



УДК 621.793.12

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭРОЗИОННО- И ЖАРСТОЙКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД СПОСОБОМ МИКРОЭЛЕКТРОДУГОВОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВАКУУМНОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. Дабижа<sup>2</sup>, А. А. Лещук<sup>1</sup>, И. В. Бондарь<sup>2</sup>, Н. Н. Борисова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины

04074, Киев, ул. Автозаводская, 2

E-mail: leshchuk@ism.kiev.ua

<sup>2</sup>МГНПВП «ЭКМА» НАН Украины

04074, Киев, ул. Автозаводская, 2

E-mail: ekma.ua@gmail.com

Обоснованы технологические и аппаратурные возможности применения плазменно-дуговой технологии и вакуумного оборудования для создания многослойных эрозионно- и жаростойких покрытий с целью повышения эрозионной стойкости компрессорных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Разработаны новые технологические и аппаратурные решения, позволяющие наносить эрозионно- и жаростойкие покрытия из многокомпонентных сплавов способом ионно-плазменного распыления путем использования составной мишени катода планарного дуготрона. Проведены исследования эрозионной стойкости образцов с многослойным покрытием на основе карбида и нитрида титана, показавшие перспективность применения данного способа нанесения покрытий в качестве защитных на лопатки ГТД. Показано, что ремонтные лопатки ГТД, содержащие очень тонкие и средние усталостные микротрещины, а также не очень глубокие микротрещины, полностью восстанавливаются в процессе конденсации с ионной бомбардировкой и последующего заравнивания трещин путем нанесения на ее поверхность толстого (15 мкм) покрытия из материала лопатки. Библиогр. 8, ил. 11.

**Ключевые слова:** плазменно-дуговой способ нанесения покрытий; эрозионно- и жаростойкие покрытия; карбид титана; нитрид титана; катод; составная мишень; лопатки ГТД; эрозионная стойкость; пластичная прослойка; кобальт; усталостная трещина; заравнивание трещин

Сегодня в мире активизированы исследования, направленные на увеличение ресурса работы газотурбинных двигателей (ГТД). Однако с повышением рабочих температур ГТД необходимо увеличивать теплостойкость элементов горячего тракта двигателя, например рабочих лопаток, а также эрозионную стойкость компрессорных лопаток газовых турбин.

Несмотря на существенное улучшение различных свойств лопаток ГТД до настоящего времени в значительной степени слабым звеном являются турбины, что предопределяет целесообразность дальнейшего совершенствования методологии проектирования лопаток турбин с покрытием, создания новых составов, структуры, архитектуры и свойств покрытий, способов и процессов их получения. Наряду с повышением жаропрочности и коррозионной стойкости материала, из которого

изготавливаются лопатки, эффективным способом является нанесение на них жаростойких покрытий.

Жаростойкие покрытия предназначены для защиты поверхностей лопаток от высокотемпературной коррозии в активных газах за счет образования на них плотной оксидной пленки, которая имеет высокую прочность сцепления с покрытием. Различают жаропрочные покрытия из металлических, неметаллических и комбинированных соединений. Для лопаток турбин наиболее приемлемыми являются металлические жаропрочные покрытия. Основой для данных покрытий являются сплавы или интерметаллические соединения титана, алюминия, хрома, кобальта, иттрия и др. [1, 2].

В связи с этим актуальной является возможность исследовать формирование сплавов на основе указанных металлов способом микроэлектродугового ионно-плаз-



Рис. 1. Модернизированная установка для микродугового вакуумного нанесения покрытий ВУ-2МБС (М)

менного распыления, который, как правило, применяется при распылении на одном дуготроне одного металла или для распыления одного металла в реакционном газе для получения необходимых соединений.

Для изучения формирования сложных сплавов путем одновременного распыления различных металлов из одной мишени катода изготовлены комплексные (составные) катоды из титана и алюминия, а также из титана, алюминия и хрома. Исследования проводили на установке ВУ-2МБС (М) с модернизированными планарными дуготронами с прямым охлаждением мишени катода. Внешний вид модернизированной установки представлен на рис. 1.

Диаметр вакуумной камеры установки составляет 700, высота — 750 мм. Блок-схема установки приведена на рис. 2. Установка оснащена двумя дуготронами для поочередного или одновременного микродугового вакуумного ионно-плазменного испарения двух материалов. Дуготроны с прямым водяным охлаждением мишени катода разработаны и изготовлены взамен дуготронов с косвенным охлаждением мишени. Они позволяют осуществлять процессы при более высоком токе дуги и, таким образом, интенсифицировать напыление, а также испарять более тугоплавкие материалы. Прямое охлаждение мишени является важным условием при рас-

