

ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МАРТ – АПРЕЛЬ № 2/2022 (185)



Первый опытный двигатель ПД-8 прошел программу стендовых испытаний

ТЕКУЩАЯ ГОТОВНОСТЬ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТОПЛИВА
С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ
ВОДОРОДА

с. 2

МИКРОТУРБИННЫЕ
УСТАНОВКИ
AURELIA A400:
10 ЛЕТ ОТ ИДЕИ
ДО ВОПЛОЩЕНИЯ

с. 10

КОГЕНЕРАЦИОННЫЙ
ЦИКЛ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ –
ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ
КОНВЕРСИИ ПНГ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ
И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ

с. 18

2 март – апрель
(185) 2022

Журнал основан в 1999 году

Учредитель
ООО «Издательский дом
«Газотурбинные технологии»

Редакционный совет:

Главный редактор Смирнов А.А.
Ананенков А.Г. Mowill R.J.
Брындин О.В. Ольховский Г.Г.
Будзюляк Б.В. Пономарев Н.Н.
Гариков Г.С. Русецкий Ю.А.
Грибин В.Г. Рыжинский И.Н.
Егоров И.Н. Снитко А.А.
Егоров И.Ф. Соколовский М.И.
Зарицкий С.К. Сударев А.В.
Леонтьев Р.А. Фаворский О.Н.
Лукьяненко В.М. Халатов А.А.
Макаров А.П. Халфун Л.М.
Марчуков Е.Ю. Черников А.В.
Михайлов В.Е. Шайхутдинов А.З.
Мордасов Р.А. Щуровский В.А.

Генеральный директор Александр Смирнов

Научный редактор Владимир Галигузов

Литературный редактор Владимир Смирнов

Руководитель коммерческого отдела Любовь Тишинова

Менеджер по подписке Ирина Алябьева

Дизайн и верстка Ирина Одинцова

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-34887 от 29 декабря 2008 г.

Адрес редакции / издателя Россия, 152934, Ярославская обл., г. Рыбинск,

Адрес для писем Россия, 152900, Ярославская обл., г. Рыбинск, а/я 30

Телефон/Факс (4855) 295 235, 295 236

www.gtt.ru
E-mail: info@gtt.ru

Распространяется по подписке
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России»:
87431 – журнал «Газотурбинные технологии»
87483 – Каталог газотурбинного оборудования

Типография ООО «КТ-ПРИНТ»
г. Кострома,
ул. 2-я Волжская, д. 5

Дата выхода номера 07.06.22 г.

Тираж 3000 экз.

Цена свободная

Перепечатка материалов или их фрагментов допускается только по письменному согласованию с редакцией, ссылка на журнал «Газотурбинные технологии» обязательна

Редакция не несет ответственности за содержание рекламы

Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением автора



ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Специализированный информационно-аналитический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

Водородная энергетика

Текущая готовность газотурбинных установок к использованию топлива с высоким содержанием водорода

2

Газотурбинные установки

Микротурбинные установки Aurelia A400: 10 лет от идеи до воплощения

10

Китайские газотурбинные установки выходят на российский рынок

16

Опыт эксплуатации

Когенерационный цикл на месторождениях – эффективный способ конверсии ПНГ в электрическую и тепловую энергию

18

Системы управления, контроля и диагностики

Диагностика турбинного оборудования с использованием магнитной памяти металла

22

Сервис ГТУ

Перспективные материалы и покрытия для производства и ремонта газотурбинных двигателей и установок

30

Электротехническое оборудование ГТУ

Применение суперконденсаторных систем накопления энергии для запуска и обеспечения переходных процессов при переменных нагрузках микротурбинных установок Capstone

36

Выставки, конференции

Итоги международной выставки «Нефтегаз-2022»

42



Перспективные материалы и покрытия для производства и ремонта газотурбинных двигателей и установок

А. Ахметгареева, Л. Балдаев, И. Мазилин, С. Югай –
ООО «Технологические системы защитных покрытий»

Спектр покрытий деталей и элементов ГТД разнообразен: это антифреттинговые и износостойкие покрытия элементов лопаточного аппарата, валов, дисков, подшипников; теплозащитные покрытия лопаточного аппарата турбины, деталей камеры сгорания, эрозионностойкие покрытия лопаточного аппарата компрессора; система уплотнительных покрытий (рис. 1).

