DOI: 10.24892/RIJIE/20250312

Влияние модифицирования высокоинтенсивными импульсными электронными пучками на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия для рабочих лопаток ГТД

Быценко О.А., Тишков В.В.
Московский авиационный институт (НИУ)
г. Москва, Российская Федерация
oksiwear@yandex.ru, vv_tishkov@mail.ru

Широкожухов А.В.
АО «ММП имени В.В. Чернышева»,
г. Москва, Российская Федерация
shirokozhukhov_a@avia500.ru

Аннотация. **Проведен анализ экспериментальных данных, полученных с помощью комплексного исследования, которое включало рентгеноструктурный анализ и методы аналитической электронной микроскопии и оптической металлографии. Установлено, что после облучения высокоэнергетическими сильноточными электронными пучками рабочих лопаток ГТД с нанесенными на них жаростойким покрытием, представляющим собой многокомпонентной ионно-плазменное конденсационно-диффузионное покрытие (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) на поверхности жаростойкого покрытия имеется модифицированный слой до 20 мкм, состоящий из нескольких зон. Также установлено равномерное распределение основных элементов, входящих в состав комбинированного ионно-плазменного покрытия (Ni, Cr, Al) по толщине покрытия в границах модифицированного слоя, а основной фазой в модифицированном слое является β-фаза (NiAl). При анализе уровня остаточных макронапряжений в поверхностном слое покрытия лопатки после облучения было показано, что происходит релаксация растягивающих остаточных напряжений, а также наблюдается отсутствие дефектов в виде пор, расслоений и несплошностей.**

Ключевые слова**: высокоинтенсивные импульсные электронные пучки, модификация поверхности, рабочие лопатки газотурбинного двигателя, исследование структуры, ионно-плазменные покрытия, комплексное исследование.**

Введение

В связи возрастающим усложнением и ужесточением условий эксплуатации современной авиационной техники, включая двигатели авиационной и ракетной техники, чрезвычайно актуальной стала задача создания материалов и видов их обработки, которые могут обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств наиболее нагруженных и дорогостоящих деталей и узлов [1]. В последнее время особое внимание уделяется разработке именно высокоинтенсивных методов повышения функциональных свойств поверхностного слоя ответственных деталей изделий авиационной техники нового поколения достаточно широкой номенклатуры, также их предельно быстрому внедрению созданных на их основе техпроцессов в промышленность. Повышение характеристик поверхностного слоя с целью обеспечения необходимого уровня эксплуатационных свойств требует решение ряда задач, включающих в себя разработку перспективных материалов, модернизация способов изготовления, формования и обработки изделий и заготовок; развитие новых методов поверхностной обработки деталей и нанесения на их поверхность различных защитных покрытий [2, 3].

Современная инженерия поверхности, используя достижения фундаментальных наук, обеспечивает создание и практическое использование высокоэффективных технологий управления свойствами поверхностных слоев. При этом в инженерию поверхности входят как традиционно распространенные методы модифицирования, например, деформационное упрочнение, так и современные высокоэффективные и во многих случаях единственно возможные инструментально-физические методы, такие, как плазменная обработка в ионных пучках, поверхностное упрочнение лазером, энергетическим разрядом, обработка потоками электронов, газотермического напыления и др. Известно, что при создании авиационных двигателей четвертого поколения в 70-х прошлого столетия потребовала разработки для рабочих лопаток турбины не только новых литейных жаропрочных никелевых сплавов, но и созданию новых покрытий, позволяющих эффективно защищать поверхность от высокотемпературной коррозии газовой (свыше 1000°С) и термоусталостных разрушений в условиях термоциклирования. Поэтому российскими учеными был разработан ряд многокомпонентных ионно-плазменных защитных покрытий [4, 5]. Именно ионно-плазменные диффузионные покрытия стали наиболее востребованными для деталей горячего тракта газотурбинного двигателя (ГТД). Однако в условиях серийного производства часто встречающимися дефектами при напылении диффузионных покрытий стали такие дефекты, как образование капельной фракции, неоднородность химического состава и наличие несплошностей в покрытии. Последующее усложнение конструкции рабочих лопаток, вызванное необходимостью увеличения рабочей температуры, потребовало использование лопаток турбины высокого давления (ТВД) с конвективно-пленочным охлаждением (используя при этом, как правило, лопатки с перфорационными отверстиями), а для повышения эксплуатационных свойств в условиях высокотемпературной коррозии нанесение новых покрытий, которыми стали многокомпонентные ионно-плазменные конденсационно-диффузионные покрытия.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

