

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН
ИМПОРТНЫХ ГТД**

Бердник О.Б., Царева И.Н., Тарасенко Ю.П., Кривина Л.А., Кириков С.В.
*Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – филиал ФИЦ
Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия,
irichatsareva@mail.ru*

Введение

Надежность и ресурс газотурбинных двигателей энергетических установок определяются работоспособностью таких ответственных деталей горячего тракта, какими являются рабочие лопатки турбин. В современном двигателестроении их изготавливают из жаропрочных никелевых суперсплавов: поликристаллических сплавов направленной кристаллизации (In792, CM186LC и MAR-M247), монокристаллических сплавов I-го поколения (CMSX-2, CMSX-3) и II-го поколения (CMSX-4). Рабочие лопатки являются примером практически единственного применения монокристаллических сплавов в качестве конструкционного материала. При эксплуатации рабочие лопатки подвержены механическим и вибрационным нагрузкам, эрозионному воздействию газового потока и высокотемпературному окислению. Изучение процессов старения в монокристаллических жаропрочных сплавах при длительной высокотемпературной эксплуатации (~1000 °С) представляет не только научный, но и практический интерес, так как в условиях импортозамещения как никогда актуальной стоит задача разработки ресурсосберегающей технологии продления срока службы монокристаллических рабочих лопаток импортных газотурбинных двигателей (ГТД) энергетического оборудования.

Результаты и их обсуждение

Объектом исследований являлись рабочие лопатки 1–ой ступени газовой турбины SGT-800 Siemens после отработки назначенного ресурса с наработкой ~25 000 часов. Были проведены исследования постэксплуатационного состояния материала лопаток. Химический анализ, проведенный неразрушающим методом (на анализаторе Olympus delta premium), показал, что лопатки изготовлены из монокристаллического жаропрочного сплава CMSX-4 (сплав II поколения с температурой полного растворения γ' -фазы – 1286 °С). Элементный состав сплава: 9 % Co; 6,5 % Cr; 6,0 % Ta; 6,0 % W; 6,5 % Ta; 5,6 % Al; 3 % Re; 1 % Ti; 0,6 % Mo; 0,1 % Hf. На рабочих лопатках после эксплуатации обнаружены дефекты механического происхождения (забоины на перовой части), выгорание средней части реборды, отслоения теплозащитного покрытия диоксида циркония (на входной и выходной кромках, в зоне охлаждающих отверстий, вблизи реборды). Шероховатость покрытия (измеренная с помощью профилометра TR200) составляет по параметру $R_a = 1,6$ мкм, материала замковой части составляет $R_a = 0,25$ мкм. Неразрушающий микроструктурный анализ (на оптическом микроскопе USB Digital Microscope и электронном микроскопе VEGA TESCAN II) показал, что материал лопаток имеет кондиционное состояние (рисунок 1), представляющее собой монокристаллическую микроструктуру с дендритным строением (с расстоянием между осями дендритов ~120 мкм). Так как структура материала за время эксплуатации (~25 000 часов) не претерпела существенных изменений (рисунок 1а), то восстановительная термическая обработка после наработки не требуется. Твердость материала лопаток (измеренная ультразвуковым твердомером MET-U1) составляла для перовой части $HV = 320 - 370$ кг/мм², для замковой части ~ 380 кг/мм².

Для восстановления геометрических размеров реборды (в верхней части пера лопаток) предложен метод импульсной микронаплавки (на аппарате NOVAPAX SW-V01). В качестве наплавочных материалов были апробированы: проволока из жаропрочного никелевого сплава ЭП648 и полоски из монокристаллического сплава (элементный состав: W-9,87 %; Co-9,38 %; Al-6,09 %; Cr-4,58 %; Mo-1,09 %; Re-4,25 %; Ta-3,44 %; Nb-1,08 %, Ni–остальное).

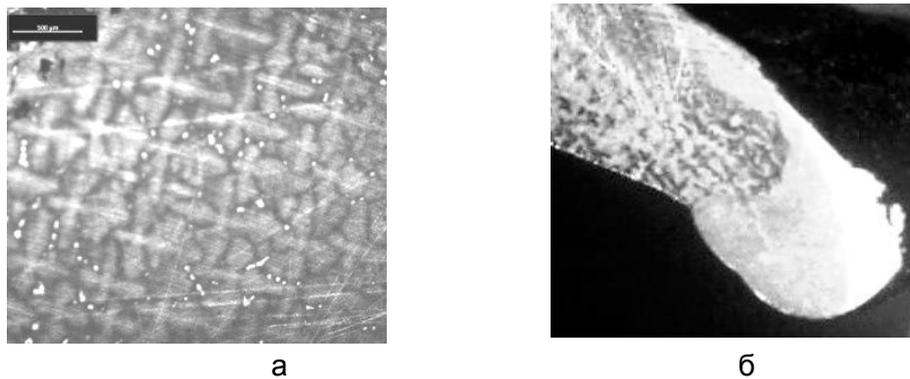


Рисунок 1 – Микроструктура материала рабочих лопаток 1-ой ступени SGT-800: а - в постэксплуатационном состоянии (x100), б - после наплавочных работ (x50)

Испытания адгезионной прочности методом микроиндентирования показали высокую прочность сцепления наплавленного металла с подложкой для обоих вариантов. На границе раздела не обнаружено трещин, сколов и отслоений. Методом оптической металлографии установлено, что вблизи границы наплавленного металла сохраняется исходная дендритная микроструктура монокристаллического сплава, что доказывает отсутствие значительного температурного воздействия при импульсной наплавке (рисунок 1б). Испытания жаростойкости (методом изотермической выдержки на воздухе при температура 1000° С в течение 300 часов) показали высокую стойкость к высокотемпературному окислению наплавленных образцов. При измерениях микротвердости наименьшее различие в показателях твердости основного и наплавленного материала установлено для варианта наплавки проволокой ЭП648. Учитывая технологичность при наплавке тонкой проволокой и результаты проведенных проб в качестве наплавочного материала была выбрана проволока (диаметром 0,8 мм) марки ЭП648.