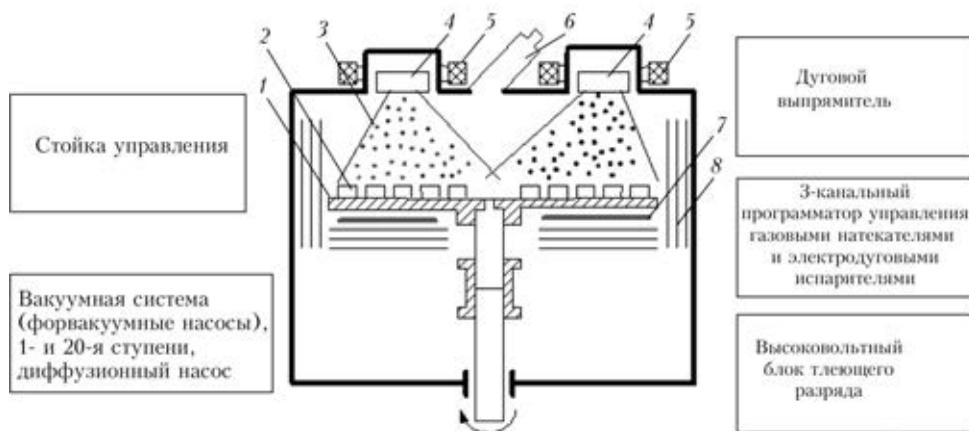


Рис. 2. Блок-схема модернизированной вакуумной установки ВУ-2МБС (М): 1 — столик для размещения образцов; 2 — образцы; 3 — паровой поток; 4 — микродуговые ионно-плазменные испарители; 5 — электромагнитные катушки; 6 — пирометр частичного излучения «Смотрич-7»; 7 — нагреватель; 8 — тепловые экраны

пылении легкоплавкого алюминия для исключения его перегрева.

Модельную составную мишень катода изготовили из титана, в ее поверхность в специально выфрезерованные углубления впрессовали вставки из алюминия и алюминия и хрома. Общий вид таких составных мишеней катода после многоциклового эксплуатации показан на рис. 3.

Диаметр катода равнялся 110 мм, диаметр вставок — 25 мм (рис. 3, а). Шесть вставок из алюминия занимают 31 % общей распыляемой поверхности катода, титан — 69 % (рис. 3, а). Изготовили также мишени для формирования трехкомпонентного покрытия TiCrAl (рис. 3, б). Для этого в центре дополнительно запрессовывали вставку из хрома диаметром 35 мм.

Шесть вставок из алюминия занимают 31 % общей распыляемой поверхности катода, вставка из хрома — 10,1 %, титан — остальные 58,9 %.

Изучение условий распыления составной мишени TiAl показало, что пятно микроэлектродугового разряда сканирует по всей поверхности катода планарного дуготрона. Для исследований формирования сплавов при совместном распылении двух металлов на образцы из стали X18H9T нанесено толстое многослойное покрытие. С целью возможности осаждения на поверхности образца покрытия большей толщины структура покрытия состояла из отдельных слоев TiAl с тонкими прослойками из кобальта. Разделительные слои из кобальта наносили при помощи второго планарного дуготрона с прямым охлаждением мишени.

Для изучения структуры покрытий сделали поперечные шлифы образцов. Исследования проводили на растровом электронном микроскопе «ULTRA 55» с анализатором XR спектров ENERGY 350 (фирмы «ZEISS»).

На рис. 4 показаны структуры покрытий, полученных в начале выработки составной мишени TiAl (рис. 4, а), при глубине выработки вставок около 4 (рис. 4, б) и 9 мм (рис. 4, в). В основных слоях покрытия, которое формировалось в начале приработки мишени (рис. 4, а), обнаружено много капельных образований, что связано с характером распыления легкоплавкого алюминия. В процессе выработки алюминиевых вставок составного кат-

тода количество капельной фазы уменьшается и при выработке 4 мм (рис. 4, б) капельных образований почти нет.

При дальнейшей выработке вставок до 9 мм (рис. 3, а) в слоях покрытий имеются отдельные капельные образования, отмеченные на рис. 4, в как изгибание светлых линий от тонких кобальтовых прослоек. Следовательно, и при такой глубокой выработке капельные образования все же остаются.



Уменьшение капельных образований в процессе выработки можно отнести за счет малоугловой сепарации распляемого потока алюминия стенками углублений, которые формируются при интенсивном распылении алюминия (рис. 3).

Проведен спектральный анализ данных покрытий TiAl и определен их элементный состав. Анализируемые области обозначены на рис. 4 прямоугольниками. Элементный состав слоя покрытия TiAl, формируемого при разной глубине выработки алюминиевых вставок составной мишени, следующий, мас. % (ат. %): для рис. 4, *a* — 2,9 Al (42), 71 Ti (58); для рис. 4, *b* — 24 Al (36,3), 76 Ti (63,7); для рис. 4, *в* — 16 Al (20,1), 84 Ti (79,9). Соотношение площадей составной мишени TiAl равняется 31 Al и 69 % Ti.

Из приведенных результатов следует, что при начальной стадии выработки составной мишени формируется покрытие TiAl с более высоким процентом атомов алюминия, по сравнению с соотношением площадей этих материалов на распляемой площади составного катода, что свидетельствует о более быстром распылении легкоплавкого алюминия, чем титана.

Как показали дальнейшие исследования процесса длительного распыления составного катода меняется не только геометрия его поверхности, но и состав покрытия. При выработке вставок до 4 мм атомный процент алюминия несколько ниже, чем в предыдущем случае, и близок к соотношению распляемых поверхностей. Это, вероятно, связано с тем, что при распылении алюминия в углублении малоугловая часть потока, в которой много капельных образований, отсекается стенками углубления.