Использование в конструкции определенного типа жаростойкого покрытия обуславливается условиями эксплуатации детали. При рабочих температурах на поверхности пера лопатки до 1050 °С применяются, как известно, диффузионные алюминидные покрытия, поскольку при нанесении данного покрытия обеспечиваются высокие адгезионные свойства покрытия с основным материалом [6]. Повышением температуры эксплуатации приводит к увеличению интенсивности происходящих диффузионных процессов как в самом покрытии, так и на границе покрытие –основной материал, что инициирует более интенсивный процесс деградации покрытия, а затем и основного материала. Поэтому при высоких температурах следует использовать конденсированные покрытия и комбинированные конденсационно-диффузионные покрытия [7]. При серийном изготовлении также встал вопрос о качестве и повышения срок службы наносимых покрытий, поскольку технологический процесс нанесения таких покрытий является достаточно сложным и трудоемким. Применение лопаток с конвективно-пленочным охлаждением поставило вопрос о необходимости разработки новой ремонтной технологии наружного покрытия, учитывающий наличие перфорационных отверстий на пере лопатки, а также хромоалитированного диффузионного покрытия, защищающего внутреннюю полость лопатки.

Рассматривая методы обработки поверхностей деталей ГДТ пучками заряженных частиц в виде ионной имплантации, обработки мощными ионными пучками особое место занимает метод воздействия высокоинтенсивными сильноточными импульсными электронными пучками на поверхность деталей, включая и сложно профильные поверхности. Применение интенсивных импульсных электронных пучков микросекундной длительности стало инструментом нивелирования выше перечисленных дефектов, а также позволило повысить жаростойкость и эрозионную стойкость поверхности пера лопаток, как показано в работах [8-10]. Для решения этой задачи потребовалось обобщение, научный анализ результатов экспериментальных исследований и новый подход к изучению механизма структурообразования при воздействии интенсивным импульсным электронным пучком на конденсационно-диффузионные покрытия, поскольку ранее модификация с помощью высокоинтенсивных импульсных электронных пучков применялась только для диффузионных покрытий [11,12]. Использование электронно-импульсного облучения позволяет модифицировать поверхностные слои без влияния на физико-химические характеристики материалов в объеме детали. Сама модификация в поверхностных толщинах от нанометра до десятков микрометра происходит, как результат взаимодействия мишени (уровня элементарных частиц) с высокоэнергетическими электронами. Данный процесс дает возможность конструировать состояние материала на глубинном нанометровом уровне.

Целью представленной работы является исследование влияния облучения с помощью высокоинтенсивных импульсных электронных пучков на поверхность слоев жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y), а также анализа структурно-фазовых изменений, происходящих при модифицировании поверхностного и подповерхностных слоев исследуемого покрытия с использования комплекса металлофизических методов исследования.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования были использованы лопатки из жаропрочного никелевого сплава с монокристаллической структурой ЖС32-моно с нанесенным конденсационно-диффузионным покрытием (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) по серийной технологии. Исследование лопаток проводилось до и после модифицирования с помощью высокоинтенсивных импульсных электронных пучков.

Облучение проводили на экспериментальной опытно-промышленной электронно-лучевой установке «ГЕЗА-ММП» со следующими параметрами: энергия электронов 40-150 кэВ; длительность импульса 5-40 мкс; плотность энергии в пучке 1-50 Дж/см^2; площадь поперечного сечения пучка 30-80 см^2; неоднородность плотности по сечению пучка 5-10%. Установка оснащена планетарным механизмом. Данная установка позволяет за один раз обрабатывать до 40 сложно профильных деталей, высота которых не превышает 25 сантиметров, что однозначно является большим преимуществом по сравнению с другими видами обработки.

