износ рабочих лопаток, разрушение рабочих лопаток или выветривание покрытия). Для снижения рисков и затрат, связанных с испытанием покрытий на двигателе, необходимо выполнить испытание покрытия на врезание в условиях, максимально приближенным к реальным на двигателе. Для чего были проведены работы по созданию установки для проверки требуемых характеристик прирабатываемых и/или износостойких турбинных, компрессорных покрытий.

Наличие ПП на надроторных вставках корпусов (проставках), рабочих кольцах должно обеспечивать в случае врезания местную выработку ПП, которое незначительно увеличивает суммарную площадь радиального зазора. При отсутствии ПП или применении ПП, не соответствующих требуемым критериям, на надроторных вставках корпусов или других деталях при врезании происходит износ торцев всех рабочих лопаток (практически на величину врезания), при этом отмечено, что величина износа рабочих лопаток гораздо больше, чем статорных деталей, и в этом случае суммарная площадь радиального зазора увеличивается на величину врезания (рис. 1).

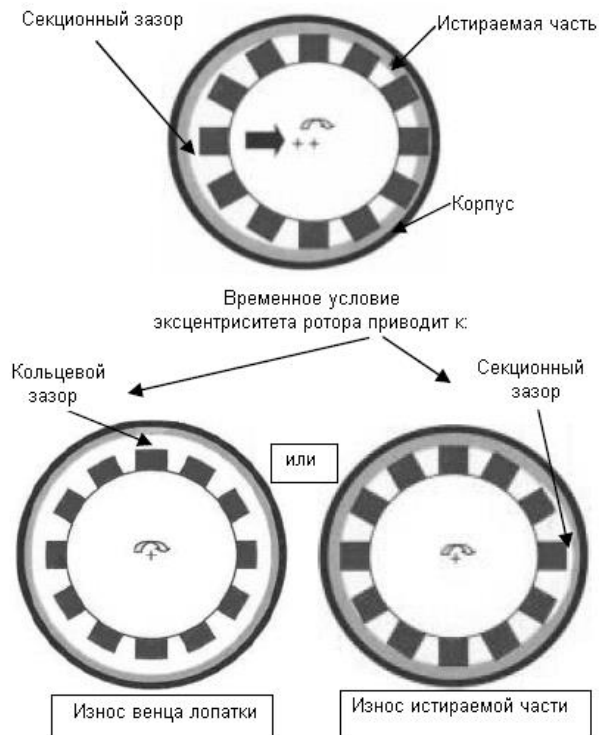


Рис. 1. Виды износа

Разработанная и изготовленная на ГП «Ивченко-Прогресс» установка обеспечила требования технического задания не в полном объеме. С целью обеспечения требований ТЗ была

проведена работа по модернизации изготовленной установки. При модернизации учитывалось, что основные узлы (диск, привод диска и т.п.) изготовленной установки необходимо сохранить, из-за высокой стоимости комплектующих и заготовок, а модернизацию необходимо было провести с наименьшими затратами.

1. Результаты изготовления установки до модернизации

Внешний вид изготовленной установки по проверке прирабатываемых и износостойких покрытий представлен на рис. 2.

Для проверки параметров изготовленной установки на соответствие требованиям технического задания были выполнены пробные запуски до максимально возможных оборотов (раскрутка диска с имитатором лопатки и прогрев имитатора проставки с ПП) без врезания.