При этом в слоях покрытия практически отсутствуют капельные образования. В ходе дальнейшей выработки вставок процент алюминия в сплаве еще больше снижается и при выработке вставок до 9 мм формируется покрытие TiAl с атомарным содержанием алюминия меньшим, чем соотношение распляемой поверхности алюминия.

Проведены также исследования формирования трехкомпонентного покрытия MeCrAl. Для этого изготовили составной катод из титана, на поверхности которого в специально выфрезерованные углубления, как и в составной мишени (рис. 3, *a*), по периферии впрессовали шесть вставок из алюминия (0,25 мм), а в центр дополнительно впрессовали вставку из хрома (0,35 мм). Общий вид такого составного катода после многоциклового эксплуатации показан на рис. 3, *б*. Шесть вставок из алюминия, как и в предыдущей составной мишени, занимают 31 % общей распляемой поверхности катода, вставка из хрома — 10,1, титан — остальные 58,9 %.

Исследования условий распыления такого модельного составного катода показали, что пятно микроэлектродугового разряда сканирует по всей поверхности катода, несмотря на наличие на его поверхности вставки из хрома. Элементный состав трехкомпонентного покрытия, формируемого при начальной приработке мишени, следующий, мас. % (ат. %): 30,7 Al (44,6), 50,0 Ti (40,8), 19,3 Cr (14,6). Соотношение площадей составной мишени TiCrAl, %: 31 Al, 10,1 Cr и 58,9 Ti.

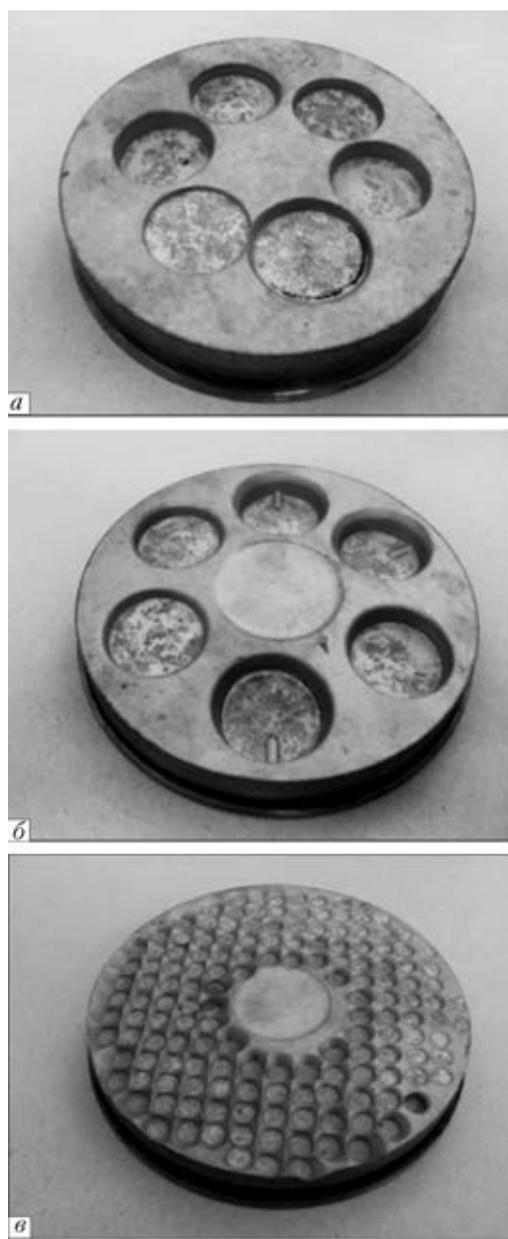


Рис. 3. Внешний вид комплексных планарных катодов, предназначенных для получения многокомпонентных многослойных покрытий: *a* — катод из титана со вставками из алюминия; *б*, *в* — катоды из титана со вставками из алюминия по периферии и хрома в центре

Видно, что атомарный процент хрома в сплаве формируемого покрытия близок к его распляемой площади. В то же время, как и в случае распыления составной мишени TiAl, концентрация атомов алюминия в сплаве покрытия значительно больше, чем у распляемой площади. Изменение состава покрытия в процессе выработки катода является существенным недостатком технологии формирования покрытий из сплавов при распылении составных комплексных катодов.

Для достижения однородной выработки у составных мишеней катода изготовили составной комплексный катод с меньшим диаметром алюминиевых вставок (0,5 мм), которые располагали по периферии мишени и одной общей вставкой (0,35 мм) из хрома в центре. Соотношение вставок из отдельных металлов оставалось таким же, как и в предыдущей мишени. Общий вид ка-

