*На конкурс*
*«Авиастроитель года» по итогам 2017 г.*

*Номинация №4 «За создание новой технологии»*

**Конкурсная работа**

**Создание серийной технологии нанесения теплозащитного покрытия для защиты рабочих лопаток турбины перспективного газотурбинного двигателя.**

В представляемой на конкурс «Авиастроитель года» работе авторскому коллективу из сотрудников отдела турбин «ОКБ им. А.Люльки» и ОГМет ЛМЗ **удалось провести комплекс работ по созданию конструкции, состава и серийной технологии нанесения теплозащитного покрытия (ТЗП) на рабочие лопатки турбины высокого давления**. Вышеуказанная технология была успешно внедрена на ЛМЗ в производство лопаток турбины современных газотурбинных двигателей (ГТД) для самолётов-истребителей Су-35 (двигатели АЛ-41Ф-1С) и Су-57 - Т-50, ПАК ФА - (двигатели АЛ-41Ф-1) и подтверждена длительными испытаниями на ресурс более 1000 ч.

Сложность задачи определялась тем, что в России нет ведущих НИИ и предприятий, владеющих готовой технологией и практическим опытом создания ТЗП применительно к рабочим лопаткам турбины. Кроме этого, отсутствуют разработчики технологии и оборудования для нанесения покрытий методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме.

## I. Введение

Улучшение тактико-технических характеристик авиационных газотурбинных двигателей неразрывно связано с увеличением степени повышения давления в компрессоре и повышением температуры газа в камере сгорания и перед турбиной. Очевидно, в ближайшее время станет актуальной задача создания двигателя с соотношением воздуха и топлива близким к стехиометрическому, при котором температура газа на входе в турбину составит более 2000 К.

Освоение таких температур невозможно без создания нового поколения материалов, обеспечивающих конструкционную прочность для соответствующих деталей. Таким образом, теплозащитные покрытия (ТЗП), ресурс которых сопоставим с ресурсом наиболее теплонапряженных элементов горячей проточной части ГТД, являются **актуальным** и **эффективным** решением, позволяющим расширить температурный диапазон применения освоенных конструкционных материалов, снизить температурное состояние деталей, что позволяет продлить их ресурс.

Ведущие производители авиационных двигателей в настоящее время применяют ТЗП для повышения надежности и долговечности лопаток турбин. Компания General Electric использует ТЗП на рабочих лопатках двигателей CFM-56-7. По оценкам исследователей фирмы, температура на поверхности материала лопаток в результате применения ТЗП снижается на ~90$^{o}$С. Использование ТЗП позволило исключить аксиальные и радиальные трещины, коробление выходных кромок лопаток.

Высокая эффективность применения ТЗП получена на рабочих лопатках

двигателей PW 2040 и PW 4000 фирмы Pratt-Whitney – получено снижение температуры материала лопаток на ~100°С, при этом использование ТЗП увеличивает долговечность лопаток в 2 раза.

Достоверная информация по технологиям ТЗП, применяемым на двигателях боевой авиации, в открытой печати отсутствует. Кроме того, сведения о разработанных конструкциях и технологиях нанесения ТЗП охраняются от разглашения фирмами-разработчиками.

С учетом отсутствия в настоящее время освоенных материалов для изготовления рабочих лопаток турбины, удовлетворяющих возросшим эксплуатационным требованиям, применение теплозащитного покрытия становится одним из наиболее эффективных путей увеличения долговечности и служебных характеристик современных и перспективных двигателей.

## II. Конструкторские требования к ТЗП

Существенным отличием при разработке новых двигателей АЛ-41Ф-1С и АЛ-41Ф-1 явилось значительное повышение температуры газа перед турбиной высокого давления по сравнению с базовым двигателем АЛ-31Ф для самолёта Су-27, при одновременном повышении требуемого ресурса с 600 ч до 750/1000 ч. При этом температура на поверхности рабочих лопаток турбины высокого давления (РЛ ТВД) возросла на ~ 60°С.

Проведенные на ЛМЗ многочисленные лабораторные испытания на изотермическую жаростойкость при повышенной до 1100 °С температуры лопаток турбины с серийными жаростойкими покрытиями, применяемыми на изделиях типа АЛ-31Ф, РД-33, показали их полную неспособность обеспечить длительную эксплуатацию лопаток в условиях повышения рабочей температуры. Поэтому, основной стала задача создания надёжного ТЗП, состоящего из металлического подслоя с высокой жаростойкостью и обеспечивающего высокую адгезию (сцепление) с наносимым поверх него керамическим слоем, обладающим высокой коррозионной стойкостью и эффектом тепловой защиты.

При разработке конструкции и технологии ТЗП авторами произведен анализ имеющегося на ЛМЗ опыта по нанесению теплозащитных покрытий на двигатель АЛ-41, который показал, что низкая термостойкость ТЗП была связана, прежде всего, с низким качеством и недостаточной жаростойкостью металлических подслоев. Была изучена доступная информация по созданию жаростойких покрытий и ТЗП ведущими организациями в этой области: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, ВИАМ, ИЭС им. Е.О. Патона и др. Специалистами «ОКБ им. А.Люльки» были проведены теплофизические расчёты распределения температур на поверхности рабочих лопаток как с ТЗП, так и без него. Определены требования к распределению толщин керамического теплозащитного слоя, принято решение о проведении на ЛМЗ сравнительных лабораторных испытаний различных вариантов покрытий.