Модификация поверхностных свойств материалов осуществляется двумя способами:

1) непосредственным воздействием электронного пучка на поверхность материала (прямая модификация);

2) легированием поверхностных слоев с помощью обработки электронным пучком предварительно нанесенных покрытий.

Облучение проводилось в зоне радиуса входной кромки с выходом на корыто по режиму: плотность энергии W= 21-22 Дж/см^2, количество импульсов – 2, с последующей термической обработкой в вакууме при температуре 1050 ºС – 2 часа в вакууме (рис 1).

Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки после облучения

Методика исследования состояния поверхностного слоя обычно состоит из минимального набора этапов:

1) морфологическое исследование поверхности по критерию шероховатости;

2) определение уровня (знака, глубины) залегания поверхностных остаточных напряжений;

3) металлографическое исследование (степень, глубина наклепа).

Однако в данной работе было проведено комплексное исследование состояния поверхностного слоя до и после электронно-импульсной обработки, которое включало в основном, металлофизические методы исследования.

Комплексные исследования физико-химического и структурно-фазового состояний были проведены с использованием следующих методов:

- рентгеноструктурного анализа (РСА) для определения уровня остаточных напряжений и фазового состава поверхностных слоев на дифрактометре Rigaku D/MAX-2500. Регистрация дифрактограммы проведена в монохроматическом CuKa-излучении в параллельной геометрии с применением поликапилярной полулинзы. Дифрактограммы расшифрованы с помощью специализированной программы и структурной базой данных PDF-2. Рентгеновская съемка производилась в диапазоне углов 2q =10÷150° на образце со стороны покрытия. Дифрактограммы представлены в координатах корня интенсивности от углового положения 2q. Рентгеновская съемка остаточных напряжений проводилась с применением метода sin2y (y – угол наклона образца). Использован метод изо-наклонов при 15 значениях угла наклона y = -40 ÷ 40° в направлении оси лопатки. Для измерения остаточных напряжений в жаростойком покрытии рентгеновская съемка производилась в угловом интервале 134,5-140,5° на линии (222);

- изучение микроструктуры покрытия и основного материала проводилось на мирошлифах, приготовленных в поперечном сечении пера лопаток с помощью оптической микроскопии на металлографическом микроскопе Leica DM IRM, а также с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) (данный метод исследования осуществлялся с помощью растрового электронного микроскопа VERIOS 460 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Oxford X-Max^N 80T) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на просвечивающем электронном микроскопе Tecnai G2 F20 S-TWIN при рабочем ускоряющем напряжении 200 кВ. Локальный химический анализ проводился при помощи приставки энергодисперсионного анализа Oxford X-Max^N 80T.

Все исследования проводились на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных средств измерений.

Пробоподготовка образцов для металлографического анализа проводилась на оборудовании фирмы «Struers». Образцы исследовались после травления в реактиве «Царская водка» (смесь концентрированных азотной HNO_3 (32-35 % масс.) и соляной HCl (65-68 % масс.) кислот, взятых в соотношении 1:3 по объёму, а также без травления.

Результаты исследований и обсуждение

На первом этапе комплексного исследования проведено исследование структурных изменений в покрытиях монокристаллических лопаток из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-моно после облучения методом рентгеноструктурного анализа до и после облучения с помощью электронно-импульсной обработки, поскольку съемка проводилась непосредственно с лопатки, без её разрезки. Исследование включало в себя определение фазового состава жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y), оценка уровня поверхностных остаточных макронапряжений, а также анализ дефектности кристаллической структуры.

Анализ дифракционного спектра покрытия на лопатке показал, что присутствуют рефлексы только от фазы NiAl с кубической примитивной решеткой. Для анализа дефектности кристаллической решетки покрытия для каждой дифракционной линии определялась её ширина. Известно, что ширина рентгеновских линий тем больше, чем выше дефектность кристаллической решетки. После облучения все дифракционные линии стали уже, что указывает на уменьшения дефектов и прохождения процессов нагрева и оплавления под воздействием сильноточного импульсного электронного пучка микросекудной длительности (рис. 2).