Для защиты рабочей поверхности лопаток от высокотемпературной газовой коррозии, высокого градиента температур при пусковых нагрузках и эрозионного воздействия газового потока было разработано теплозащитное покрытие диоксида циркония, формируемое методом высокоэнергетического плазменного напыления из порошковой смеси состава ($ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$) со сферической формой частиц (размером основной фракции 80 мкм) на интерметаллидном подслое с фазовым составом ($\square\square NiAl + \square' - Ni_3Al$) [1]. Для нанесения теплозащитного покрытия использован метод высокоэнергетического плазменного напыления (на установке «Термоплазма-50-1»). За счет повышения энергетических характеристик плазменного потока (среднемассовая скорость плазменной струи $V = 2400$ м/с, среднемассовая температура $T = 6000 - 6500$ К) достигается большее проплавление частиц напыляемого материала по сравнению со стандартным плазменным методом, а увеличение кинетической энергии частиц способствует уплотнению слоев формируемого покрытия при осаждении на подложку. Полученное покрытие имеет двухфазный состав: $T - ZrO_2 + K - ZrO_2$ (~10 %) с микроструктурой слоев, состоящих из столбчатых зерен. Покрытие обладает низкой пористостью (~5 %), высокой твердостью ($HV = 950$ ГПа). По результатам проведенных высокотемпературных и термоциклических испытаний покрытие обеспечивает повышение стойкости рабочей поверхности к высокотемпературной газовой коррозии и эффективность теплозащиты рабочей поверхности (по параметру снижения температуры) не менее 120 °С.

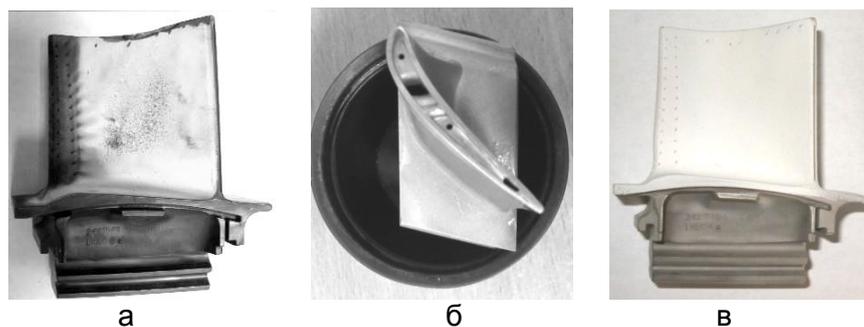


Рисунок 2 – Внешний вид рабочих лопаток 1-ой ступени газовой турбины SGT-800:
а – после эксплуатации, б – после наплавочных работ, в – восстановленная с
теплозащитным покрытием ZrO_2

На основании проведенных исследований разработана ресурсосберегающая технология продления срока службы лопаток газовых турбин SGT-800, SGT-600, SGT-400 (производства фирмы Siemens). Технологический процесс включает в себя следующие ремонтно-восстановительные операции: входной визуально-оптический контроль; анализ постэксплуатационного состояния материала (микроструктура, элементный состав, твердость, механические характеристики); удаление старого теплозащитного покрытия (абразивным и механическим методами); механическое шлифование и разделка дефектных зон под наплавку; восстановительная термическая обработка (при необходимости по результатам анализа микроструктуры материала); промежуточный контроль (микроструктура, твердость материала); восстановление геометрических размеров лопаток методом импульсной микронаплавки; механическая зачистка наплавленных зон; пескоструйная подготовительная обработка; нанесение методом высокоэнергетического плазменного напыления жаростойкого интерметаллидного подслоя и теплозащитного покрытия диоксида циркония; выходной контроль (твердость, толщина покрытия, шероховатость); калибровки отверстий охлаждающих каналов, зачистка замковых частей. Разработанная технология внедрена для продления ресурса монокристаллических рабочих лопаток 1-ой ступени, эксплуатируемых в настоящее время на тепловых электростанциях «Международная», «Коломенская» и «Крымская».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме № 0035-2014-0401 (№ госрегистрации 01201458049).

Заключение

На основании анализа постэксплуатационного состояния материала разработана и внедрена ресурсосберегающая технология продления срока службы монокристаллических рабочих лопаток газовых турбин импортных газотурбинных двигателей энергетического назначения.

Список литературы

1. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В. Структура и физико-механические свойства жаростойкого интерметаллидного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного на модернизированном плазменном оборудовании. Теплофизика и аэромеханика, 2014, т.21, №5, с.671-680.