

А. М. СМЫСЛОВ, А. А. БЫБИН, Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА  
ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ СПЛАВА ЦНК-7П

Рассматриваются результаты исследования по разработке технологии восстановительного ремонта лопаток турбины из сплава ЦНК-7П. Приведена методика ускоренных коррозионных испытаний сплава ЦНК-7П с Al-Si покрытием для опережающей разработки ремонтных мероприятий. Рассмотрены закономерности удаления дефектного Al-Si покрытия, на основе которых выбран эффективный состав электролита. Выявлены особенности влияния вакуумно-плазменной и ионно-имплантационной обработки сплава ЦНК-7П, позволяющие при их совместном сочетании повысить жаростойкость сплава в 2,35 раза, а также выносливость и жаропрочность материала более чем на 10 %. *Ремонтная технология; ускоренные испытания; удаление дефектного покрытия; имплантация поверхности; вакуумно-плазменное покрытие; комбинированная обработка*

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие энергетического комплекса связано с использованием достижений в области моторостроения. Одним из основных узлов энергоустановок является газовая турбина и наиболее ответственными деталями, определяющими ресурс изделия в целом, — рабочие лопатки. В настоящее время рабочие лопатки турбины из сплава ЦНК-7П с Al-Si покрытием в составе установки АЛ-31СТ производства ОАО «УМПО» находятся в стадии эксплуатации и имеют наработку порядка 9 тыс. ч. На значительный межремонтный ресурс изделия составляет 10 тыс. ч, после которого лопатки должны поступить на ремонт. Однако ремонтная технология данных деталей в серийном производстве отсутствует, и ее разработка является актуальной задачей. Для решения проблемы удаления дефектного покрытия и ускоренной оценки эффективности ремонтных мероприятий в условиях отсутствия информации о состоянии лопаток требуется проведение специальных исследований по моделированию повреждаемости их поверхности [1].

Следует отметить также, что ряд предприятий отрасли, например, ООО «Волготрансгаз», ЗАО НПК «Трибоника», ОАО «Уральский турбомоторный завод» и др., указывают о необходимости включения в ремонтные технологии более перспективных методов обработки ввиду того, что лопатки рассматриваемого типа не выдерживают гарантированного ресурса [2]. Такими методами являются ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности, а также их комбинирование, позволяющие в значительной мере увеличить ресурс рабочих лопаток [3, 4].

Целью проведенного комплекса работ является исследование возможности повышения эксплуатационных свойств лопаток турбины из сплава ЦНК-7П на стадии их восстановительного ремонта путем удаления дефектного Al-Si покрытия и комбинированного ионно-имплантационного и вакуумно-плазменного модифицирования поверхности.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Для разработки конструктивных решений по созданию опережающей технологии ремонта в первую очередь изучался вопрос моделирования про-

цессов накопления наиболее значимых повреждений и подбора эффективного способа удаления дефектного покрытия. В работах [5-7] такое моделирование осуществлялось с применением методов ускоренных испытаний. Как показывает анализ литературных данных, наиболее значимым фактором, лимитирующим долговечность покрытия, являются его жаро- и коррозионная стойкость, зависящие от максимальной температуры газа и агрессивности среды, более полно проявляющиеся при использовании тигельного метода испытаний. Однако существующие методики ускоренных испытаний тигельным методом характеризуются рядом недостатков: не отражается в полной мере состав газозооного тракта двигателя, время испытания колеблется от 40 до 100 ч, используется несколько операций. Поэтому необходимо разработать более эффективный состав агрессивной среды и обеспечить минимальное время при простой технологии данных испытаний.

Анализ работ [8-10], а также опыт авиационных предприятий, показали, что для удаления дефектных покрытий в условиях серийного производства наиболее приемлемым является химический метод. Однако удаление Al-Si покрытия химическим методом проводится при температуре 40-50 °С с использованием растворов плавиковой кислоты, которая обладает высокой токсичностью и не поддается утилизации. С целью снижения экологической нагрузки на производство необходимо выявить эффективные растворы с менее токсичными компонентами, позволяющие производить сьем дефектных покрытий при комнатной температуре.