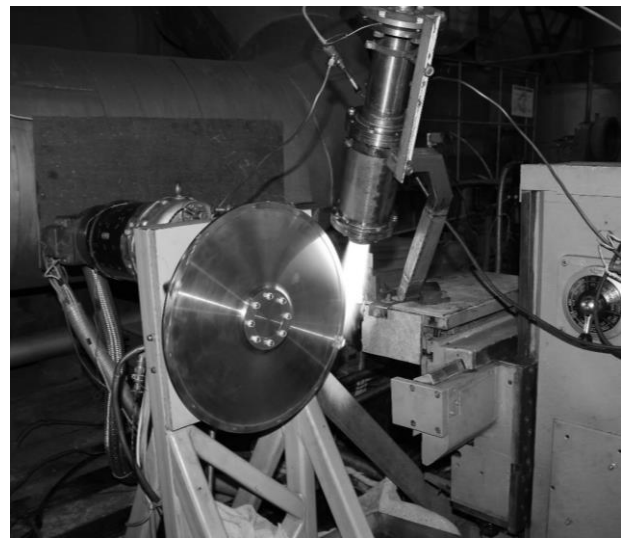


Рис. 2. Внешний вид установки

После проведения испытаний был произведен расчет на прочность, в котором установлено, что диск не имеет достаточных запасов по прочности, из-за высокой массы имитатора рабочей лопатки и его крепежа. После чего были выполнены работы по оптимизации (снижению массы) имитатора рабочей лопатки, после чего произвели повторный расчет с оптимизированным имитатором рабочей лопатки, по результату этого расчета диск имел достаточные запасы по прочности при оборотах всего лишь 13000 об/мин, вместо необходимых 16000 об/мин, результаты расчетов представлены на рис. 3.

Имитаторы были доработаны. Внешний вид имитаторов рабочих лопаток до и после доработки представлен на рис. 4

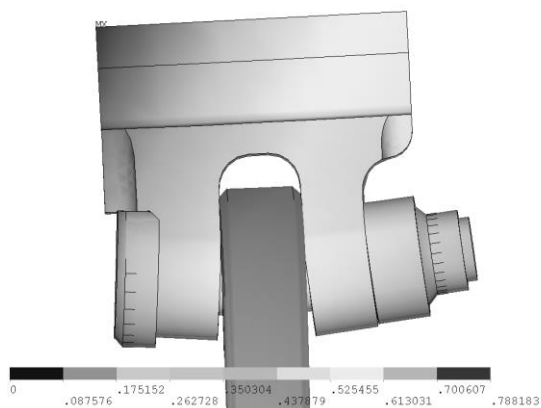


Рис. 3. Результаты расчетов на прочность при 13000 об/мин

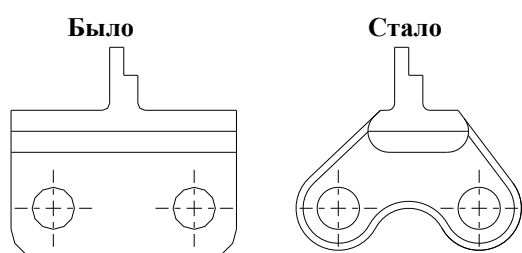


Рис. 4. Имитатор рабочей лопатки до и после доработки

После доработки имитаторов рабочих лопаток, их масса была снижена с 60 до 30 грамм. После чего выполнены повторные запуски установки до максимально возможных оборотов без врезания, удалось выйти на обороты 13000 об/мин, что соответствует линейной скорости 350 м/с, при требуемых в ТЗ 500 м/с. Снимаемая мощность электродвигателя при этом 16,8 кВт.

По результатам расчетов на прочность, при оборотах 16 000 об/мин, запасов по имитатору диска недостаточно. Так же при проведении эксперимента, пытаясь вывести установку с имеющейся материальной частью на максимально возможные обороты, при увеличении нагрузки электродвигателя, разгон (раскрутка) диска происходила непропорционально увеличению нагрузки, и отмечались повышенные вибрации, что не позволило вывести установку на обороты 16 000 об/мин.

