

УДК 621.739.6.:669.245

**Н. А. Попов, В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, Е. Д. Степанова,  
Е. Н. Попова**

УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург,  
*n.a.popov@urfu.ru*

## **РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЕМЫХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД**

### **АННОТАЦИЯ**

Приведены сведения о разработках и исследованиях многослойных комплексных защитных покрытий для монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД). Изучены структура, фазовый состав комплексных покрытий и реакционной зоны взаимодействия с монокристаллическими сплавами.

*Ключевые слова:* монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, жаростойкие комплексные покрытия, структура, фазовый состав

### **ABSTRACT**

The data about the design and research of complex multi-layer protective coatings for cooled single crystal rotor blades of the high pressure turbine (HPT) has been provided. The structure, phase composition, complex reaction zone and coatings interaction with single-crystal alloys have been studied.

*Keywords:* single-crystal heat-resistant nickel alloy, heat-resistant complex coatings, structure, phase composition

Длительная эксплуатация рабочих и сопловых лопаток турбины высокого давления (ТВД) из монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) невозможна без защитных покрытий, так как современные ЖНС обладают низкой жаростойкостью при температуре эксплуатации. Несмотря на обширные литературные данные и многолетний опыт эксплуатации, выбор защитного покрытия для турбинных лопаток конкретных ГТД весьма затруднен и должен быть индивидуальным для каждого двигателя.

В настоящее время жаростойкие защитные покрытия с заданным ресурсом при высоких температурах и требуемыми свойствами возможно получить только последовательным чередованием различных технологий: газоциркуляционного метода (ГЦП), ионно-плазменной технологии (ИПП) и электронно-лучевой технологии (ЭЛП), то есть созданием комплексных защитных покрытий. ГЦП – самые эффективные и единственные покрытия

для защиты внутренней полости и перфорационных отверстий охлаждаемых лопаток турбины. ИПП – конденсационные покрытия различного типа для защиты внешней трактовой поверхности лопаток от газового потока продуктов сгорания топлива, а ЭПП – теплозащитный керамический слой  $ZrO_2$ : 8 масс. %  $Y_2O_3$ .

Созданы высокоресурсные комплексные градиентные покрытия, обеспечивающие длительную защиту монокристаллических лопаток ТВД при эксплуатации. Градиент концентраций по алюминию на границах комплексных покрытий стабилизирует его структурное и фазовое состояние, а легирование внутреннего слоя Re, Ta и W значительно повышает термостабильность за счет снижения диффузионной проницаемости, что обеспечивает высокую работоспособность композиции монокристаллический сплав – защитное покрытие (рис. 1, 2).

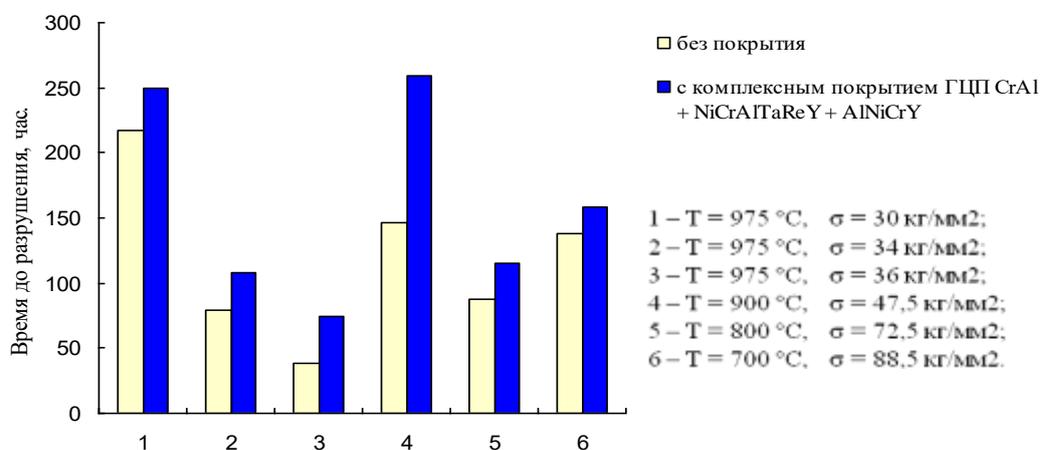


Рис. 1. Влияние температуры и напряжений на длительную жаропрочность сплава ЖС36ВИ