Наносимое в серийном производстве шликерное Al-Si покрытие обладает рядом существенных недостатков: не обеспечивается однородность по толщине покрытия, имеют место инородные включения и мелкие рассеянные поры. По данным работ [11-13] устранение указанных недостатков может быть достигнуто использованием вакуумно-плазменных жаростойких покрытий. Так, на двигателе АЛ-31Ф для защиты рабочих лопаток I-ой ступени ТВД успешно применяется покрытие ВСДП-11, наносимое методом ВПТВЭ [14]. Покрытие имеет элементный и фазовый состав подобный Al-Si покрытию, однако, за счет дополнительного легирования иттрием и меньшего содержания алюминия обладает большей пластичностью и адгезионной прочностью, обеспечивая повы-

шение жаростойкости и долговечности материала сплава. Однако из литературы известно о применении покрытия ВСДП-11 для материалов лопаток авиационных турбин, и практически отсутствуют данные о его использовании для материалов энергоустановок наземного применения.

Повышение эксплуатационных свойств материалов за счет имплантации их поверхности изложено в работах [15, 16]. По данным работы [17] большое влияние на свойства материала оказывает сорт имплантируемого элемента. Авторы работы [16] отмечают, что наибольшая жаростойкость конструктивных материалов достигается при имплантации в их поверхность ряда редкоземельных элементов, таких как лантан, церий, самарий, иттербий. При этом среди указанных редкоземельных элементов наиболее положительным значением теплоты образования обладают оксиды иттербия [18]. Так, имплантация иттербием поверхности чистого никеля приводит к значительному снижению его окисляемости [19]. Рассмотренные данные свидетельствуют о перспективности применения иттербия в качестве микролегирующей добавки.

Достижение необходимого уровня легирования поверхности материала обеспечивается за счет выбора эффективной дозы облучения. Однако не существует единого подхода к выбору эффективной дозы имплантации. По данным работ [16, 20] оптимальной дозой для имплантации сплава ЖС32 лантаном является доза  $10^{17}$ , чистого никеля иттербием —  $6 \times 10^{17}$ , церием —  $2 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Поэтому для имплантации иттербием сплава ЦНК-7П выбор режима обработки является важной задачей, тем более, что в литературе практически отсутствуют сведения о влиянии имплантации иттербием поверхности никелевых сплавов на их эксплуатационные свойства.

В работах [4, 21] показано, что наиболее перспективным методом повышения ресурса высоконагруженных деталей является комбинированное ионно-имплантационное и вакуумно-плазменное модифицирование поверхности. Для деталей паровых турбин из титановых сплавов BT6 и TC-5 и сталей 20X13 и 15X11МФ использование комбинированной обработки (имплантация  $N^+$  с последующим нанесением покрытия Ti-TiN) позволило повысить фреттинг-стойкость до 4 раз и предел выносливости на 9-14 %, а для деталей авиационных ГТД — при имплантации  $B^+$  в сплав ЖС6У и  $La^+$  в покрытие системы NiCrAlY удалось увеличить жаростойкость в 1,5 раза. Однако вопросы использования комбинированной обработки материалов из никелевых сплавов, используемых в энергоустановках наземного применения, освещены слабо.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались образцы и натурные лопатки из никелевого сплава ЦНК-7П с равноосной структурой, полученные литьем в горячие керамические формы. Образцы и лопатки после механической обработки проходили термическую обработку в соответствии с требованиями ТУ 1-809-1079-98.

В качестве защитных покрытий использовались шликерное Al-Si покрытие и вакуумно-плазменное покрытие ВСДП-11. В качестве имплантанта при проведении имплантационного модифицирования поверхности сплава ЦНК-7П применялись ионы ит-

тербия. Диффузионный отжиг образцов и лопаток с покрытиями осуществлялся в вакуумной высокотемпературной печи.

При проведении исследований использовались специально разработанные методики: ускоренных коррозионных испытаний [22], оценки циклической термостойкости [23], определения съема покрытия и измерения электродного потенциала [24]. Кроме того, по стандартным методикам выполнено измерение жаростойкости (ГОСТ 6130-71), усталостной (ГОСТ 25.502-81) и длительной прочности (ГОСТ 10145-81), микротвердости (микротвердомер ПМТ-3М) и шероховатости поверхности (профилометр 283), проведен металлографический (микроскоп марки METAVAL®), рентгеноструктурный (дифрактометр PW-1800, Philips) и микрорентгеноспектральный анализ (электронный микроскоп JXA-6400 JEOL), изучены масс-спектры вторичных ионов (масс-спектрометр MC-7201M).