2. Разработка концепции для модернизации установки и ее модернизация

Ввиду того что, разработанная и изготовленная на ГП «Ивченко-Прогресс» установка обеспечила требования технического задания не в полном объеме. Для обеспечения необходимых параметров,

и при этом рационального использования средств предприятия, принято решение об использовании в установке лопаток, применяемых на компрессоре высокого давления современных двигателей разработки ГП «Ивченко-Прогресс», что не требовало дополнительных затрат, т.к. для испытаний и дальнейших работ возможно будут применять забракованные лопатки после длительной эксплуатации. А также учитывалось и то, что при получении положительных результатов, имитаторы рабочих лопаток для проверки турбинных покрытий будут изготовлены из жаропрочных никелевых сплавов.

Внешний вид имитаторов рабочей лопатки изготовленных для установки в сравнении с лопаткой КВД двигателя разработки ГП «Ивченко-Прогресс», представлен на рисунке 5.

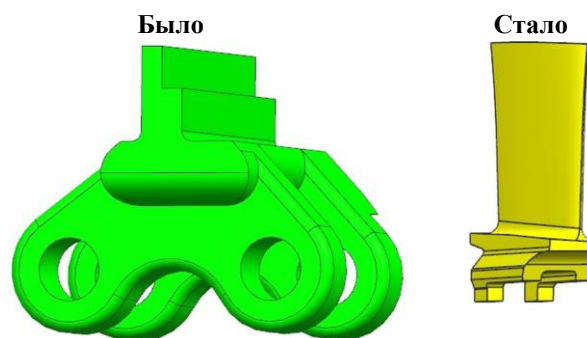


Рис. 5. Имитатор рабочей лопатки и лопатка КВД 7 ступени Д-18Т

Так же применение «профилированной» лопатки могло снизить ее сопротивление воздушной среде.

Результаты проведенных расчетов на прочность представлены на рис. 6 и рис. 7.

Как видно по результатам расчетов, что при применении имитатора лопатки до модернизации (с креплением болтами) напряжения в диске было до 200 кг/мм².

Применение лопатки КВД двигателя разработки ГП «Ивченко-Прогресс» позволило снизить массу имитатора лопатки с 30 до 8 грамм, и отказаться от болтового крепежа имитатора рабочей лопатки к диску, взамен этого фиксация имитатора лопатки была выполнена при помощи замка, применяемого для фиксации лопаток КВД на двигателе Д-18Т. Так же применения лопатки КВД двигателя Д-18Т позволило приблизить проведение эксперимента к реальным условиям.

По результатам расчетов на прочность установлено, что установка лопатки КВД двигателя Д-18Т в имитатор диска, позволило снизить напряжения до 3х раз, и составили около 60 кг/мм².

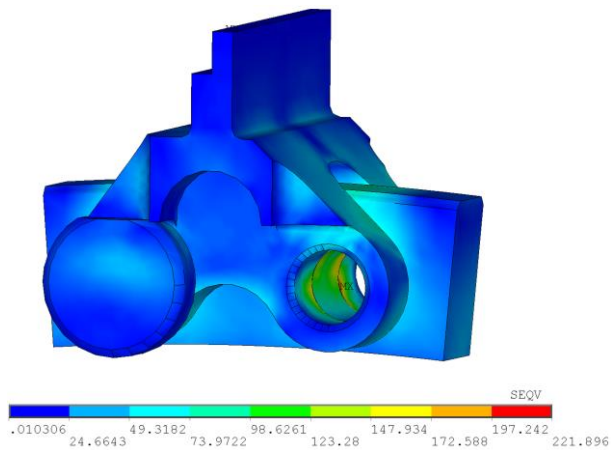


Рис. 6. Напряженное состояние имитатора диска с имитатором лопатки при 16000 об/мин