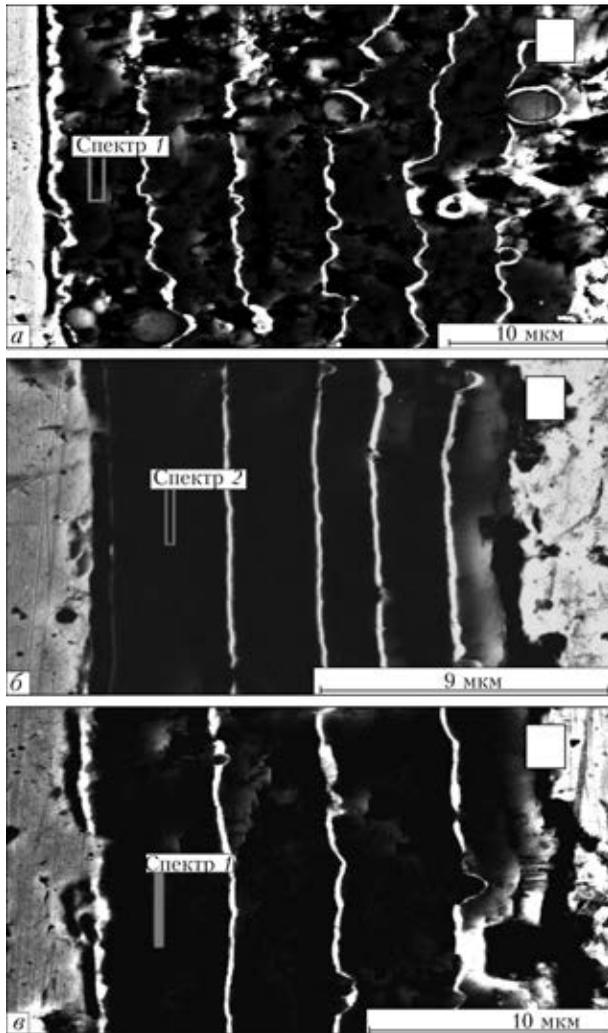


Рис. 4. Структуры многослойных покрытий TiAl (обозначения а–в приведены в тексте)

тогда после многоциклового эксплуатации показан на рис. 3, в. Продолжительность многоциклового эксплуатации данного катода такая же, как и катодов, показанных на рис. 3, а, б.

В отдельных местах данный катод имеет значительные выработки алюминиевых вставок глубиной до 4 мм, но их размер более чем в два раза меньше, чем у предыдущих мишеней. Процентное соотношение элементов в покрытии, которое формируется при таком составном комплексном катоде, также несколько отличается от соотношения площадей и меняется в процессе выработки катода, но уже в пределах 5 %, поэтому еще более предпочтительным является катод, изготовленный из уже готовых сплавов нужного состава. Следовательно, чем более мелкие фрагменты у составной мишени катода, тем меньшее влияние на состав оказывает выработка мишени катода, поэтому наиболее однородное покрытие будет достигнуто при изготовлении мишени катода из готового сплава.

Как следует из анализа литературных источников, перспективным сплавом в качестве жаростойкого материала [3] и подслоя при нанесении на металлическую основу лопаток теплозащитных оксидных покрытий [4] является многокомпонентный сплав NiCrAlY.



Рис. 5. Изготовление длинномерного катода из сплава NiCrAlY

Для изготовления катода данного сплава чистые порошки металлов смешивались в таком соотношении, %: 20 Cr; 8 Al; 1 Y, остальное — никель. Из смеси порошков выплавляли способом вакуумного электронно-лучевого переплава слиток диаметром 70 и длиной 800 мм. Затем для линейного дуготрона изготовили полу длинномерную мишень катода, процесс получения которой показан на рис. 5.

Проведена модернизация установки ВУ-700«Д» (М), а также разработаны и смонтированы три линейных периферийных дуготрона с системой управления сканированием пятна микроэлектродугового вакуумного разряда по всей длине катода, которые позволяют эффективно работать в широком диапазоне токов (100...200 А). Разработанные линейные дуготроны и модернизированный линейный магнетрон дают возможность наносить однородные по толщине покрытия на длинномерные изделия длиной 500 мм. Установка позволяет попеременно расплавлять четыре материала и при одновременной работе двух дуготронов конденсировать одновременно два материала. Поэтому с использованием возможности модернизированной установки ВУ-700«Д» (М) исследовали особенности технологии послойной конденсации покрытий из жаростойкого сплава NiCrAlY и керамических покрытий из  $Al_2O_3$ .

Многослойное защитное жаростойкое покрытие  $MeCrAlY/Al_2O_3$  наносили на лопатки ГТД. Внешний вид рабочих лопаток ГТД с многослойным жаростойким покрытием  $MeCrAlY/Al_2O_3$  показан на рис. 6.

Структура восьмислойного покрытия общей толщиной около 25 мкм представлена на рис. 7. При данных условиях формируется ламинарная структура чередующихся тонких слоев из сплава  $MeCrAlY$  (светлые полосы) и  $Al_2O_3$  (темные полосы).

В настоящее время газотурбинные установки (ГТУ) широко применяются как в авиационной, так и в наземной технике. Однако существует ряд проблем, связанных с повышением ресурса и надежности ГТУ.