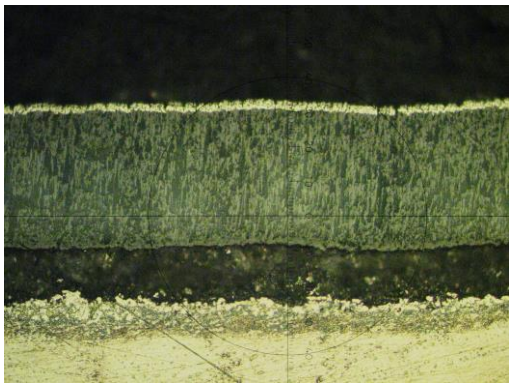
Эти работы позволили **научно обосновать конструкцию и проработать требования к покрытию и технологии его нанесения**. На основе известной информации, консультаций со специалистами ИЭС им. Е.О. Патона и результатов собственных лабораторных испытаний, из условия получения максимального ресурса ТЗП были оптимизированы толщина и распределение керамического слоя. Требования к керамическому слою ТЗП, допустимые нормы дефектов, требования по ремонту были сформулированы в разработанных технических условиях.

## III. Разработка базовой конструкции ТЗП

Важным этапом в работе авторского коллектива по созданию надежной конструкции покрытия являлся выбор состава и технологии нанесения

металлического жаростойкого подслоя ТЗП. В результате проведенных испытаний и исследований более 13 вариантов покрытий, выяснилось, что ни одно из серийно применяемых в авиационных ГТД жаростойких покрытий не обеспечивает требуемый ресурс ТЗП. Жаростойкие подслои и элементы технологии ТЗП, предложенные в рамках договорных работ по НИР с ведущими специалистами ВИАМ, ООО «ТСЗП», ОАО «Пермский Моторный Завод» с применением оборудования фирмы Sulzer показали неудовлетворительную жаростойкость. Авторским коллективом было предложено использовать в качестве подслоя разработанное
ВВИА им. Н.Е. Жуковского покрытие АЖ8+CrAl, которое в итоге утвердили.

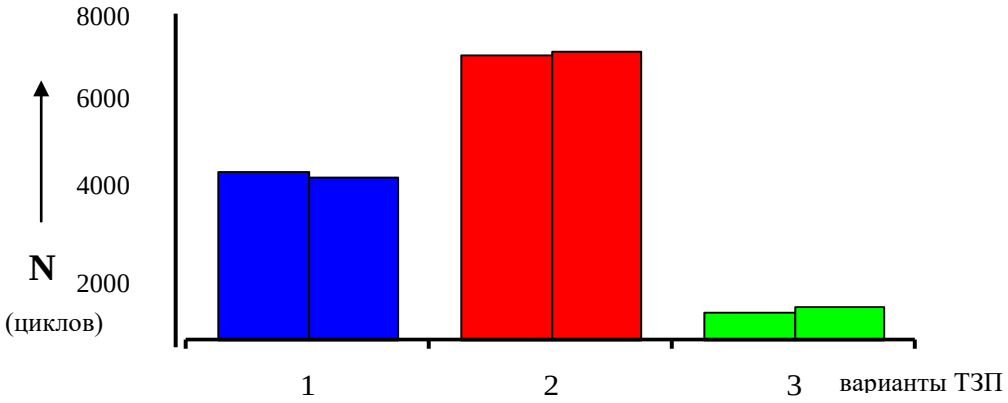
Таким образом, была создана базовая конструкция ТЗП, включающая жаростойкий металлический подслой АЖ8+CrAl, нанесённый комбинированным методом, керамический теплозащитный слой и металлический барьерный слой поверх керамического слоя, нанесённые электронно-лучевым методом (фиг.1).



Фиг. 1 Микроструктура базового варианта ТЗП АЖ-8+CrAl+($ZrO_2$ x $8Y_2O_3$) + СДП-4, x400.

Сравнительные лабораторные испытания показали, что предлагаемый авторами базовый вариант ТЗП имеет наиболее высокие результаты испытаний (см. табл.).

**<u>Определение теплофизических свойств</u>** (коэффициента температуропроводности) и термоциклической долговечности (термостойкости) при термоциклировании 400↔1100°С различных вариантов ТЗП провели совместно со специалистами НИЦ ЦИАМ по разработанным там методикам (фиг. 2). Стойкость к изотермическому окислению (жаростойкость) при длительной выдержке в атмосферной печи при 1100°С проверяли на ЛМЗ.