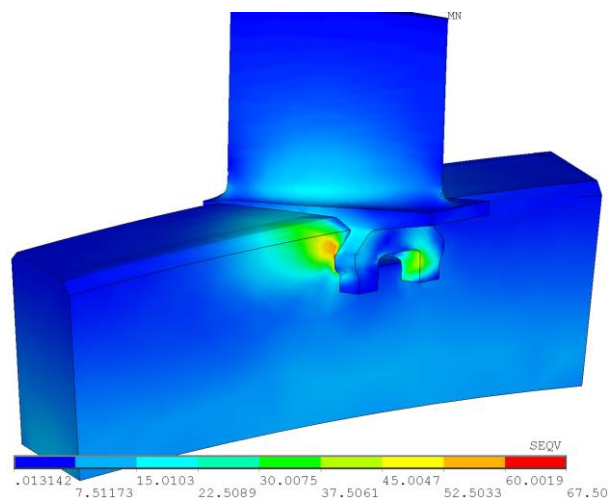


Рис. 7. Напряженное состояние имитатора диска с лопаткой КВД Д-18Т при 16000 об/мин

Для применения лопатки КВД двигателя Д-18Т или Д-36 требовалась доработка имеющегося имитатора диска, для этого необходимо выполнить в нем нарезку пазов типа «ласточкин хвост». При серийном изготовлении пазов типа «ласточкин хвост» на нашем предприятии применяются технологический инструмент протяжки, однако для проведения единичных работ изготавливать протяжки было не рационально, принято решение выполнить отработку технологии нарезки пазов фрезерованием. Для чего были запроектированы и изготовлены специальные инструменты (фрезы), в образцах нарезаны пазы, проведен их контроль.

Результаты контроля представлены на рис. 8.

После отработки технологии нарезки пазов на образцах и их контролю, проведена доработка имитатора диска.

Также для снижения газодинамических потерь был запроектирован защитный кожух, в котором происходило вращение имитатора диска с лопаткой.

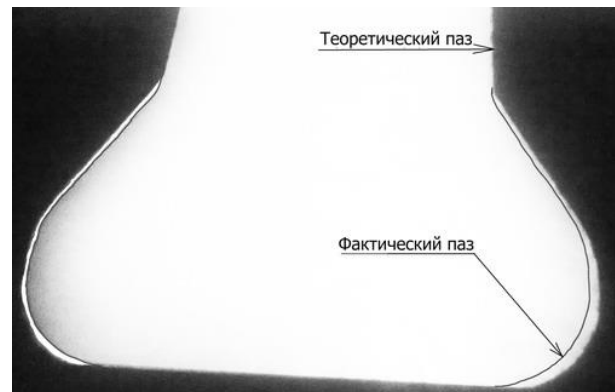


Рис. 8. Наложение профиля паза на теоретический профиль

Для обеспечения нагрева имитатора лопатки и ПП выбрана и реализована система подогрева продуктами сгорания одногорелочного отсека камеры сгорания с факельным воспламенителем. Благодаря применению факельного пускового воспламенителя получен стабильный розжиг отсека камеры сгорания на всех исследуемых технологических режимах работы. Так же за счет работы воспламенителя на «критических» режимах реализовано поддержание горения в отсеке камеры сгорания. При опробовании работы без каких либо доработок получена стабильная температура на выходе из отсека с $t_{\text{г}} \leq 1300^{\circ}\text{C}$. Разработаны и реализуются мероприятия по расширению температурного диапазона до 1700°C .

Также изначально регулировка температуры на объекте исследования осуществлялась только за счет изменения режимных параметров работы камеры сгорания. Для надежности и удобства постановки эксперимента регулировка температуры модернизирована. Дополнительно реализовано расширенное механическое изменение пространственного положения отсека камеры сгорания. За счет этого получена возможность изменения температуры исследуемого объекта на одном стационарном режиме работы камеры сгорания. Комбинация режимной и механической регулировки температуры позволяет сократить технологическое время подготовки и проведения эксперимента.

Внешний вид установки до доработки показан на рисунке 9.

Внешний вид установки после модернизации показан на рисунке 10.