Теплозащитные покрытия (ТЗП)

Основная функция ТЗП заключается в снижении температуры на поверхности деталей горячего тракта с целью предотвращения деградации материала и увеличения срока службы. Нанесение ТЗП на детали горячего тракта позволяет повысить температуру газа на входе в турбину при сохранении ресурса. Повышение температуры на каждые 50 °С приводит к росту КПД турбины на 2–4 %.

Эмалевые покрытия (рис. 2), наносимые на внутренние поверхно-

сти жаровых труб и газосборников, являются традиционным решением для увеличения ресурса камеры сгорания путем предотвращения прогара и деградации материала под действием высоких температур. Данные покрытия защищают от S- и V-коррозии, от прогара и локального перегрева, снижают среднюю температуру детали. Ресурс покрытия на основе стеклоэмали ЭВК-103, нанесенного на жаровые трубы двигателей ДГ-90 и ДН-80, составляет около 3000 часов (по данным ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»).

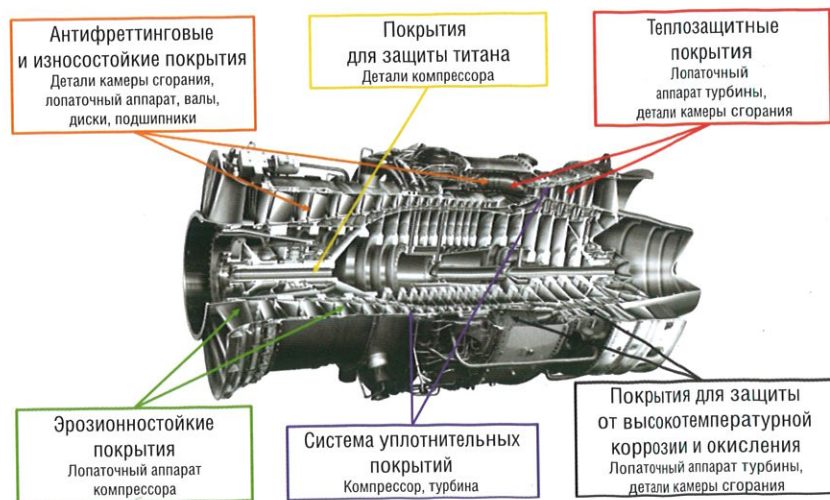


Рис. 1. Виды и области применения современных покрытий



Фото 1. Теплозащитные покрытия теплового аппарата

Однако существующие эмалевые покрытия марки ЭВК-103 обладают низкой термостойкостью – до 250 циклов в режиме $20 \leftrightarrow 1000$ °С.

На смену эмалевым приходят керамические теплозащитные покрытия (фото 1) с высокой термостойкостью – более 1000 циклов в режиме $20 \leftrightarrow 1100$ °С по данным испытаний при одностороннем газовом нагреве и охлаждении тыльной стенки образца. Традиционные, или классические керамические покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного 7–8 % оксида иттрия, обладают низкой теплопроводностью керамического слоя (1,60–2,00 Вт/м·К, по данным испытаний методом лазерной вспышки) и высокой жаростой-