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЛОПАТОК В УСЛОВИЯХ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

При разработке методики ускоренных испытаний для создания коррозионных повреждений в Al-Si покрытии на сплаве ЦНК-7П на первоначальном этапе были выявлены наиболее эффективные условия испытаний. При выборе эффективного состава синтетической золы по литературным данным был проанализирован состав синтетических зол и золотых отложений на лопатках из никелевых сплавов отечественного и зарубежного производства. Установлено, что наиболее характерными компонентами большинства зол являются сульфаты и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов, а также оксиды некоторых металлов [5, 6]. С учетом диаграмм состояния, температур плавления и физико-химических свойств веществ выявлено функциональное действие каждого из компонентов золы и выбран следующий состав синтетической золы:  $Na_2SO_4$  - 48 %;  $MgSO_4$  - 15 %;  $NaCl$  - 17 %;  $CaCl_2$  - 5 %;  $Fe_2O_3$  - 10 %;  $V_2O_5$  - 5 % [25]. Испытания проводились по усовершенствованному методу Дина, в отличие от которого образцы размещались в том же тигле, где находилась синтетическая зола [22].

При оценке температуры испытания учитывался конструктивно назначенный диапазон температур эксплуатации (750-850 °С), а также данные работ [6, 12] по ограничению работоспособности материала лопаток вследствие протекания высокотемпературной коррозии. На основе сопоставления указанных данных была выбрана температура испытаний, равная 900 °С.

По результатам изучения динамики удельной массы образцов (рис. 1) установлено наличие инкубационного периода, этапов ускоренной и катастрофической коррозии.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что при коррозии образцов без покрытия инкубационный период связан с первоначальным окислением поверхности с образованием защитных слоев. После данного периода начинается процесс ванадиевой коррозии. Соединения ванадия, разрушая оксидную пленку на сплаве, способствуют активизации процесса коррозии.

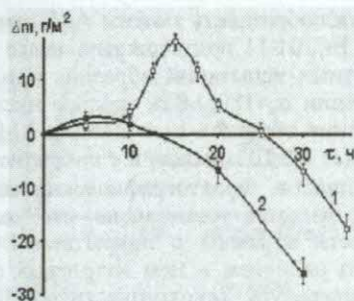


Рис. 1. Изменение удельной массы образцов из сплава ЦНК-7П в процессе испытания на высокотемпературную коррозию в синтетической золе при температуре 900 °С: 1 — с Al-Si покрытием; 2 — без покрытия

Появление значительного количества оксидов никеля после 15 ч испытания свидетельствует о наступлении этапа катастрофической коррозии. При испытании образцов с Al-Si покрытием продолжительность отдельных этапов коррозии увеличивается в 1,5-2 раза. В данном случае инкубационный период также связан с наличием защитных оксидных слоев, но уже через 5 ч испытания проявляется сульфидно-оксидная коррозия. Повреждение поверхности покрытия способствует проникновению в него оксидов ванадия и протеканию ванадиевой коррозии. Наличие двух видов коррозии способствует значительному увеличению массы образцов и отражается на кривой в виде экстремума. Постепенно ванадиевая коррозия подавляет сульфидно-оксидную коррозию, что приводит к сильному разрыхлению поверхностных слоев и последующему сколу продуктов коррозии, в результате чего масса образцов резко снижается. Исследованиями установлено отсутствие покрытия в данный момент времени, в результате чего далее на этапе катастрофической коррозии процесс протекает аналогично образцам из сплава ЦНК-7П, на которые защитное покрытие не наносилось. Результаты металлографического анализа подтвердили высказанные предположения и показали, что за 8-10 ч коррозия проникает на всю глубину покрытия, не затрагивая поверхности сплава. Составление фазового состава продуктов коррозии, полученных в течение указанного времени, с данными работы [6] по коррозионной повреждаемости натуральных лопаток газовых турбин после их наработки в течение 10-15 тыс. ч, позволяет установить аналогичность коррозионных процессов при искусственной наработке и процессах, протекающих в условиях реальной эксплуатации деталей в составе изделия.