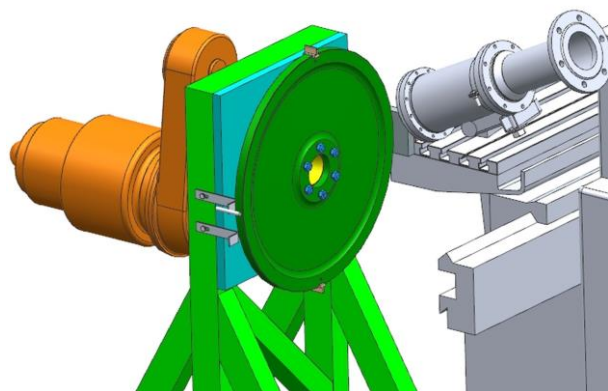


Рис. 9. Вид установки до модернизации

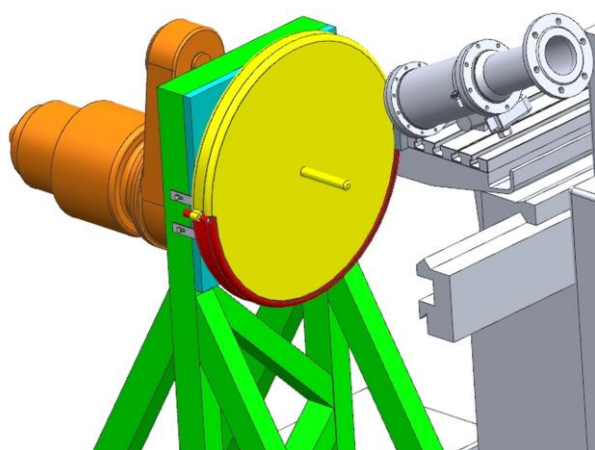


Рис. 10. Вид установки после модернизации

3. Проверка установки после модернизации

Выполнен подбор лопаток двигателя Д-18Т 7 ступени КВД из материала ЭП718, лопатки установлены в имитатор диска. Диск отбалансирован. После чего имитатор диска с лопатками был смонтирован на установку.

Для проверки параметров вновь изготовленной установки на соответствие требованиям технического задания были выполнены пробные запуски до оборотов 16 000 об/мин. (раскрутка диска с имитатором лопатки и прогрев имитатора проставки с ПП) без врезания. Защитный кожух не устанавливался. При этом наблюдалась устойчивая работа установки с минимальным уровнем вибраций. При попытке повышения оборотов до 17 000 об/мин. Наблюдался резкий рост вибраций $K_v=30$ мм/с. Испытания были остановлены. Также при этом было зафиксировано, что необходимая мощность электродвигателя, которую необходимо затратить для

достижения 16 000 об/мин составила $N=16$ кВт.

После установки защитного кожуха, на установку были проведены повторные запуски, до оборотов 16 000 об/мин. (раскрутка диска с имитатором лопатки и прогрев имитатора проставки с ПП) без врезания. При этом наблюдалась устойчивая работа установки с минимальным уровнем вибраций. Также было установлено, что необходимая мощность электродвигателя, которую необходимо затратить для достижения 16 000 об/мин составила $N=9,2$ кВт.

После проведения пробных запусков была выполнена визуальная дефектация деталей установки. Дефектов не обнаружено.

По результатам проверок установлено, что установка обеспечивает требуемые обороты вращения (окружную скорость вращения).

Выводы

После проведения работ, по модернизации установки для проверки прирабатываемых и износостойких покрытий, а именно применение рабочей лопатки КВД двигателя Д-18Т из материала ЭП718-ИД весом 8 грамм получено:

- достаточный уровень запасов прочности имитатора диска и лопатки;
- установка обеспечила требования технического задания по окружной скорости;

Так же применение защитного кожуха позволяет иметь значительную экономию за счет снижения затрат электроэнергии, и повышения ресурса электродвигателя.

Разработаны мероприятия для повышения максимальной температуры покрытия при проведении испытаний с 1100°C до 1700 °C.