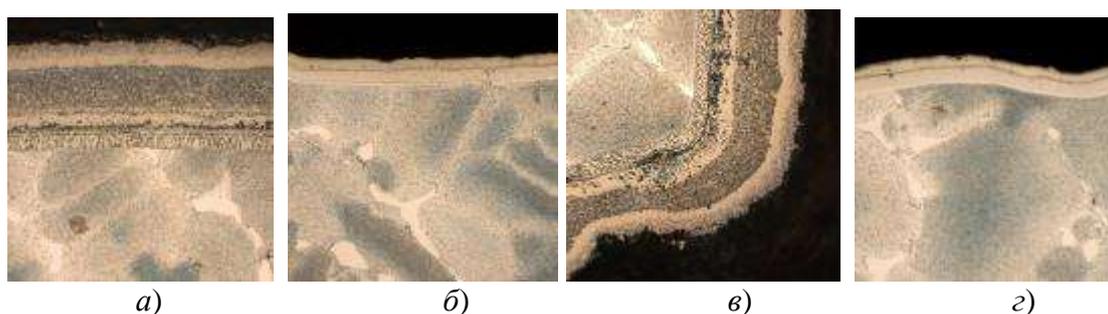


Рис. 2. Защитное комплексное покрытие на монокристаллической рабочей лопатке ТВД из сплава ЖС36ВИ с проникающей системой охлаждения  
*а)* входная кромка; *б)* охлаждающий канал; *в)* выходная кромка;  
*г)* внутренняя полость

Для защиты внешней поверхности пера охлаждаемых лопаток ТВД рассматриваются теплозащитные покрытия (ТЗП), содержащие комплексный металлический подслои и внешний керамический слой (рис. 3).

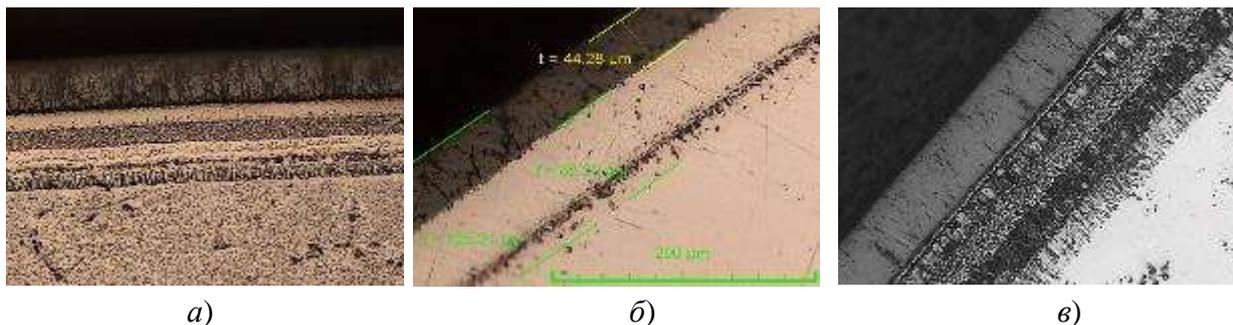


Рис. 3. Микроструктура ТЗП (ГЦП  $\text{CrAl} + \text{NiCoCrAlY} + \text{NiAl} + \text{ZrO}_2 \cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$ ) на наружной поверхности рабочей лопатки из сплава ЖС32-ВИ:  
*а)* травленая; *б, в)* без травления

Для расчетной оценки температурного и напряженно-деформированного состояния ТЗП на лопатках ТВД создана база данных физико-механических свойств всех слоев ТЗП на жаропрочном никелевом сплаве лопаток в интервале температур  $100 \dots 1200$  °С: коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), удельная теплоемкость ( $C_p$ ), коэффициент температуропроводности ( $a \cdot 10^2$ ), термический коэффициент линейного расширения ( $\alpha_t$ ), модуль упругости ( $E$ ) механические свойства ( $\sigma_{\text{изг}}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $\sigma_{\text{адгезии}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ).

Комплексные покрытия используются в серийном производстве при изготовлении рабочих и сопловых лопаток ТВД современных авиационных двигателей, а также рекомендованы для защиты от окисления охлаждаемых турбинных лопаток перспективного двигателя ПД-14.