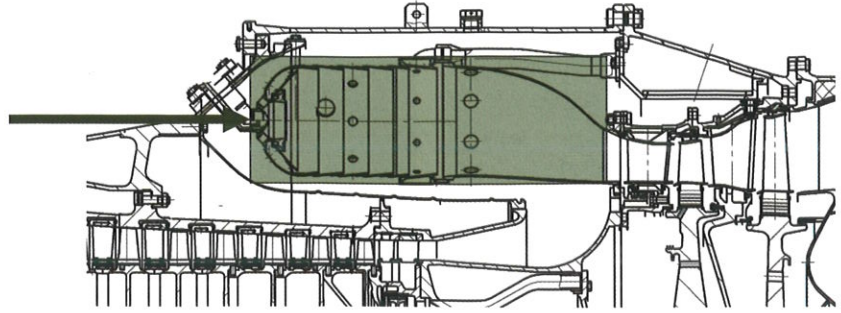


Рис. 2. Область применения эмалевых покрытий: внутренняя сторона ЖТ и ГС камеры сгорания двигателя ДО90

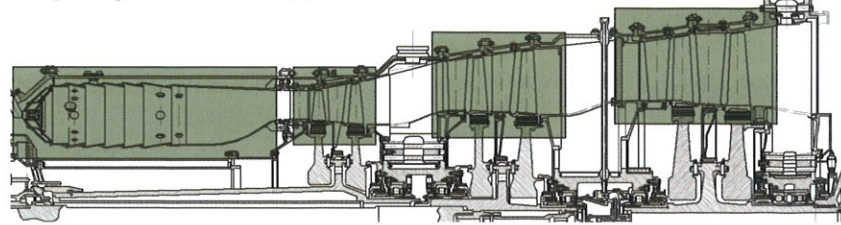


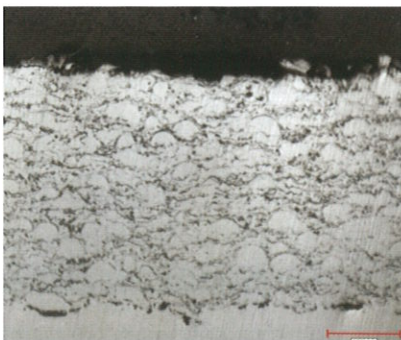
Рис. 3. Области применения керамических теплозащитных покрытий: жаровые трубы и газосборники КС, рабочие и сопловые лопатки ТВД и ТНД, кожуха и экраны ТВД

костью – более 500 часов без разрушения при температуре 1000 °С. Испытания в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» показали, что у керамических покрытий отсутствует негативное влияние на длительную прочность сплава, и в комплексе с высокой прочностью сцепления с материалом детали более 20 МПа (испытания проводились по клеевой и штифтовой методикам) керамические покрытия становятся наиболее распространенным теплозащитным покрытием для всего горячего тракта ГТД (рис. 3).

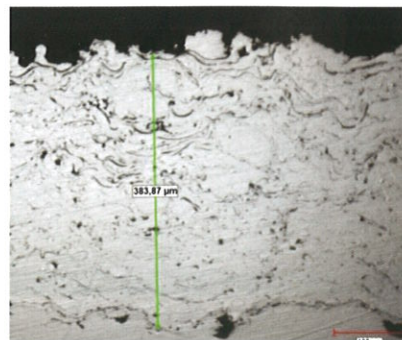
Рассматривается применение теплозащитных покрытий ООО «ТСЗП» по программе создания российских ГТУ большой мощности. На установках ГТЭ-65 и ГТЭ-170 раз-

работки и производства «Силовые машины» будут опробованы теплозащитные покрытия на деталях камер камеры сгорания (жаровая труба, газосборник), а также на рабочих лопатках и лопатках направляющего аппарата первой и второй ступени ТВД (рис. 4).