Работы по созданию, изготовлению и доводке установки для проверки прирабатываемых и износостойких покрытий, прошли успешно. Установка запущена в эксплуатацию.

Литература

1. Чигрин, В. С. Конструкция и прочность авиационных двигателей [Текст] / В. С Чигрин. – Запорожье ; Харьков : АО "Мотор Сич"; ХАИ, 2017. – 420 с.
2. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: В 3-х т. Учебник для студентов. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства [Текст] / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – Москва : ОАО "Авиадвигатель", 2007. – 396 с.
3. Демьянушко, И. В. - Расчет на прочность вращающихся дисков [Текст] / И. В. Демьянушко,

И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 247 с.

4. Герасименко, В. П. Оптимизация малоразмерных газотурбинных двигателей [Текст] / В. П. Герасименко, М. М. Овчинников, М. Ю. Шелковский // *Вісник НТУ «ХПИ»*. – Николаев, 2014. – № 12 (1055). – С. 25-28.

5. Кравченко, И. Ф. Концепция решения проблемы запуска камеры сгорания при создании и доводке ГТД с низким выбросом вредных веществ [Текст] / И. Ф. Кравченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 7 (23). – С. 40-51.

References

1. Chyhryn, V. S. *Konstrukcija i prochnost' aviacionnyh dvigatelej* [Design and strength of aircraft engines]. Zaporozh'e; Kharkov, Yzd. AO "Motor Sich", KhAY, 2017. 420 p.

2. Inozemtsev, A. A., Nihamkin, M. A., Sandrackij, V. L. *Gazoturbinye dvigateli. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok: V 3-h t. Uchebnik dlja studentov. T. 2. Kom-*

pressory. Kamery sgoranija. Forsazhnye kamery. Turbiny. Vyhodnye ustrojstva [Bases of designing of aircraft engines and power installations: In 3 t. The textbook for students. T. 2. Compressors. Combustion chambers. Atterburners. Turbines. The output equipment]. Moscow, OAO "Aviadvigatel", 2007. 396 p.

3. Dem'janushko, Y. V., Birger, Y. A. *Raschet na prochnost' vrashhajushhihsja diskov* [Strength analysis of twirled disks]. Moscow, Mashynostroenye Publ., 1978. 247 p.

4. Gerasimenko, V. P., Ovchinnikov, M. M., Shelkovskij, M. Yu. *Optimizacija malorazmernih gazoturbinyh dvigatelej* [Optimisation few dimensional gas-turbine engines]. Nykolaev, Bulletin STU «KhPI», 2014, no. 12 (1055), pp. 25-28.

5. Kravchenko, I. F. *Koncepcija reshenija problemy zapuska kamery sgoranija pri sozdanii i dovodke GTD s nizkim vybrosom vrednyh veshhestv* [The concept of the solution of a problem of start of the combustion chamber at creation and operational development GTE with low emission of harmful substances]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2005, no. 7 (23), pp. 40-51.

Поступила в редакцию 12.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ПЕРЕВІРКА ЗНОСОСТІЙКИХ І ПРИРОБЛЯЄМИХ ПОКРИТТІВ

