

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЛОПАТОК СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ПРИМЕРЕ ГТД-110М

Д. т. н. Балдаев Л. Х.¹,
к. т. н. Балдаев С. Л.¹,
к. т. н. Мазилин И. В.¹,
Ахметгареева А. М.¹,
Иванов А. С.² (ООО «Технологические системы защитных покрытий», ПАО «Научно-производственное объединение «Сатурн»)

АННОТАЦИЯ. Развитие современных энергетических газовых турбин предполагает увеличение мощности, уменьшение расхода топлива, увеличение общей надежности функционирования турбины и, как следствие, увеличение ресурса. В связи с этим возникает потребность в инновационных подходах к совершенствованию и разработке нового поколения металлических и керамических материалов для деталей и покрытий различного функционального назначения, обладающих повышенной стойкостью к разрушению в условиях воздействия циклических термомеханических напряжений и агрессивных сред.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газотермическое напыление, термобарьерные покрытия, теплозащитные покрытия, газотурбинные установки, рабочие лопатки, сопловые лопатки.

ABSTRACT. The development of modern gas turbines involves increasing the capacity of the engine: decreasing fuel consumption, increasing overall reliability of the turbine and, consequently, the service life. So there are requirements in innovative approaches for improving and developing a new generation of metallic and ceramic materials for components and coatings of various functional purposes, with increased resistance to degradation under the action of cyclic thermo-mechanical stresses and corrosive environments.

KEY WORDS: thermal spraying, thermal barrier coatings, thermal resistant coating, gas turbines, rotor blades, nozzle vanes.

Обновление генерирующих активов в электроэнергетике России осуществляется в значительной степени за счет вводов парогазовых установок (ПГУ) большой единичной мощности. Действующие и строящиеся ПГУ на базе газотурбинных установок (ГТУ) большой мощности импортного производства (Siemens, General Electric, Alstom, Mitsubishi) и показатели их эффективности рассмотрены в [1]. Проблемы внедрения энергоблоков ПГУ, включая трудности при эксплуатации с последующим ремонтом, приведены в [2].

Разработка современных отечественных ГТУ и ПГУ на их основе сдерживается возможностью энергомашиностроительных предприятий страны изготавливать рабочие лопатки для ГТУ мощностью лишь до 45 МВт. Если после камеры сгорания газовой турбины V94.2 (ГТЭ-160) температура уходящих газов составляет около 1100°C, то после камер сгорания современных ГТУ она существенно выше. Для снижения воздействия высоких температур на конструктивные элементы ротора или статора турбины используются конструктивные решения (охлаждение, применение новых жаропрочных материалов). Этой же цели служит использование разработчиками оборудования

и ремонтными предприятиями различных функциональных покрытий [3].

Изготовители оборудования делятся своими разработками не всегда охотно: требуется сохранить свое конкурентное преимущество перед другими изготовителями. После выработки установленного ресурса наиболее напряженные элементы конструкций турбины (например, рабочие лопатки (РЛ) газовой турбины мощностью 150 (160) МВт после наработки 30000 часов — первая инспекция) требуют восстановления или замены. Восстановлению предшествуют проверка геометрии и структуры металла лопаток, качества термобарьерного покрытия. Как правило, лопатки после первой инспекции подлежат восстановлению и последующему использованию. Закупка новых лопаток взамен выработавших свой ресурс является дорогостоящим мероприятием. Так, стоимость первого комплекта РЛ для 1–4 ступеней ГТД турбины V94.2 ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ составила в 2003 г. 1 034 614 евро. Данное обстоятельство послужило основой для того, чтобы ООО «Технологические системы защитных покрытий» (ТСЗП) несколько лет назад приступило к разработке отечественного покрытия для сопловых и рабочих лопаток газовой турбины ГТЭ-110М.

Развитие современных газовых турбин предполагает увеличение мощности двигателя, уменьшение рас-

¹ 105484, Москва, 16-я Парковая ул., д. 27

² 152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, 163

хода топлива, увеличение общей надежности функционирования турбины и, как следствие, увеличение ресурса. Пути решения вышеперечисленных задач лежат в плоскости увеличения рабочей температуры турбин, что в свою очередь требует применения новых конструкционных материалов со свойствами, позволяющими изготовленным из них деталям функционировать при повышенных рабочих параметрах. Повышение эксплуатационных характеристик за счет использования имеющихся жаропрочных сплавов и покрытий практически исчерпало свои возможности. В связи с этим возникает потребность в инновационных подходах к совершенствованию и разработке нового поколения металлических и керамических материалов для деталей и покрытий различного функционального назначения, обладающих повышенной стойкостью к разрушению в условиях воздействия циклических термомеханических напряжений и агрессивных сред [4].

Оптимальным решением, позволяющим увеличить рабочую температуру, ресурс и КПД, является нанесение защитных покрытий различного функционального назначения, в том числе, теплозащитных покрытий для снижения температуры поверхности деталей горячего тракта (рабочие и сопловые лопатки турбины, элементы камеры сгорания) [5].

На сегодняшний день проблема повышения ресурса рабочих элементов газовых турбин (рабочие и сопловые лопатки, жаровые трубы и др.) является весьма актуальной, так как простой или выход из строя рабочих элементов турбины влечет за собой полный выход из строя всего оборудования в целом. С другой стороны, экономичность, удобство эксплуатации и высокая маневренность перспективной газотурбинной установки ГТД 110М вполне компенсируют временные недостатки надежности конструкции. В связи с этим рассмотрим на примере данной газотурбинной установки применение ряда функциональных покрытий, наносимых газотермическими методами напыления.