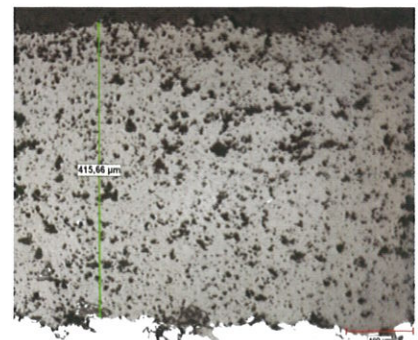
Помимо внедрения новых покрытий на вновь создаваемых двигателях, компания особое место уделяет сервису и восстановительному ремонту существующего парка ГТД. В частности, были проведены мероприятия по внедрению ТЗП при ремонте ГТУ ДГ90 ГП НПКГ «Зорья» «Машпроект»: восстановлено APS ТЗП на сопловых лопатках ТВД, заменено эмалевое покрытие на кера-



а)



б)



в)

Фото 2. а–б – металлические жаростойкие покрытия; в – керамические ТЗП

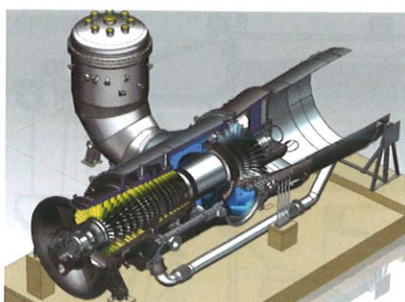


Рис. 4. Проект применения современных теплозащитных покрытий ООО «ТСЗП» на ГТЭ-170

мическое ТЗП на деталях камеры сгорания, произведена замена EB-PVD ТЗП на рабочих лопатках ТВД.

Современные условия диктуют новые требования к теплозащитным покрытиям:

- стойкость к термоциклированию 20↔1300 °С;
- низкая теплопроводность ($\leq 1,5$ Вт/м·К) при $T \sim 1300$ °С;
- минимальная деградация свойств в процессе эксплуатации (спекание, фазовые переходы) при температурах до ~ 1300 °С;
- высокая жаро-, эрозийная и коррозионная стойкость;
- воспроизводимость свойств при серийном нанесении.

Инновации в области теплозащитных покрытий обязательно включают в себя технику и технологии их нанесения (рис. 5). Компания «ТСЗП» использует современные оптические системы для лазерной обработки (фото 3), позволяющие повысить термостойкость



Фото 3. Оптическая система для лазерной обработки

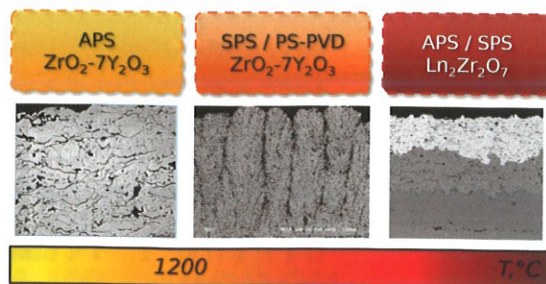


Рис. 5. Современные покрытия и способы нанесения. Плазменное напыление ТЗП на рабочую лопатку (справа)



за счет сегментирования покрытия, снизить шероховатость до $Ra < 1,5$ мкм, при этом формируется оплавленный слой с высокой твердостью, стойкий к эрозийному износу и коррозии (фото 4).

Опыт внедрения

■ ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»: с 1998 года на оборудовании ТСЗП-Р выполняется нанесение покрытий на детали горячего тракта серийно выпускаемых предприятий ГТД и ГТУ; наработка лопаток с ТЗП ДГ90, ДУ80, ДН70 превысила 30 тыс. часов;

■ ОАО «УМПО»: выполнен комплекс НИР и ОКР, с 2000 года на установках ТСЗП-Р-2000 выполняется нанесение покрытий на детали серийно изготавливаемых изделий 99, 96ФП, 117С и 117;

■ ФГУП «ММП «Салют»: выполнен комплекс НИР и ОКР, осуществлена поставка (2001) и модернизация (2013) оборудования плазменного напыления;