О. О. Красніков, Ю. І. Торба, О. Е. Занін, Р. Р. Клімів

Наведено деякі результати робіт по створенню і доведенню (доопрацюванню) установки по врізанню, для перевірки різних систем покриттів (зносостійких, приробляємих і т.п.), компресорних або турбінних. Викладено проблеми при створенні установки і критерії, які було необхідно врахувати при доопрацюванні і модернізації установки. Наведено деякі розрахунки для визначення режимів роботи, установки, які повинні забезпечувати можливість моделювати (імітувати) роботу покриття турбінних та компресорних, на різних типах двигунів як сучасних, так і створюваних в майбутньому двигунів. Установка повинна забезпечувати широкий діапазон температур і швидкостей врізання і т.д., конструкція деталей установки повинна бути технологічною та забезпечувати можливість наносити на імітатор лопатки і проставки різні системи покриттів. Запропонований метод випробувань покриттів на врізання дозволить скоротити витрати по перевірці розроблених нових покриттів, а також скоротити терміни по перевірці розроблених нових покриттів. При спочатку проведені випробування установки (після проектування і виготовлення) вимоги технічного завдання були не забезпечені. З метою забезпечення вимог технічного завдання проведені роботи з модернізації установки, а саме, для отримання необхідних вимог, на нашу думку, необхідно було зменшити масу і опір повітряному середовищі імітатора робочої лопатки. Знизити масу вдалося за рахунок застосування замкового з'єднання «ластівки хвіст», натомість болтового з'єднання, а також застосування профілю пера, наближеному до реального робочого лопатці, за результатами проведеного аналізу було прийнято рішення використовувати робочі лопатки компресора реальних двигунів, з різних матеріалів ЭП 718-ВД і ВТ 8 в якості імітаторів робочих лопаток, для перевірки турбінних покриттів, буде розроблений імітатор з жароміцного нікелевого сплаву. Для застосування нових імітаторів робочих лопаток були проведені роботи з доопрацювання наявного імітатора диска, для чого виконано відпрацювання технології отримання замків типу «ластівчин хвіст» фрезеруванням. Виконана доопрацювання імітатора диска фрезеруванням пазів типу «ластівчин хвіст».

Ключові слова: зносостійке покриття; приробляєме покриття; знос; вироблення; радіальний зазор; перевірка покриттів.

CHECK OF WEARPROOF AND ABRADABLE SEALING COATINGS*A. O. Krasnikov, Y. I. Torba, A. E. Zanin, R. R. Klimik*

It is provided results of works on creation and operational development (improvement) of the unit on the incision, for check of various systems of coverings (wearproof, abradable, etc.), compressor or turbine. It is stated the problems concerning the creation of unit and criteria which must be considered in improvement and unit modernization. Some calculations were made for definition the unit's operating modes, which should provide the possibility to model to (simulate) the operation of turbine and compressor covering, on various types of engines both modern and future. The unit should provide a wide temperature span and speeds of incision etc., the design of unit details should be technological and provide the possibility to put on the shovel and prorated simulator various systems of coverings. The offered coverings test method will allow to reduce expenses on the check of again developed coverings, and also to reduce terms on the check of again developed coverings. The technical project demands have not been provided during the initial tests of the unit (after designing and manufacturing). For the purpose of maintenance of the technical project, demands took on the tasks of the unit's modernization. In our opinion, it was necessary to reduce weight and resistance to air medium of the blade to satisfy the requirements. It was able to reduce weight by means of «dovetail», instead of a bolt joint, and also application of turbine airfoil similar in shape to a real blade. According to the results of the spent analysis was accepted the solution to apply the blades of the compressor of real engines, made of various materials EP 718 ID and VT 8 as simulators of blades, for check of turbine coverings, the simulator heat sink nickel alloys will be designed. The improvement works of the available disk simulator were carried out for applying the new simulators of blades. For this purpose, the technology for producing dovetail-type locks was completed by milling. It was completed the improvement of the disk simulator by milling of dovetail-type grooves.

Keywords: Wearproof covering; abradable sealing coating; deterioration; development; a radial clearance; check of coating.

Красников Александр Олегович – руководитель группы ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Торба Юрий Иванович – начальник экспериментально-испытательного комплекса ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Занин Александр Евгеньевич – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Климик Ростисла Ростиславович – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Krasnikov Aleksandr Olegovich – team leader, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: krasnikovao@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0002-1730-484X.

Torba Yuriy Ivanovich – head of experimental testing complex SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: Torba.Yuriy@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8470-9049.

Zanin Aleksandr Evgenyevich – first category designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: Zashaua@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-0440-606X.

Klimik Rostislav Rostislavovich – first category designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: KlimikRR@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8028-4602.