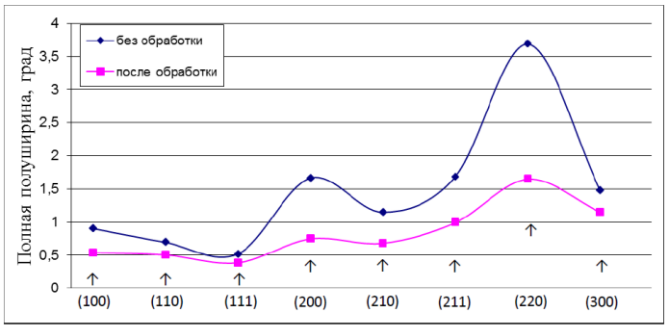


Рис. 2. Изменение полуширин различных линий (*hkl*) для лопаток (до и после электронно-импульсной обработки по режиму W = 21-22 Дж/см^2, 2 импульса)

Результаты измерения остаточных напряжений приведены на рис. 3 в виде графиков зависимости межплоскостного расстояния от угла наклона ψ. В исходном состоянии покрытия (до облучения) формируются растягивающие остаточные макронапряжения (216 ± 51 МПа). В образце после облучения с помощью высокоинтенсивных сильноточных импульсных электронных пучков остаточные напряжения практически отсутствуют (-8 ± 43 МПа).

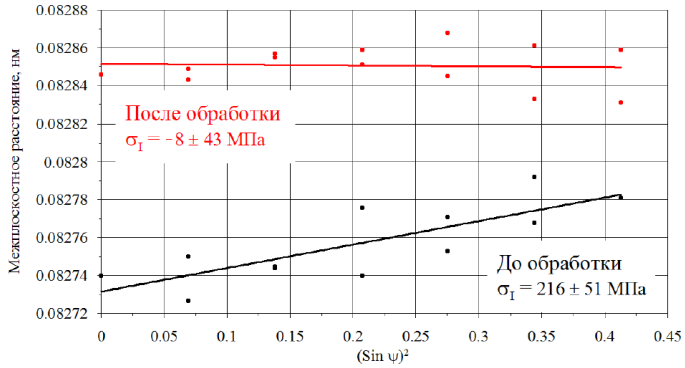


Рис. 3. Зависимость межплоскостного расстояния от угла наклона ψ для лопаток (до и после электронно-импульсной обработки по режиму W = 21-22 Дж/см^2, 2 импульса)

Получение указанного уровня остаточных поверхностных напряжений после высокоинтенсивной электронно-импульсной обработки отличаются от ранее полученных результатов при модифицировании ионно-плазменных диффузионных покрытий, так как они имели тенденцию к увеличению растягивающих макронапряжений после облучения с помощью интенсивных импульсных электронных пучков микросекудной длительности, что крайне нежелательно для поверхностного слоя пера лопаток при эксплуатации, так как приводит к снижению усталостной прочности.

При исследовании микроструктуры с помощью оптической и растровой электронной микроскопии жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-

Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) обнаружено изменение микроструктуры в сравнении с покрытием, нанесенным по серийной технологии. Измененный (модифицированный) слой представляет собой слабо травящийся полосу глубиной до ~20 мкм, микроструктура которой представлена, в основном, β - фазой, слой – однородный, не имеет дефектов в виде пор, расслоений и несплошностей (рис. 4).