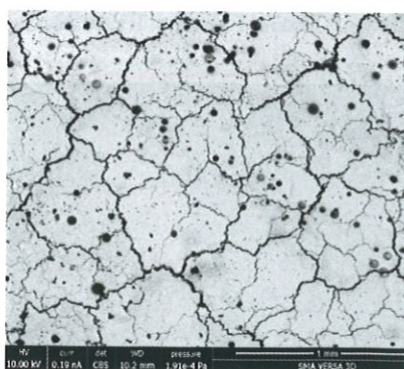
■ ОАО «КМПО»: выполнен комплекс НИР и ОКР, осуществлена поставка (2010) оборудования плазменного напыления;

■ АО «Силовые машины»: выполняется комплекс НИОКР по ГТЭ-170 и ГТЭ-65;

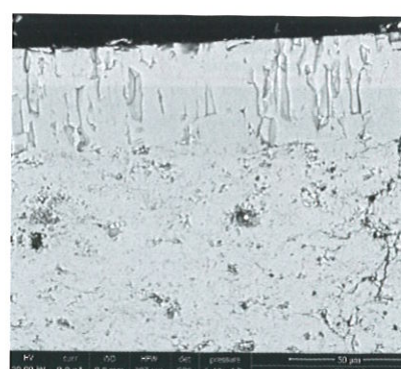
■ ОКБ им. А. Люльки: выполнен комплекс НИОКР, выполняется нанесение покрытий на серийно изготавливаемые детали.

Опыт импортозамещения

Компания наработала большой опыт восстановления деталей горячего тракта импортных газотурбинных установок (фото 5). В качестве примера можно привести нанесение двухслойного ТЗП взамен существующего на внутренний и внешний корпус жаровой трубы кольцевого типа газотурбинного двигателя SGT-600 производства Siemens. В ходе работ был нанесен металлический подслой Ni-Co-Cr-Al-Y (марка ТСЗП-BC2) и основной керамический слой $ZrO_2-7Y_2O_3$ (марка ТСЗП-Т141).



а)



б)

Фото 4. Электронная микроскопия ТЗП после лазерной обработки: а) фото поверхности; б) – микроструктура оплавленного слоя ТЗП

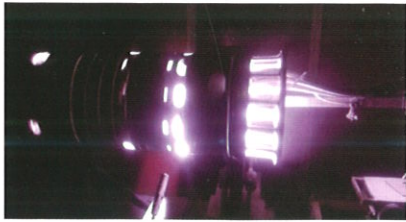


Фото 5. Плазменное напыление ТЗП на внутреннюю поверхность жаровой трубы

В отношении внутреннего кожуха (фото 6) решена задача обеспечения необходимого зазора между поясами жаровой трубы без применения маскировки. На внешний кожух (фото 7) покрытие наносится на основную внешнюю цилиндрическую поверхность, нижнюю плоскость (места установки форсунок) и внутреннюю цилиндрическую поверхность за один технологический проход; также решена задача обеспечения необходимого зазора между поясами жаровой трубы без применения маскировки. Текущая наработка КС с покрытием ТЗП в составе ГПА «Балтика-25» превышает 4000 часов, дефекты не выявлены.

Уплотнительные покрытия (УП)

Увеличение радиального зазора ТВД (фото 8) на 1 % приводит к снижению КПД газотурбинного двигателя примерно на 3 % и перерасходу топлива почти на 10 % [1]. Уменьшение радиальных зазоров за счет нанесения наноструктурируемых уплотнительных (прирабатываемых) покрытий способствует увеличению КПД двигателя на 2 % (абс, фото 9). Кроме радиальных зазоров, использование уплотнительных покрытий возможно для уплотнения масляных полостей (КНД, КВД, ТВД, ТНД), изготовления уплотнительных вставок для уменьшения радиального зазора РЛ ТВД; нанесения на лабиринтные уплотнения опоры турбины (рис. 6).