Одним из наиболее уязвимых мест ГТУ, используемых в приземных слоях атмосферы либо непосредственно на поверхности земли, является их газоздушный тракт, в котором наиболее подвержены абразивному износу лопатки компрессора [5]. Наиболее перспективным способом защиты лопаток компрессоров ГТУ от абразивной эрозии является нанесение на них защитных многослойных покрытий на основе карбида и нит-



Рис. 6. Внешний вид рабочих лопаток ГТД с многослойным жаростойким покрытием  $\text{MeCrAlY/Al}_2\text{O}_3$

рида титана с пластичными прослойками [6]. Проведены исследования эрозионной стойкости этих покрытий. Для испытаний выполнили образцы из нержавеющей стали 20Х13, из которой изготавливают лопатки компрессорной турбины. Размеры образцов согласно ГОСТ 23.201–78 выполнили в виде пластин размером  $20 \times 15 \times 4$  мм с допусками на размеры по 7-у классу точности и шероховатостью рабочей поверхности (поверхность  $20 \times 15$ )  $R_z = 0,16 \dots 0,32$  мкм без острых кромок. На отдельные образцы наносили многослойные покрытия  $\text{Co/TiN}$  и  $\text{Co/TiC}$ , толщина отдельных износостойких слоев из  $\text{TiN}$  составляла 1,8 мкм, а тонких прослоек из кобальта между основными слоями — 0,21 мкм. Общая толщина многослойного покрытия из  $\text{Co/TiN}$  равнялась 35 мкм. Для покрытий из  $\text{Co/TiC}$  толщина отдельных износостойких слоев из  $\text{TiC}$  достигала 2,1 мкм, тонких прослоек из кобальта между основными слоями — 0,21 мкм. Общая толщина многослойного покрытия из  $\text{Co/TiN}$  составляла 35 мкм, перед испытанием все образцы взвешивали.

Испытания на эрозионную стойкость образцов проводили согласно ГОСТ 23.201–78 «Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя». Проведены испытания исходных образцов без покрытий и образцов с многослойным покрытием  $\text{Co/TiN}$  и  $\text{Co/TiC}$ , показавшие практически одинаковую эрозионную стойкость обоих, поскольку они имеют близкие значение микротвердости и упругости.

На рис. 8 приведена зависимость износа поверхности от массы расходуемого абразива для исходного образца и образцов только с многослойным покрытием  $\text{Co/TiN}$ . Значения износа получены по четырем одновременно испытываемым образцам, однако у образцов без покрытий значение износа более чем в два раза выше, чем у образцов с многослойными покрытиями на основе нитрида и карбида титана.

Исследования показали перспективность применения многослойных износостойких покрытий на основе нитрида и карбида титана для повышения эрозионной стойкости лопаток ГТД. На опытные партии лопаток компрессора различных ступеней ГТД наносили многослойные эрозионно-стойкие покрытия на основе нит-

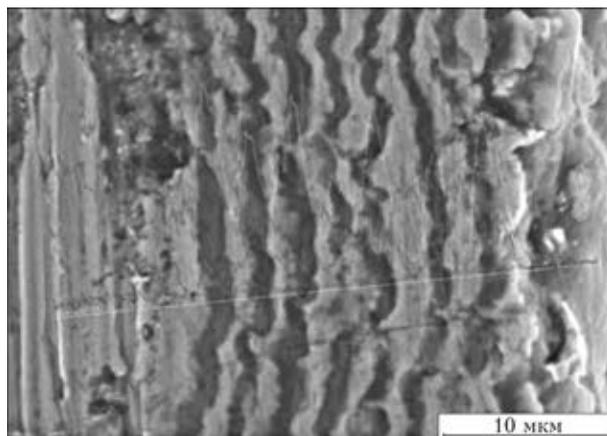


Рис. 7. Структура многослойного жаростойкого покрытия  $\text{Ve-CrAlY/Al}_2\text{O}_3$

рида и карбида титана. Общая толщина многослойных покрытий  $\text{Co/TiC}$  и  $\text{CoTiN}$  составляла около 15 мкм. Общий вид лопаток после напыления показан на рис. 9.

Напыленные лопатки (62 шт.) двух групп переданы на предприятие АО «Мотор Сич» для сравнительных эрозионных испытаний лопаток компрессора с различными типами покрытий на полноразмерном вертолетном двигателе с подачей абразива на вход.

В процессе испытаний лопатки с покрытиями  $7\text{Co}/7\text{TiC}$  и  $7\text{Co}/7\text{TiN}$  показали высокую стойкость против абразивного изнашивания. Износ поверхности у лопаток с многослойным покрытием  $7\text{Co}/7\text{TiC}$  и  $7\text{Co}/7\text{TiN}$  приблизительно был одинаковым и происходил равномерно без очаговых сколов и интенсивного кратерного износа поверхности пера лопатки. Это свидетельствует, во-первых, о том, что двухмикронная толщина твердого износостойкого слоя является достаточной для того, чтобы летящие с большой энергией абразивные частицы не проламывали его, а только изнашивали. Во-вторых, многослойная структура характеризуется наряду с высокой твердостью отдельных износостойких слоев высокой трещиностойкостью.

Если при ударе абразивной частицы в твердом хрупком слое образуется микротрещина, то ее продвижение в глубину многослойной структуры гасится пластичной прослойкой, поэтому образование трещин через всю толщину многослойного покрытия не происходило. И как результат, не происходило фрагментарное скалывание покрытия. При таких параметрах ламинарного износа многослойного покрытия дальнейшее увеличение его общей толщины будет пропорционально увеличивать ресурс работы лопатки. Более подробные исследования лопаток еще проводятся. Исходя из данных испытаний можно предположить, что увеличение ресурса работы лопаток с данными покрытиями составит 2...3 раза и более.