#### 4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОГО Al-Si ПОКРЫТИЯ

Исследования по химическому удалению Al-Si покрытия с производственными и эксплуатационными дефектами проводились с использованием травильного раствора, содержащем кислоты HCl и HNO<sub>3</sub> с добавками K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>. Раствор данного состава используется в ОАО «УМПО» для съема комплексного покрытия NiCrAlY с лопаток турбины из сплава ЖС6У при температуре 40 °С. Следует отметить, что комплексное покрытие NiCrAlY и никелевый сплав ЖС6У отличаются от защитного Al-Si покрытия и сплава ЦНК-7П как методом получения, так химическим и фазовым составом. Ввиду этого необходимым является оценка воз-

можности применения указанного электролита для решения поставленной задачи. Расширение номенклатуры ремонтируемых деталей с использованием серийного электролита, даже при необходимости его корректировки, позволит более полно использовать производственные мощности гальванического участка на ОАО «УМПО».

На рис. 2 представлены диаграммы скоростей съема покрытия в зависимости от концентрации добавок. Аналогичные диаграммы были получены и для глубины растратов по поверхности сплава после удаления покрытий. Установлено, что скорость удаления покрытий в растворах без добавок имеет минимальное значение, и отмечается значительное растравливание поверхности сплава. Введение отдельных добавок способствует ускорению процесса съема покрытий за счет их окислительных свойств, а бихромат калия способствует пассивации поверхности никелевого сплава вследствие образования тонких слоев оксохроматов никеля [26]. При совместном использовании обеих добавок проявляется синергетический эффект, обусловленный постоянной регенерацией молибдат-ионов, которые инициируют процесс пополнения в растворе дополнительных ионов Cr<sup>3+</sup>, усиливающих эффект пассивации поверхности покрытия и сплава.

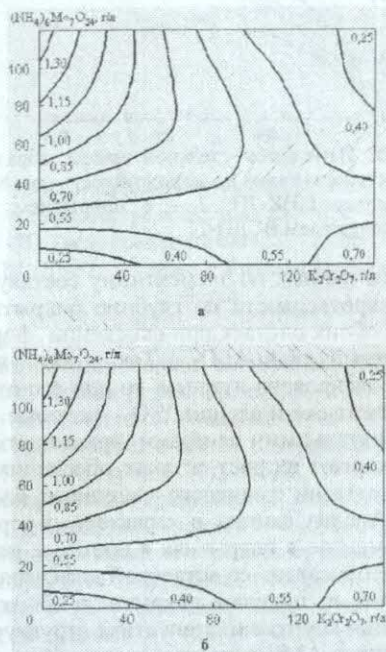


Рис. 2. Зависимость скорости удаления покрытия с производственными (а) и эксплуатационными (б) дефектами (мг/см<sup>2</sup>·мин) от концентрации добавок

Закономерности, установленные для образцов с наработкой и без наработки, в основном, аналогичны. Однако среднее значение скоростей травления покрытия с наработкой оказывается ниже в связи с наличием химически стойких продуктов коррозии. Результаты исследований подтверждены измерениями электродных потенциалов поверхности в ходе процесса травления. Установлено, что момент резкого спада величины электродного потенциала поверхности отвечает времени полного удаления покрытия и может быть использован в качестве критерия останова процесса химического травления [24].

Объем проведенных исследований позволил установить эффективные составы травильных растворов: для покрытия с производственными дефектами – раствор с добавкой 145-160 г/л  $K_2Cr_2O_7$ , а с эксплуатационными дефектами – раствор с дополнительным введением 55-65 г/л  $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ . Рекомендованные растворы позволяют осуществить съем покрытия при комнатной температуре за время 60-65 мин с обеспечением требуемого качества поверхности и снизить концентрацию гептамолибдата аммония.

### 5. ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СПЛАВА ЦНК-7П

В связи с необходимостью оценки возможности замены Al-Si покрытия на покрытие ВСП-11 проведены сравнительные испытания образцов с указанными покрытиями на жаростойкость, термостойкость и выносливость. Установлено, что Al-Si покрытие толщиной 50 мкм повышает жаростойкость сплава на 30 %, а покрытие ВСП-11 толщиной 55 мкм – на 50 % (рис. 3).