Работы в области уплотнительных покрытий для горячей секции продолжают из-за ряда недостатков существующего решения (YSZ+Polyester): спекание и фазовый переход при 1200 °С (необходимо



а)



б)

Фото 6. Восстановление ТЗП на поверхности кольцевой КС наземной ГТУ (кожух внутренних)



а)



б)

Фото 7. Восстановление ТЗП на поверхности кольцевой КС наземной ГТУ (кожух внешний)



Фото 8. Увеличенный зазор ТВД

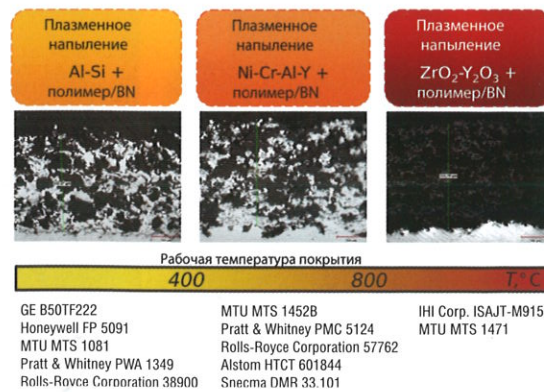


Рис. 6. Материалы и примеры использования уплотнительных покрытий



а)



б)

Фото 9. Нанесение уплотнительного покрытия на элемент статора ГТК-10-4

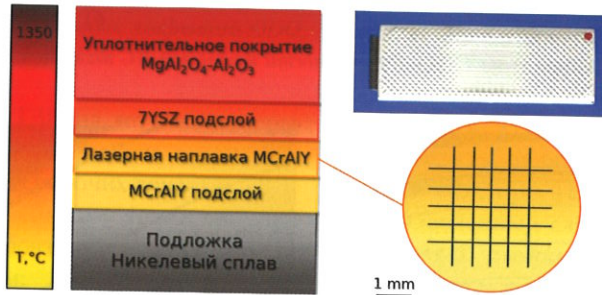


Рис. 7. Структура уплотнительных покрытий ТСЗП

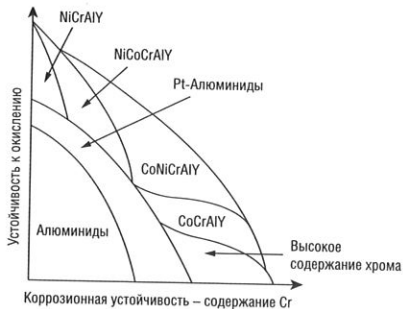


Рис. 8. Устойчивость материалов и покрытий к высокотемпературной коррозии и окислению



Фото 11. Процесс плазменного напыления покрытия на основе Co-Cr-Al-Si-Y на РЛ ТВД



Фото 10. Лопатки ВНА, ТВД, ТНД турбины ГТК-25ИР до восстановления

увеличение границы до 1300 °С); необходимость упрочнения лопатки (твердость покрытия ~ 500 HV); высокий градиент температур из-за низкой теплопроводности – оптимум ~ 10 Вт/м·К (рис. 7).

Жаростойкие покрытия

Проведены работы по восстановлению лопаток ВНА, ТВД, ТНД турбины ГТК-25ИР (фото 10) и лопаток ТВД турбины ГТН-25ИР (фото 11).

После ремонта лопатки ТВД на КС «Первомайская» отработали 20 022 часа, лопатки ТВД и ТНД на КС «Курск» отработали 19 269 часов. Материалы для нанесения покрытий выбираются исходя из условий эксплуатации деталей, особенно учитывается влияние факторов высокотемпературного окисления, коррозионная среда и их сочетание (рис. 8).

Заключение

ООО «ТСЗП» имеет положительный опыт решения следующих задач по тематике восстановления деталей ГТУ:

- повышение параметров работы (ГТХ) без снижения ресурса;
- повышение ресурса и продление межремонтного периода;
- ремонт ДСЕ после производственного брака и после эксплуатации;
- импортозамещение материалов и технологий производства и ремонта ГТД и ГТУ;
- реинжиниринг – разработка отечественных технологий, превосходящих по характеристикам применяемые аналоги.