Традиционно для защиты деталей ГТД от воздействия высоких температур, эрозионного износа и коррозии используются керамические теплозащитные покрытия (ТЗП). Современное ТЗП состоит из нескольких слоев. На поверхность детали сначала наносится жаростойкое покрытие для защиты от высокотемпературной коррозии и окисления. Самыми распространенными материалами на данный момент являются сплавы систем $M\text{CrAlY}$ ($M=\text{Ni}, \text{Co}$) и Ni(Pt)-Al . Они термически и химически совместимы с суперсплавами, из которых изготавливаются детали ГТД, и оказывают минимальное влияние на их свойства. Жаростойкие покрытия традиционно наносятся методами плазменного напыления (на воздухе — APS или в вакууме — VPS), высокоскоростного напыления (на воздухе — HVOF, HVAF) и рядом вакуумно-плазменных методов. В ходе эксплуатации на поверхности жаростойкого покрытия образуются оксиды роста — TGO. Формирование TGO неизбежно и целью разработчиков является образование TGO в виде $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а так-

же — чтобы его рост был медленным, однородным и бездефектным. Такой TGO создает превосходный диффузионный барьер, замедляя дальнейшее окисление металлического подслоя.

Верхний керамический слой ТЗП позволяет снизить температуру детали за счет низкой теплопроводности. Уже более 35 лет для этой цели используются материалы на основе двуокиси циркония, стабилизированной 6–8% оксида иттрия (7YSZ). Этот материал обладает уникальным сочетанием свойств. Он имеет один из самых низких коэффициентов теплопроводности (2,3 Вт/м·К при 1000°C для плотного материала) и стабильно высокий коэффициент теплового расширения (11×10^{-6} 1/°C в диапазоне температур 20–1000°C). Среди его недостатков необходимо указать фазовый переход с изменением объема, высокую анионную проводимость и скорость спекания, что определяет максимальную температуру эксплуатации, которая оценивается в 1200°C. Верхний керамический слой наносится различными способами — осаждением из газовой фазы в вакууме (EB-PVD), рядом вакуумно-плазменных методов и методом газотермического напыления (плазменное напыление — APS на воздухе). Причем первый используется, в основном, для малогабаритных лопаток, а второй — для крупногабаритных деталей.

По сравнению с другими методами нанесения покрытий газотермическое напыление имеет преимущества в простоте процесса, большом выборе материалов, возможности в широких пределах варьировать толщину покрытия и легкости формирования композитного покрытия.

Универсальность и низкая стоимость производства делают методы газотермического напыления ТЗП коммерчески привлекательными. Такие ТЗП хорошо работают в промышленных газотурбинных двигателях, включая применение на сопловых и рабочих лопатках из-за более низких рабочих температур, уменьшенных температурных градиентах и меньшего количества тепловых циклов по сравнению с авиационными двигателями [6, 7].

Для нанесения теплозащитных покрытий на рабочие элементы ГТД-110М ООО «Технологические системы защитных покрытий» при поддержке ПАО «НПО «Сатурн» были разработаны материалы и технологии их нанесения, позволившие получить покрытия, обладающие низкой теплопроводностью (0,90–1,10 Вт/м·К), высокой прочностью сцепления (не менее 32 МПа) и стойкостью к термоциклическим нагрузкам 20 ↔ 1100°C. Разработанные теплозащитные покрытия были нанесены на направляющие лопатки первой ступени, рабочие лопатки первой и второй ступеней энергетической газовой турбины ГТЭ 110М (рис. 1).

Лабораторные испытания покрытия показали его эффективность. В ходе натурных испытаний покрытия в течение межремонтного периода на лопатках, установленных в проточную часть ГТД-110 турбины №2 энергоблока «Ивановские ПГУ»,



а



б

Рис. 1. Лопатки газовой турбины ГТД-110М с теплозащитным покрытием: а) сопловая лопатка 1-ой ступени, б) рабочая лопатка 2-ой ступени.

предстоит установить его длительную стойкость.

Выводы

Применение газотермических методов нанесения защитных покрытий является целесообразным как с точки зрения улучшения функциональных характеристик защищаемых деталей, так и с точки зрения экономической эффективности ввиду своей универсальности, простоты и широкой номенклатуре наносимых материалов.

Литература

1. Нечаев В. В. Перспективы применения ПГУ в Российской Федерации. — Тезисы докладов LXII научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы оптимизации технологических процессов в

конструкциях применительно к наземным ГТУ». — М.: ОАО «ВТИ», 2015 г. — 154 с.

2. Неуймин В. М. О проблемах внедрения энергоблоков ПГУ. Надежность и безопасность энергетики. 2012 №2 (14). — С. 12–17.

3. Газотермическое напыление: Учебное пособие / Колл. авт.; по общей ред. Л. Х. Балдаева. 2-е изд. М.: ООО «Старая Басманная», 2015. — 540 с.

4. Мазилин И. В. Теплозащитные материалы и покрытия на основе цирконатов РЗЭ и иттрия: дис. канд. техн. наук: 05.17.02. М.: Изд. ООО «Генезис». 2013. — 127 с.

5. Чигрин В. С., Белова С. Е. Конструкция камер сгорания и выходных устройств с ГТД: Учебное пособие. Рыбинск, РГАТА. 2006. — 75 с.

6. Рудаченко А. В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: Учебное пособие. ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Томск: Изд-во ТПУ. 2010. — 217 с.

7. Курников А. С., Орехов В. А., Ефремов С. Ю. Технология судоремонта. Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2008. — 240 с.