Лопатки ГТД в процессе их эксплуатации подвергаются различным воздействиям. Кроме высокой температуры в условиях окружающей атмосферы и эрозии под воздействием абразивных частиц, лопатки подвергались также влиянию механических и циклических нагрузок. Нержавеющая сталь является вязким материалом и лопатки ГТД из данного материала менее склонны к образованию усталостных трещин под воздействием различ-

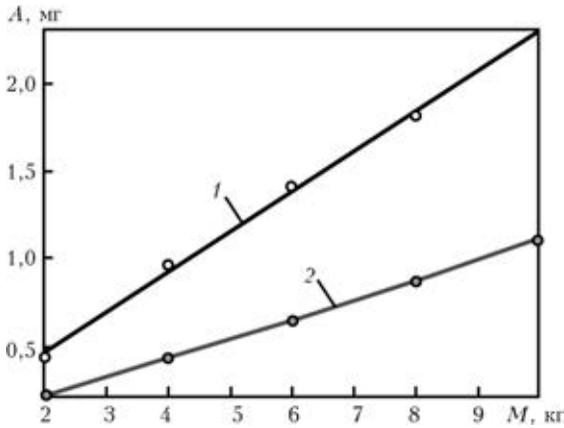


Рис. 8. Зависимость износа  $A$  от массы  $M$  расходуемого абразива для образцов из стали 20Х13: 1 — без покрытия; 2 — с многослойным покрытием  $\text{Co/TiN}$

ных механических нагрузок. Для лопаток, подвергнутых упрочняющей обработке и выполненных из менее вязкого материала (титана), образование на поверхности дефектов деформирования, и в том числе усталостных трещин, является весьма актуальной проблемой.

Для изучения топологии поверхности с различными дефектами и условий ее очистки и восстановления дефектов, обнаруженных на рабочей поверхности ремонтных лопаток, выполнены специальные образцы из материала, из которого изготавливаются лопатки ГТД (титана ВТ-1). На образцах посредством многократного изгиба до разрушения смоделированы дефекты в виде различных усталостных трещин, имеющих на рабочей поверхности ремонтных лопаток.

Топологию поверхностей у образцов после их разрушения изучали на оптическом микроскопе МБС-10 и электронном растровом микроскопе-микроанализаторе «Cat-Scan-4DV». По своим возможностям растровая электронная микроскопия превосходит оптическую в исследовании топологии поверхности материалов.

Растровый электронный микроскоп «Cat-Scan-4DV» позволяет работать с разрешающей способностью  $60 \dots 100$  нм и глубине резкости  $0,6 \dots 0,8$  мм, причем при изучении топологии поверхности вполне достаточно использовать низковольтный режим работы с диаметром пучка электронов  $10$  мкм [7].

Одним из существенных достоинств растрового электронного микроскопа является возможность в ряде случаев исследовать образцы практически без предварительной подготовки поверхности [8]. Толщина образцов для растрового электронного микроскопа не имеет определяющего значения. Они могут иметь размеры в несколько десятков миллиметров, их геометрия ограничивается только конструктивными возможностями держателя. Область применения растровой электронной микроскопии чрезвычайно широка — исследование топографии поверхности, приповерхностных структурных дефектов, электрически активных дефектов, электрических и магнитных доменов, определение атомного состава поверхности.

Изучать металлические образцы в микроскопе можно при любом ускоряющем напряжении [2]. С повышением ускоряющего напряжения разрешение улучшает-



Рис. 9. Лопатки различных ступеней компрессора вертолетного двигателя после осаждения на них семислойного защитного эрозионно-стойкого покрытия  $7\text{Co}/7\text{TiN}$

ся, однако для получения качественного изображения любой физической природы (в отраженных, вторичных электронах, изображения в режиме фазового контраста) достаточно напряжения в  $20 \dots 30$  кВ.

Для ряда аналитических способов исследования поверхности может потребоваться работа в условиях широкого диапазона ускоряющего напряжения, например для компонентного анализа композитов, содержащих элементы с малым атомным номером. Вместе с тем для исследования однородных металлических поверхностей с большим количеством дефектов достаточно использовать ускоряющее напряжение, равное  $20$  кВ, применяемое и для образцов с покрытиями [8].

Проводящий слой кобальта многослойного покрытия улучшает качество изображений поверхности образца, обусловленных присутствием электрического заряда, а также уменьшает нагрев образца под воздействием пучка. Однако для выполнения рентгеновского микроанализа на поверхность образца необходимо наносить тонкое углеродное покрытие для предотвращения влияния рентгеновских линий от металлической составляющей покрытия и сведения к минимуму поглощения рентгеновского излучения от образца.

На рис. 10 показана топология поверхностей образца с усталостными узкими длинными трещинами до и после зарастивания путем нанесения на поверхность покрытия из титана толщиной  $15$  мкм.

Трещины зародились под действием знакопеременной нагрузки на ребре у края образца и выросли под ее действием до определенных размеров. Длина некоторых достигает  $750$  мкм. Структуру поверхности до зарастивания (рис. 10, а) исследовали на оптическом микроскопе МБС-10 при увеличении  $\times 28$ , а структуру поверхности после зарастивания исследовали на электронном растровом микроскопе-микроанализаторе «CamScan-4DV».