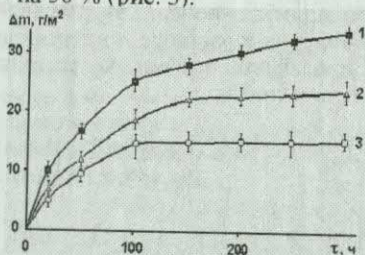


Рис. 3. Изменение удельной массы образцов в процессе испытания на жаростойкость при 850 °C: 1 – сплав ЦНК-7П; 2 – с покрытием Al-Si; 3 – с покрытием ВСП-11

Анализ данных по элементному составу и изменению микротвердости по глубине покрытий показал, что в обоих случаях при окислении формируется защитный слой  $Al_2O_3$ . Так как покрытие ВСП-11 легировано иттрием, то при его окислении образуются также и оксиды  $Y_2O_3$ , которые являются дополнительными центрами кристаллизации оксидов, ускоряют их рост, а также обеспечивают повышение адгезии защитного оксидного слоя к покрытию. Анализ данных о характере перераспределения элементов в покрытиях в процессе испытания показал, что в связи со встречной диффузией кремния в сплав и никеля в покрытие в обоих случаях формируется хрупкая мартенситная структура. Установлено, что в Al-Si покрытии такая структура образуется как под оксидным слоем у поверхности, так и на границе внешней и внутренней зон покрытия. В случае покрытия ВСП-11 формирование мартенситной структуры обнаружено только под оксидным слоем у поверхности образца, что предотвращает сколы внешней зоны и обеспечивает сохранение защитных свойств покрытия.

Исследовано влияние толщины защитного покрытия ВСП-11 на жаростойкость и циклическую термостойкость сплава. Показано, что с увеличением толщины от 30 до 70 мкм жаростойкость увеличивается в 1,4 раза, что связано с большим запасом алюминия в покрытии, а термостойкость уменьшается в 1,2 раза вследствие снижения пластичности более толстых покрытий. Установлено, что эффективной толщиной защитного покрытия ВСП-11 является толщина 50-55 мкм [23].

Целесообразность замены Al-Si покрытия на покрытие ВСП-11 подтверждена также результатами усталостных испытаний образцов при 600 °C. При напряжении  $\sigma_a=180$  МПа среднее число циклов до разрушения образцов с защитным Al-Si покрытием составляет  $2,2 \cdot 10^7$  циклов, а с покрытием ВСП-11 –  $2,5 \cdot 10^7$  циклов. Фрактографическим анализом усталостных изломов установлено, что увеличение выносливости образцов с покрытием ВСП-11 обусловлено наличием в нем иттриевых фаз, снижающих температуру хрупко-пластического перехода и повышающих пластичность покрытия. При 600 °C в Al-Si покрытии в условиях повышенной хрупкости фазы  $\beta$ -NiAl образуются микротрещины, инициирующие ускорение усталостного разрушения образцов.

С целью дополнительного повышения уровня эксплуатационных свойств сплава ЦНК-7П проведена имплантация его поверхности ионами иттербия. При исследовании влияния модифицирования поверхности сплава ионами иттербия с использованием теории Линхарда, Шарфа и Шютта с дополнительным учетом параметров, характеризующих распыление поверхности подложки при облучении, был рассчитан теоретический профиль распределения иттербия по глубине поверхностного слоя никеля. Установлено, что максимальная глубина проникновения ионов составляет 18 нм, а эффективной дозой облучения является  $D=5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, выше которой происходит интенсивное распыление поверхности, а ниже – не достигается ее насыщение [18]. Учитывая результаты теоретического расчета и различия в химическом и фазовом составе никеля и сплава ЦНК-7П, для исследования был выбран диапазон доз от  $10^{16}$  до  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

Исследования по изучению масс-спектров вторичных ионов, микротвердости, ее распределения по глубине, жаростойкости сплава, электродного потенциала поверхности при дозах облучения от  $10^{16}$  до  $2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> показали, что при  $D=5 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> достигается максимальное содержание иттербия и его оксидов в поверхностном слое сплава, степень и глубина упрочнения, минимальная скорость окисления при 850 °C и наибольшая пассивация поверхности (рис. 4).