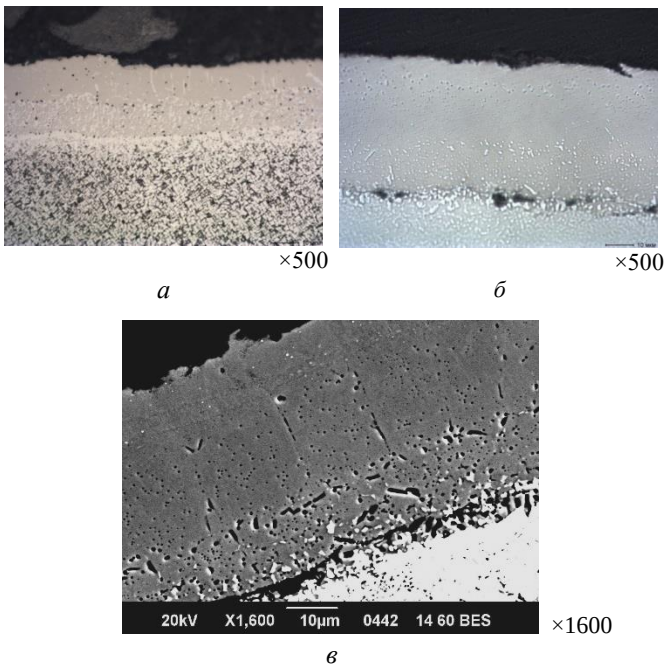


Рис. 4. Микроструктура покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) (до (*а*) и после электронно- импульсной обработки по режиму W = 21-22 Дж/см^2, 2 импульса (*б*, *в*))

Однако следует отметить, что большое количество данной фазы может впоследствии привести к растрескиванию при пластическом деформировании и/или при трибологических нагрузках в процессе эксплуатации, поскольку основные недостатками, сдерживающими практическое применение покрытий и, имеющих только NiAl (β-фазу) являются низкотемпературная хрупкость и относительно низкая прочность при температурах свыше 800 ºС.

При исследовании микроструктуры с помощью РЭМ было установлено, что модифицированный слой многокомпонентного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) состоит из двух зон: 1-ая – внешняя, 2-я зона – зона термического влияния, далее – подложка в качестве который выступает слой жаростойкого ионно-плазменного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y).

Изучение распределения легирующих элементов в конденсационно-диффузионном покрытии проводили методом рентгеновского картирования при проведении рентгеноспектрального микроанализа с помощью энергодисперсионных приставок при проведении исследовании методами электронной микроскопии как ПЭМ, так и РЭМ. Картирование при проведении рентгеноспектрального микроанализа дает возможность определить пространственное распределение легирующих элементов. Анализ карт распределения химических элементов показал, что никель и алюминий распределены в покрытии равномерно. Однако хром в исходном состоянии распределен неравномерно: хром присутствует в частицах, матрица, в свою очередь, обеднена хромом. После облучения приповерхностный слой конденсационно-диффузионного покрытия (облученный слой) имеет равномерное распределение всех выше указанных элементов, включая хром. Как известно, роль хрома в жаростойком покрытии заключается в том, что он создаёт на поверхности стали пассивную плёнку, не подверженную окислению до предельной температуры, называемой температурой начала окалинообразования. Чем выше температура окалинообразования, тем ниже возможность интенсивного окисления разогретых металлических поверхностей [13]. Также хром обеспечивает защиту от сульфидной коррозии при более низких температурах, для которой наибольшая стойкость у оксида хрома CrO_2 [14].

По результатам сравнительного исследования жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия до и после модифицирования с помощью ПЭМ было также установлено, что микроструктура исходного многокомпонентного ионно-плазменного покрытия представлена равноосными зернами размером 3-6 мкм, по границам которых и в объёме выделяются частицы, обогащённые хромом (рис. 5). Рентгеноспектральный микроанализ выявляет в составе этих частиц присутствие (помимо хрома и углерода) рения, иттрия, молибдена, ниобия и вольфрама. Соотношение элементов в частицах позволяет предположить, что наблюдаемые частицы являются карбидами хрома с небольшим содержанием рения (2,5 ат. %) и вольфрама (3 ат. %). В объёме зерна равномерно распределены никель, алюминий – основные составляющие диффузионного покрытия в составе исследуемого конденсационно-диффузионного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y). Содержание в зёрнах остальных элементов обусловлено их диффузией со стороны материала подложки (в данном случае, возможно первого покрытия Ni-Cr-Al-Y-Ta).