Как следует из рис. 10, трещины в процессе осаждения толстого многослойного покрытия не заросли, однако их длина значительно уменьшилась. Длина трещины до зарастивания составляла  $535$  мкм (рис. 10, а). Цену деления для увеличения определяли по объектмикронметру. После зарастивания длина данной трещины равнялась  $108$  мкм. Таким образом, большая часть длины

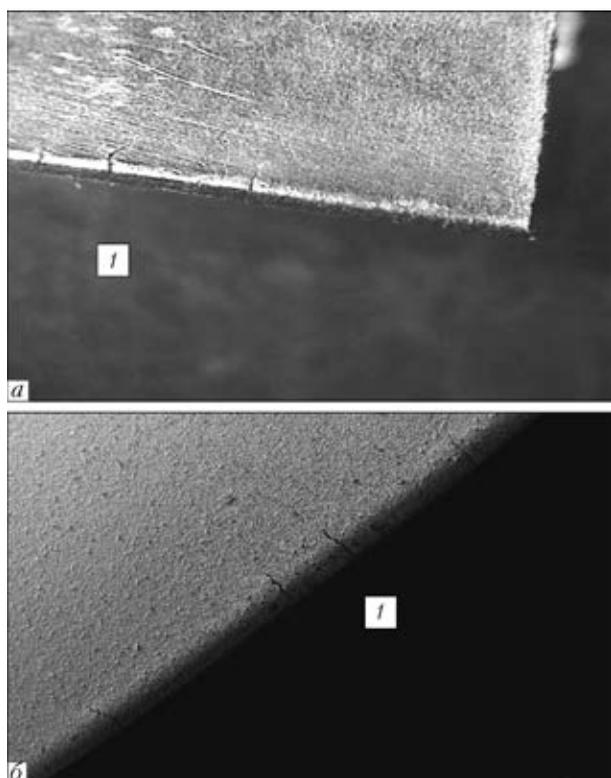


Рис. 10. Топология поверхностей для образца с усталостными узкими длинными трещинами до (а) и после (б) зарощивания

трещины заросла, а более мелкие трещины в процессе нанесения титанового покрытия зарощиваются полностью. Для полного зарощивания крупных усталостных трещин необходимо применять локальную пластическую обработку. На рис. 11 показана крупная глубокая трещина 1 до и после локальной пластической обработки.

Поверхность трещины в зоне справа от нее окружена очень мелкими трещинами (рис. 11, а). В то же время после локального пластического деформирования эти трещины не обнаруживаются, а у крупной трещины 1 слегка прослеживаются в отдельных местах только ее контуры. Дальнейшее наращивание на такую поверхность толстого титанового покрытия приводит к полному залечиванию крупной трещины.

## Выводы

1. Наиболее перспективными для условий нанесения покрытий на лопатки ГТД являются способы вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий. Способ микроэлектродугового ионно-плазменного вакуумного испарения имеет ряд положительных возможностей для обработки поверхности перед напылением, прогрева изделий до заданной температуры и позволяет распылять как легко-, так и тугоплавкие переходные металлы, осаждать покрытия из данных металлов, сплавов и их соединений (нитридов, карбидов).

2. Наиболее перспективными материалами для формирования твердых эрозионноустойчивых покрытий на лопатки ГТД являются карбид и нитрид титана. Они имеют высокую микротвердость и трещиностойкость. Титан — высокотехнологичный и доступный материал, прекрасно диспергируемый способами ионно-плазменного

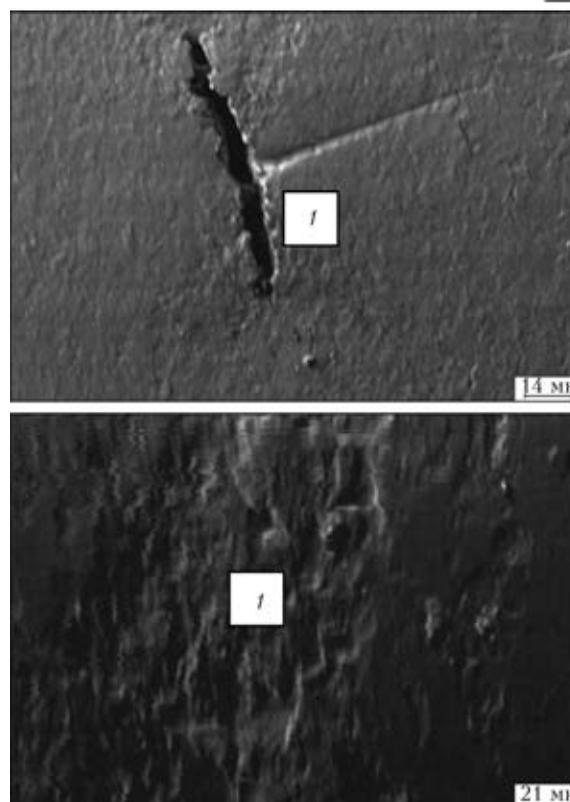


Рис. 11. Топология области поверхности образца с усталостной трещиной (1) до обработки (а) и после локального пластического деформирования поверхности (б)

вакуумного осаждения. Наиболее перспективным материалом для формирования жаростойких покрытий на лопатки ГТД является  $Al_2O_3$  в сочетании с  $MeCrAlY$ .