Установлено также, что при данной дозе облучения физический предел усталостной прочности и жаропрочность сплава повышаются более чем на 10 % по сравнению с исходным состоянием. Улучшение физико-химических и эксплуатационных характеристик сплава ЦНК-7П при имплантации в его поверхность ионов иттербия обусловлено действием в поверхностном слое дислокационного, твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения.

На следующем этапе выполнено исследование по влиянию комбинированной ионно-имплантационной и вакуумно-плазменной обработки поверхности сплава ЦНК-7П на его эксплуатационные свойства. Установлено, что комбинированная обработка поверхности, включающая на первом этапе имплантацию иттербия, а на втором – нанесение покрытия ВСП-11 толщиной 55 мкм, в совокупности обеспечивает, в сравнении с серийным покрытием ВСП-11, повышение жаростойкости в 2,35 раза, увеличение выносливости в 1,2 раза и жаропрочности в 1,6 раза (рис. 5-7).

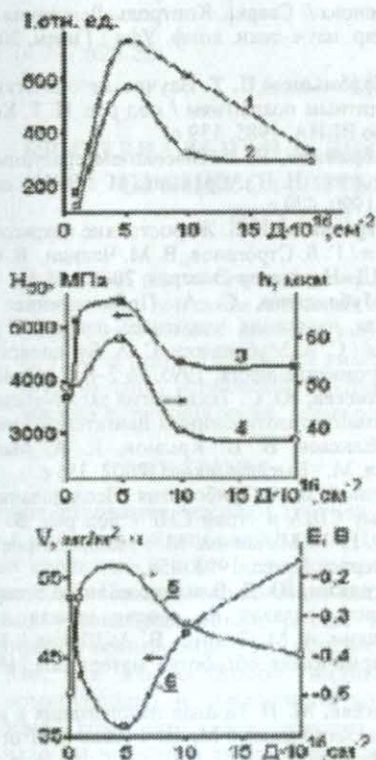


Рис. 4. Зависимость содержания иттербия (1) и его оксидов (2), микротвердости поверхности (3), глубины упрочнения (4), величины электродного потенциала поверхности (5) и скорости окисления сплава ЦНК-7П ионами иттербия при  $E=30$  кэВ

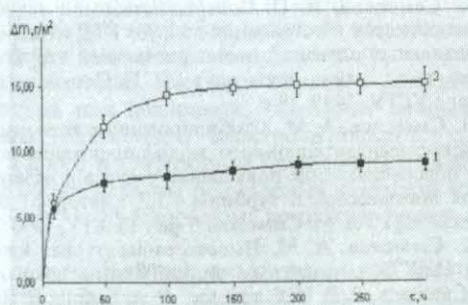


Рис. 5. Изменение удельной массы образцов с покрытием ВСДП-11 с наличием имплантированного подслоя (1) и без модифицирования подложки сплава (2) при температуре 850 °С

Металлографические исследования и фрактографический анализ изломов показали, что при комбинированной обработке создается композиция «покрытие - поверхностный слой сплава», характеризующаяся оптимальным содержанием легирующих элементов и дислокационным упрочнением поверхностных слоев сплава. Такая композиция обеспечивает увеличение пластичности покрытия и торможение взаимной диффузии элементов сплава и покрытия, обуславливая повышение жаростойкости. Формирование развитой дислокационной структуры в поверхностных слоях сплава вызывает наведение остаточных напряжений сжатия и упрочнение межзеренных границ, что способствует снижению скорости распространения усталостных трещин.

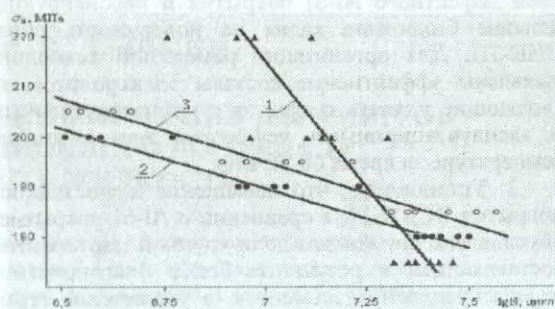


Рис. 6. Кривые усталости при температуре испытания 600 °С: 1 - сплав ЦНК-7П (исходное состояние); 2 - сплав + покрытие ВСДП-11; 3 - сплав + комбинированная обработка