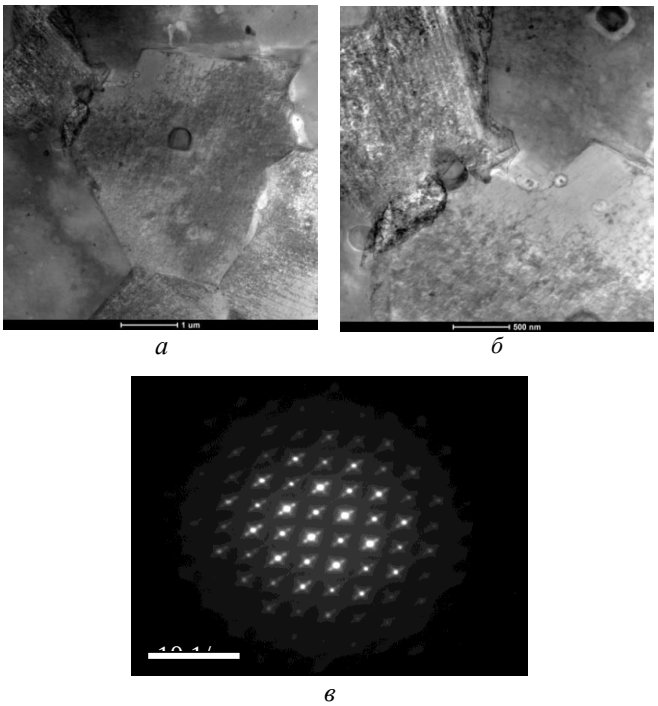
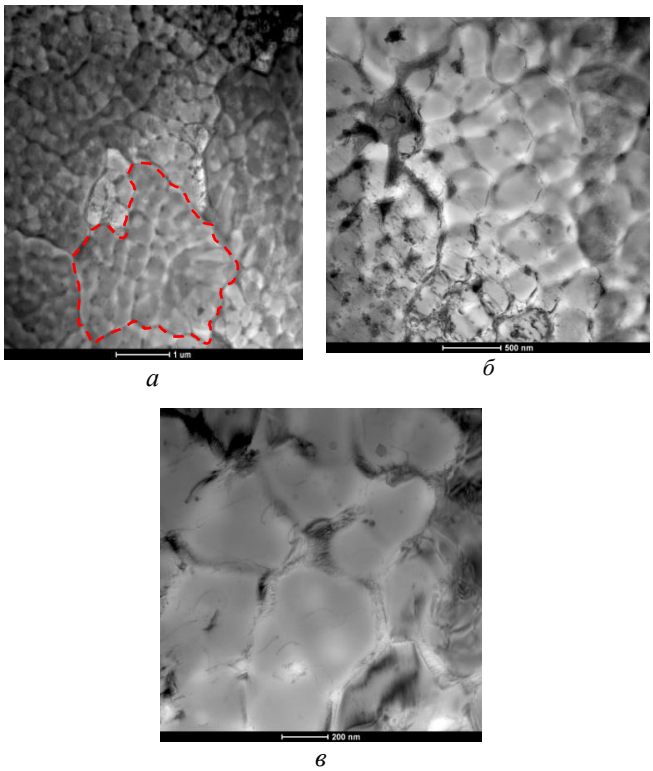


Рис. 5. Структура исходного покрытия (*а* и *б*), электроно-грамма на оси зоны (*в*) [100]

Согласно результатам дифракционного анализа, зёрна покрытия имеют примитивную кубическую решетку с периодом а ≈ 2,9 Å. На рис. 5, *в* показана электронограмма на оси зоны [100]. На электронограмме интенсивность рефлексов равномерно спадает от центра к периферии, не наблюдается разности интенсивности рефлексов, характерной для упорядоченных кубических решеток. При наклоне образца на 45 ° в обе стороны от оси зоны [100] вокруг направления (100) наблюдаются ориентации кристалла типа <110>, что подтверждает предположение о том, что кристаллическая решетка является кубической примитивной. Таким образом, зёрна материала являются β-твердым раствором NiAl с процентным содержанием никеля около 60 ат. %.

Изучение поверхностного слоя покрытия, подверженного высокоэнергетическому облучению показывает, что материал покрытия был расплавлен и быстро закристаллизован. Структура этого слоя представлена ячейками, объединёнными в блоки (показано штрихом на рис. 6). Между блоками присутствует небольшая кристаллографическая разориентация. Известно, что небольшая кристаллографическая разориентация между блоками означает, что они имеют различную ориентацию кристаллографических плоскостей относительно поверхности и друг друга и наличие таких разориентированных областей приводит к образованию границ раздела между ними, которые характеризуются большим скоплением дислокаций, возникающих в процессе роста [15, 16].