Фиг. 2 - Результаты испытаний некоторых вариантов ТЗП на термоциклическую долговечность при 1100°С:
1) - АЖ-8+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$), 2) - АЖ-8+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$) + СДП-4,
3) - NiCrAlY+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$) (вариант ООО «ТСЗП»)

**Таблица: Результаты лабораторных испытаний некоторых вариантов ТЗП**

| Вариант ТЗП | Стойкость к изотермическому окислению при 1100 °С, час. | Термоциклическая долговечность 400↔1100°С, циклов | Коэффициент температуро-проводности, Δt, °С |
|---|---|---|---|
| АЖ-8+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$) | ~1000 | ~4050 | ~80 |
| АЖ-8+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$) + СДП-4 | ~1500 | ~6800 | ~105 |
| NiCrAlY+ ($ZrO_2$ + $8Y_2O_3$ ) (ООО «ТСЗП») | ~850 | ~800 | ~50 |

**<u>При разработке технологии и в целях повышения производительности нанесения керамического слоя ТЗП на ЛМЗ проведены</u>**:

- доработка установки УЭ-175 для нанесения покрытий методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме - введена система напуска кислорода в зону конденсации, внедрены новые система регистрации температуры и датчики веса и др.;
- оптимизирована оснастка – увеличена загрузка с 8 до 12 лопаток, без потери качества и с оптимизацией распределения толщины керамики путём затенения спинки лопаток, введены постоянные препарированные термопарами лопатки для точного контроля температур конденсации;
- разработана новая оптимизированная технология подготовки поверхности лопаток и конденсации покрытия: исключены трудоёмкие операции виброполировки, дробеструйной обработки, оптимизированы параметры нагрева лопаток и конденсации керамики, что позволило практически исключить брак при напылении и повысить стойкость керамического слоя при лабораторных испытаниях при 1100ºС с первоначальных ~ 400 часов до 1000 часов и выше.

## IV. <u>Практическая значимость</u>

Завершенность разработанной конструкции подтверждена работоспособностью предложенного варианта ТЗП при длительных стендовых испытаниях более 1200 ч. на двигателе АЛ-41Ф-1С и более 600 ч. на более напряжённом АЛ-41Ф-1. Предложенный вариант позволил уменьшить количество сколов керамического слоя по сравнению с другими испытанными ТЗП. Проведенное в ВИАМ исследование состояния лопаток турбины с разработанным ТЗП, прошедших длительные испытания в составе двигателя на самолёте СУ-35 с наработкой 1000 часов, свидетельствует об удовлетворительном состоянии лопаток и возможности их дальнейшей эксплуатации.

На основании проведенных лабораторных испытаний и исследований, длительных испытаний рабочих лопаток с ТЗП в составе двигателей в чертёж внесена предложенная авторами конструкция ТЗП, а также внесены изменения в технологический процесс «Нанесение керамического покрытия на установке УЭ-175 на рабочие лопатки ТВД». Это подтверждает **практическую значимость** предложенной конструкции и технологии нанесения ТЗП.

## V. Экономический эффект

Экономический эффект от внедрения разработанного ТЗП достигается за счет увеличения ресурса лопаток и за счет ремонтопригодности самого разработанного покрытия. Ремонт керамического слоя покрытия путем его удаления и повторного нанесения с сохранением металлического подслоя опробован и успешно подтвержден длительными испытаниями в составе ГТД.

Разработанное ТЗП успешно прошло Государственные стендовые испытания в составе двигателя АЛ-41Ф-1С для самолёта СУ-35 и передано в серийное производство.

Также разработанное ТЗП в 2017 г. успешно прошло Государственные стендовые испытания в составе более теплонагруженного двигателя первого этапа АЛ-41Ф-1 для самолёта Су-57 (ПАК ФА).

Внедрённая в серийное производство технология нанесения ТЗП не имеет аналогов в России и позволила обеспечить работоспособность рабочей лопатки турбины на новых двигателях АЛ-41Ф-1С и АЛ-41Ф-1 в условиях повышения температуры газов перед турбиной.

Внедрение инновационных технологий, подобных представленной технологии нанесения теплозащитных покрытий, позволяет повысить конкурентоспособность и экспортный потенциал изначально экспортно-ориентированных авиационных двигателей АЛ-41Ф-1С и сохранить для России высокую позицию на рынке вооружений.

## VI. Выводы

1. В представленной на конкурс работе коллективу авторов удалось решить проблему обеспечения работоспособности рабочих лопаток турбины современных газотурбинных двигателей для самолётов Су-35 и Су-57.
2. Разработанная конструкция ТЗП и технология её нанесения подтверждена Государственными испытаниями в составе двигателя АЛ-41Ф-1С в 2016г и АЛ-41Ф-1 в 2017г.
3. В 2017г. качество и стабильность разработанной технологии нанесения нового ТЗП подтверждено массой исследований рабочих лопаток проходивших серийную лётную эксплуатацию в составе двигателей самолётов Су-35 в частях ВКС РФ. Лопатки, успешно отработавшие 1000 ч на двигателе, после замены керамического слоя покрытия на ЛМЗ возвращаются в эксплуатацию.
4. При себестоимости рабочей лопатки турбины с ТЗП более 50 тыс. рублей экономический эффект при каждой переборке 1 двигателя достигает 4,5 млн. рублей.

## Приложение

Краткие сведения об авторском коллективе – на 2 стр.