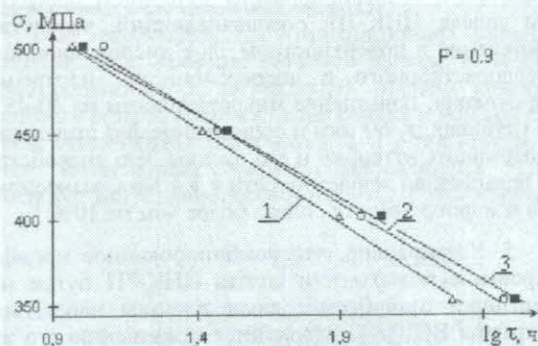


Рис. 7. Кривые длительной прочности при температуре испытания 850 °С: 1 - сплав ЦНК-7П (исходное состояние); 2 - сплав + покрытие ВСДП-11; 3 - сплав + комбинированная обработка

Положительные результаты по имплантационному модифицированию иттербием поверхности никелевого сплава позволили разработать соответствующую технологию и внедрить ее на ФГУП «НПП «Мотор» для рабочих лопаток II ст. силовой турбины изд. ГТП-10/953 на базе ТРД Р95Ш.

Положительные результаты исследований позволили разработать ремонтно-восстановительную технологию для лопаток турбины из сплава ЦНК-7П, обеспечивающую повышение ресурса в 1,2 раза по сравнению с ресурсом серийных лопаток. Данная технология принята в ОАО «УМПО» для обработки опытной партии лопаток с дальнейшей постановкой их на длительные испытания в составе серийного изделия.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые для опережающей разработки ремонтных мероприятий и оценки их эффективности создана методика ускоренных испытаний сплава ЦНК-7П с Al-Si покрытием (патент РФ № 2247359), позволяющая за время 8-10 ч получить коррозионные повреждения поверхности лопаток, аналогичные их повреждениям за 10 тыс. ч наработки в составе изделия.
2. На основе анализа физико-химических процессов взаимодействия компонентов травильного раствора и гетерофазных процессов на границе «поверхность детали - электролит» установлено уско-

ряющее действие добавок  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  и  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  на сьем дефектного Al-Si покрытия и пассивирующее влияние бихромата калия на поверхность сплава ЦНК-7П. Для организации ремонтной технологии выявлены эффективные составы электролитов, позволяющие удалять покрытие с производственными и эксплуатационными дефектами при комнатной температуре за время 60-65 мин.

3. Установлено, что повышение жаростойкости покрытия ВСДП-11, в сравнении с Al-Si покрытием, обусловлено снижением доли хрупкой мартенситной составляющей в результате более благоприятного перераспределения элементов, а увеличение термостойкости и выносливости связано с блокирующим действием иттриевых фаз во внешней зоне покрытия. Показана эффективность замены Al-Si покрытия на покрытие ВСДП-11 толщиной 50-55 мкм.

4. Впервые разработан режим ионно-имплантационного модифицирования иттербием поверхности сплава ЦНК-7П, обеспечивающий, вследствие протекания в поверхностном слое дислокационного, твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения, повышение микротвердости на 40-45 % на глубинах до 60 мкм и образование фаз выделения, содержащих иттербий и его оксиды, что способствует повышению жаростойкости в 1,4 раза, выносливости и жаропрочности сплава более чем на 10%.