а *б* *в*

Рис. 6. Общий вид микроструктуры поверхностного обработанного слоя (*а*) и ячейки кристаллизации после обработки пера лопаток по режиму W = 21-22 Дж/см^2, 2 импульса (*б* и в)

Ячейки размером 300-600 нм имеют нечеткие границы, на которых наблюдается твидовый контраст. На картинах дифракции граничным зонам соответствуют размытые тяжи. Наличие такого контраста может быть связано как с начальной стадией зарождения вторичной фазы на границе ячеек, так и с периодичными искажениями кристаллической решетки. Однако, несмотря на высокие скорости, кристаллизации на границах и в объёме ячеек не наблюдается большого числа скоплений дислокаций, характерных для такой структуры (как например, в материале, полученным методом СЛС [17]). Полученные данные хорошо согласуются с выше представленными результатами измерения остаточных напряжений.

Кристаллическая решетка ячеек, как и в зёрнах необработанного слоя, примитивная кубическая типа CsCl с периодом 2,9 Å.

Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа (рис. 7) на границах ячеек наблюдается повышенное содержание хрома, кобальта и тантала, что, вероятно, связано с условиями кристаллизации ячеек во время обработки пучками высокой энергии и выносом тяжелых элементов на фронт кристаллизации. В отдельных случаях на границе ячеек присутствует итрий. Скопление тяжелых элементов на границе ячеек может быть одной из причин искажений кристаллической решетки.

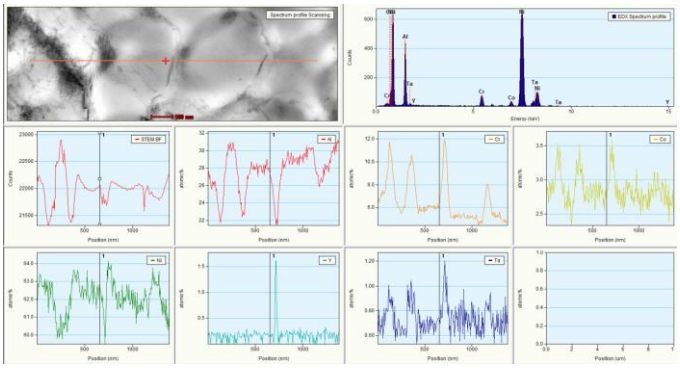


Рис. 7. Распределение химических элементов по ячейке и границам после электронно-импульсной обработки по режиму W = 21-22 Дж/см^2, 2 импульса

Выводы

При облучении поверхности лопаток из жаропрочного сплава ЖС32 с монокристаллической структурой с жаростойким многокомпонентным ионно-плазменным конденсационно-диффузионным покрытием (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) получено оптимальное перераспределение элементов в поверхностном слое в границах модифицированной зоны. Кроме того, обнаружено, что микроструктура в границах модифицированного слоя после облучения высокоинтенсивными сильноточными импульсными электронными пучками представлена, в основном β-фазой (NiAl), которая и впоследствии может обеспечить более высокий уровень жаростойкости по сравнению с поверхностью рабочих лопаток ТВД, не обработанных с помощью высокоинтенсивных сильноточных импульсных электронных пучков микросекудной длительностью.

Анализ воздействия облучения с помощщью электронно-импульсной обработки на структуру жаропрочного покрытия показал, что облучение высокими потоками энергии приводит к уменьшению дефектности кристалли-

ческой решетки покрытия. Кроме того, особо стоит отметить, что в исходном состоянии в покрытии Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) формируются растягивающие остаточные макронапряжения, а в поверхностном слое покрытия лопатки после облучения остаточные напряжения практически отсутствуют.

При проведении пространственного картирования в рамках рентгеноспектрального микроанализа поверхностного слоя многокомпонентного ионно-плазменного конденсированного покрытия (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y) на лопатке в исходном состоянии было получено, что хром в исходном состоянии распределен неравномерно по глубине покрытия, при этом после облучения приповерхностный слой имеет равномерное распределение всех выше указанных элементов. Особо следует отметить, что результаты исследований при использовании различных методов аналитической микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа высокую сходимость результатов, а, следовательно, и повышает уровень достоверности полученных результатов.