Литература

1. А. А. Иноземцев, С. В. Бажин, М. А. Ситко. Вопросы оптимизации радиальных зазоров ТВД авиационного ГТД // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2.

2. А. Боцула. Экономичный способ повышения эффективности газотранспортной системы // Территория Нефтегаз. – 2006. – № 6.

Ростех внедрил уникальные технологии производства лопаток авиадвигателей

Объединенная двигателестроительная корпорация Ростеха внедрила уникальные технологии производства лопаток авиационных двигателей. Инновационные разработки позволяют изготавливать детали максимально точной формы, в том числе крупногабаритные, а также снижают уровень трудозатрат и исключают из технологического процесса ручной труд.

Устройство для закрутки высокоточных титановых лопаток и гибридная штамповка лопаток из двухфазного титанового сплава используются в производстве на рыбинском предприятии ПАО «ОДК-Сатурн».

Лопатка газотурбинного двигателя является одной из наиболее сложных и наукоемких в проектировании и изготовлении деталей. От изделия требуется максимально точная форма, устойчивость к высоким нагрузкам и температурам, при производстве используются редкие металлы и уникальные сплавы, а также композиционные материалы, гарантирующие легкость и прочность заготовки. В мире всего шесть государств, освоивших проектирование и изготовление лопаток. Владение такими технологиями – свидетельство высочайшего уровня развития машиностроения в стране.

– Оба изобретения связаны с изготовлением штамповок лопаток. Устройство для закрутки встроено в технологический процесс, сейчас с его помощью на полностью отечественном оборудовании изготавливаются лопатки для перспективного гражданского авиадвигателя, расширяется номенклатура и компетенции производства крупногабаритных лопаток. В свою

очередь гибридная штамповка основывается на применении аддитивных технологий и классической изотермической штамповки, демонстрируя требуемые показатели по экономике и механическим характеристикам, – отметил главный инженер ПАО «ОДК-Сатурн» Игорь Ильин.

Изобретения были представлены на международном салоне «Архимед 2022», где были отмечены золотой и серебряной наградой.

Новейшие технологии активно применяются Объединенной двигателестроительной корпорацией Ростеха при создании и производстве линейки гражданских авиадвигателей ПД-8 для импортозамещенного SSJ-new, ПД-14 для среднемагистрального MC-21 и ПД-35 для перспективных широкофюзеляжных дальнемагистральных самолетов.



Подписано соглашение по проекту ТЭС в Сырдарьинской области

Подписано Соглашение между АО «Национальные электрические сети Узбекистана» и консорциумом в составе компаний EDF (Франция), Nebras Power (Катар) и Sojitz (Япония) предполагает закупку электроэнергии в рамках реализации инвестиционного проекта «Строительство парогазовой теплоэлектростанции мощностью 1600 МВт в Сырдарьинской области».

Соглашение было подписано вице-президентом консорциума Беатрис Буффон и председателем правления АО «Национальные электрические сети Узбекистана» Дададжоном Исакуловым в рамках Ташкентского международного инвестиционного форума.

Проект предусматривает строительство современной парогазовой турбинной электростанции Н-класса на площади 55 га в г. Ширин. Ввод в эксплуатацию ТЭС годовой производительностью 12 млрд кВт·ч планируется в январе 2026 года.

КПД тепловой электростанции будет выше 60 %, что позволит сэкономить 1,1 млрд куб. м природного газа в год. Коллектив строителей составит 2500 человек, а после ввода ТЭС здесь будет трудоустроено 120 специалистов.



Возведение современной ТЭС мощностью 1600 МВт в Сырдарьинской области является одним из крупнейших инвестиционных проектов в Центральной Азии и СНГ, реализуемых посредством открытых торгов. Напомним, консорциум EDF-NEBRAS-Sojitz (Франция, Катар и Япония) выиграл открытый тендер, который был организован при технической поддержке Международной финансовой корпорации 19 ноября 2021 года.