5. Установлено, что комбинированное модифицирование поверхности сплава ЦНК-7П путем имплантации иттербием с последующим нанесением покрытия ВСДП-11 приводит к повышению его жаростойкости в 2,35 раза с обеспечением выносливости и жаропрочности в соответствии с требованиями технических условий на лопатки турбины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметзянов, А. М. Принципы эквивалентности в технике и жизни / А. М. Ахметзянов, В. С. Жернаков. М.: МАИ, 1996. 182 с.
2. Тарасенко, Ю. П. Оценка эксплуатационного состояния лопаток ГНД агрегата ГТК-25И и технология продления их ресурса / Ю. П. Тарасенко, Ю. К. Леванов, И. Н. Царева [и др.] // Газотурбинные технологии. 2004. № 10. С. 26-29.
3. Каблов, Е. Н. Перспективы применения ионно-плазменной технологии высоких энергий для межресурсного ремонта лопаток турбин / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, Ю. Д. Ягодкин // Авиационные материалы и технологии. Серия «Ремонтные технологии в авиастроении». М.: ВИАМ, 2002. С. 6-13.
4. Каблов, Е. Н. Перспективы применения в авиадвигателестроении ионной технологии / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, А. М. Сулима [и др.] // Авиационная промышленность. 1992. № 9. С. 9-12.
5. Гецов, Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин / Л. Б. Гецов. М.: Недра, 1996. 591 с.
6. Никитин, В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / В. И. Никитин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987. 272 с.
7. Орышич, И. В. Совершенствование методики испытания материалов на стойкость к высокотемпературной солевой коррозии / И. В. Орышич, А. Н. Ракицкий, Н. Е. Порядченко [и др.] // Защита металлов. 1994. Т. 30, № 4. С. 423-426.
8. Амирханова, Н. А. Исследование закономерностей химического травления жаропрочных покрытий с лопаток ГТД / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, С. П. Павлинич и др. // Изв. вузов. Авиат. техника. 1997. № 1. С. 96-97.
9. Павлинич, С. П. Технологический процесс ремонта лопаток ГТД / С. П. Павлинич, Р. Р. Невьянцева, И. П. Семенова // Сварка. Контроль. Реновация - 2001 : тр. I Междунар. науч.-техн. конф. Уфа : Гилем, 2001. С. 228-232.
10. Коломыцев, П. Т. Научно-методические материалы по защитным покрытиям / под ред. П. Т. Коломыцева. М.: Изд-во ВВИА, 1985. 139 с.
11. Абраимов, Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия / Н. В. Абраимов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1990. 479 с.
12. Строганов, Г. Б. Жаростойкие покрытия для газовых турбин / Г. Б. Строганов, В. М. Чепкин, В. С. Терентьева. М.: ИД «Навигатор-Экстра», 2000. 163 с.
13. Мубояджян, С. А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Авиационная промышленность. 1995. № 7-8. С. 44-48.
14. Елисеев, Ю. С. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, К. А. Малиновский. В. Г. Попов. М.: Высшая школа, 2002. 355 с.
15. Белый, В. А. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон Пресс, 1993. 454 с.
16. Ягодкин, Ю. Д. Влияние ионного легирования на жаростойкость сплавов на основе никеля и титана / Ю. Д. Ягодкин, А. М. Сулима, В. А. Шулов // Металловедение и термическая обработка материалов. 1989. № 10. С. 38-43.
17. Гусева, М. И. Ионная имплантация в неподупродниковые материалы / М. И. Гусева // Итоги науки и техники. М., 1989. Т. 5. С. 5-49.
18. Диденко, А. Н. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов / А. Н. Диденко, А. Е. Лигачев, И. Б. Куракин. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с.
19. Ягодкин, Ю. Д. Влияние ионной имплантации иттербием на жаростойкость никеля / Ю. Д. Ягодкин, А. А. Дальский, О. А. Шадрин // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 4. С. 15-17.
20. Семенова, И. П. Совершенствование технологических процессов изготовления лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов с монокристалльной структурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. П. Семенова. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 18 с.
21. Смыслов, А. М. Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Смыслов. Уфа: УГАТУ, 1993. 40 с.
22. Смыслов, А. М. Высокотемпературная коррозия сплава ЦНК7П с защитным алюминидным покрытием / А. М. Смыслов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, Е. В. Парфенов // Защита металлов. 2004. Т. 40, № 5. С. 553-556.
23. Смыслов, А. М. Некоторые особенности высокотемпературного окисления алюминидных покрытий на сплаве ЦНК7П / А. М. Смыслов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 8. С. 31-36.
24. Амирханова, Н. А. Роль электродного потенциала поверхности при изучении процесса удаления алюминидного покрытия с рабочих лопаток турбины ГПА / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, О. Г. Смольникова // Вестник УГАТУ. 2003. Т. 4, № 2. С. 143-146.
25. Пат. РФ 2247359 G 01 N 17/00. Способ ускоренного испытания алюминидного покрытия на высокотемпературную коррозионную долговечность / А. М. Смыслов, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, Е. В. Парфенов, И. П. Семенова, О. Г. Смольникова. Оpubл. 2005. Бюл. № 6.
26. Коняев, Б. Я. Пассивация никеля в хроматных растворах / Б. Я. Коняев // Защита металлов. 1997. № 6. С. 737-740.