3. Исследования показали, что при нанесении жаростойких покрытий из многокомпонентных сплавов способом микроэлектродугового ионно-плазменного вакуумного распыления составной мишени катода планарного дуготрона, состав конденсируемого сплава в покрытии отличается от соотношения распыляемых плоскостей различных металлов составного катода. При изготовлении составной мишени необходимо в процессе фрезеровки отверстий и запрессовки вставок учитывать поправку на разные скорости распыления у различных металлов.

4. В процессе выработки составной мишени меняется состав наносимого покрытия, поэтому для планарных составных мишеней при выработке отдельных вставок на глубину более 2 мм необходимо на токарном станке выравнивать поверхность мишени по плоскости. Кроме того, при изготовлении составных мишеней быстро вырабатываемые вставки должны иметь диаметр 5 мм и менее.

5. Для нанесения покрытий из жаростойких многокомпонентных сплавов типа  $MeCrAlY$  способом микроэлектродугового ионно-плазменного вакуумного распыления наиболее перспективным является изготовление мишеней катодов из заранее приготовленных сплавов.

6. Исследования эрозионной стойкости образцов с многослойными покрытиями на основе карбида и нитрида титана показали высокую эрозионную стойкость покрытий, а также перспективность применения способа микроэлектродугового ионно-плазменного вакуум-



ного распыления для осаждения данных покрытий в качестве защитных эрозионностойких на лопатки ГТД.

7. Наиболее перспективными способами для ремонта лопаток ГТД, отработавших установленный ресурс, являются способы вакуумной ионно-плазменной обработки поверхностей и нанесения восстанавливающих и защитных покрытий.

8. Ремонтные лопатки ГТД, содержащие очень тонкие, средние усталостные и не очень глубокие микротрещины, полностью восстанавливаются в процессе конденсации с ионной бомбардировкой и последующего зарощивания трещин путем нанесения на ее поверхность толстого (15 мкм) покрытия из материала лопатки (титана).

1. Вульф Б. К., Ромадин К. П. Авиационное материаловедение. — М.: Металлургия, 1962. — 225 с.
2. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук, думка, 1983. — 232 с.

3. Application of ion-beam treatment in turbine blade production technology / Yu. D. Yagodkin, K. M. Pastuhov, S. A. Muboyadjyan, E. N. Kablov // Surface and Coatings Technology. — 1996. — № 84. — P. 590–593.
4. Двухслойные теплозащитные покрытия металл–керамика, полученные электронно-лучевым осаждением за один технологический цикл / П. А. Шпак, Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, Е. Л. Пилюк // Порошк. металлургия. — 2007. — № 7/8. — С. 100–106.
5. Белан Н. В., Омельченко В. В., Прокопенко А. Л. Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток ГТД // Авиац. пром-сть. — 1986. — № 10. — С. 26–31.
6. Эрозионностойкие многослойные покрытия на основе карбида и нитрида титана с пластичными прослойками / Е. В. Дабижа, А. А. Лещук, И. В. Бондарь, Н. Н. Борисова // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: Зб. наук стат. за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. — Київ: Інститут електроварювання ім. Є. О. Патона, 2009. — С. 626–633.
7. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2 кн. / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. — М.: Мир, 1984. — 303 с.
8. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. — М.: Мир, 1989. — 564 с.

Technological and hardware capabilities of plasma arc technology and vacuum equipment to produce multilayer erosion- and heat-resistant coatings aiming at improving the erosion resistance of the compressor blades of gas turbine engines (GTE) are founded. New technological and hardware solutions, allowing deposition of erosion- and heat-resistant coatings of multi-component alloys by the method of ion-plasma sputtering using a composite target of planar arcron, have been developed. Investigations of erosion resistance of samples with a multilayer coating based on titanium carbide and nitride, which showed promising application of this method of coating as protection on the GTE blades, were carried out. It is shown that the renovation of GTE blades containing very fine, medium fatigue cracks, and not very deep microcracks, are fully restored in the process of condensation with ion bombardment and subsequent repair of cracks by deposition of a thick (15 mm) coating of the blade material to its surface. Ref. 8, Figs. 11.

**Key words:** plasma-arc method of applying coatings; erosion- and heat-resistant coatings; titanium carbide; titanium nitride; cathode; composite target; GTE blades; erosion resistance; plastic layer; cobalt; fatigue crack; repair of cracks

Поступила 11.01.2013

## На НКМЗ модернизирована установка дифференцированной термической обработки валков

На Новокраматорском машиностроительном заводе после коренной модернизации введена в эксплуатацию установка дифференцированной термической обработки валков (ДТО). Единственная в СНГ установка ДТО работает на НКМЗ с 1996 года. С тех пор дифференцированной термообработке, придающей необходимые качества изделиям, подвергнуто более 50 тыс. т прокатных валков. За это время на заводе были разработаны новые марки сталей, расширилась номенклатура, повысились требования к качеству инструмента. В связи с этим остро назрела необходимость в проведении модернизации оборудования.

В результате модернизации печь скоростного нагрева получила дополнительный модуль, позволяющий проводить газоплазменный нагрев валков массой до 100 т с длиной бочки до 2800 мм и диаметром до 2000 мм. Создана также принципиально новая система охлаждения поверхности бочки валка на спрейерной установке. Модернизация установки ДТО позволила улучшить качество опорных валков горячей и холодной прокатки.



Пресс-служба НКМЗ 04.02.2013