Литература

1. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб.: Т. II «Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Общие сведения. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства» / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – 366 с.

2. Каблов Е.Н. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджан // Газотурбинные технологии. – 2001. – №3. – С. 30-32.

3. Каблов Е.Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян. – М.: Навигатор-Экстра, 2000 – 165 с.

4. Мубояджан С.А. Конденсатные и конденсатно-диффузионные покрытия для лопаток турбин из жаропрочных сплавов направленной кристаллизации / С.А. Мубояджан, С.А. Буденовский // Металловедение и термическая обработка Металлов. – 1996. – № 4. – С. 15-18.

5. Мубояджян С.А. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД / С.А. Мубояджян, Д.А. Александров, Д.С. Горлов, Л.П. Егорова, Е.Е. Булавинцева //Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. – С. 71-81.

6. Тамарин Ю.А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 133 с.

7. Будиновский С.А. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков: Сб. тр. / С.А. Будиновский, Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян и др. – М.: ВИАМ, 1994, – С. 314-325.

8. Сулима А.М. Применение пучков заряженных частиц в технологии изготовления и ремонта лопаток турбин / А.М. Сулима, Ю.Д. Ягодкин, А.Ф. Львов и др. // Тез. докл. Всероссийского семинара «Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: МАИ, 1995. – С. 8.

9. Шулов В.А. Сопротивление солевой коррозии деталей из жаропрочных сталей ЭП866ш и ЭП718ИД, подвергнутых обработке сильноточными импульсными электронными пучками / В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, Н.И. Фомин и др. // Материалы 5 Междун. конф. по взаимодействию излучений с твердым телом. – Минск: БГУ, 2003. – С. 320-322.

10. Shulov V.A. Processing of gas turbine engine blades with intense pulsed electron beams / V.A. Shulov, V.I. Engelko, G. Mueller, A.G. Paikin // Abstracts of 15th International Conference on High-Power Particle BEAMS, Saint Petersburg, Russia, Jule 18-23, 2004. – 2004. – P. 205.

11. Shulov V.A. The influence of exposure to intense pulsed electron beams on NiCrAlY vacuum-arc coatings adhesion to gas-turbine blades made of GHS26NK alloy / V.A. Shulov, V.I. Roditelev, O.A. Bytsenko, D.A. Teryaev, V.I. Engelko, K.I. Tkachenko // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т.5, № 12(3). – С.245-247.

12. Быценко О.А. Влияние облучения сильноточными электронными пучками на поверхностные слои современных жаропрочных никелевых сплавов с ионно-плазменными покрытиями различного состава / О.А. Быценко, Е.В. Филонова, А.Б. Марков, Н.А. Белова // Труды ВИАМ. Электрон. ;урнал. – 2016. – № 6(42). – 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10.

13. Коломыцев П.Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 216 с.

15. Коломыцев П. Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 146 с.

16. Боуэн Д.К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. – СПб: Наука, 2002.

17. Евгенов А.Г. Особенностипроцесса селективного лазерного синтеза применительно к литейным сплавам на основе никеля и интерметаллида Ni3Al / А.Г. Евгенов, Е.А. Лукина, В.А. Королев // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2016. – № 5(23). – С. 3-11.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250312

The Effect of High-Intensity Modification Pulsed Electron Beams on the Structural and Phase State of the Surface Layer of a Heat-Resistant Condensation-Diffusion Coating for Turbine Blades

Bitsenko O.A., Tishkov V.V.
Moscow Aviation Institute
Moscow, Russian Federation
oksiwear@yandex.ru, vv_tishkov@mail.ru

Shirokozhukhov A.V.
Chernyshev Moscow Machine-Building Enterprise
Moscow, Russian Federation
shirokozhukhov_a@avia500.ru

Abstract. **The analysis of experimental data obtained using a comprehensive study, which included X-ray diffraction analysis and methods of analytical electron microscopy and optical metallography. It was found that after irradiation with high-energy high-current electron beams of the working blades of the GTE with a heat-resistant coating applied to them, which is a multicomponent ion plasma condensation-diffusion coating (Ni-Cr-Al-Y-Ta) + (Ni-Cr-Al-Y), there is a modified layer of up to 20 microns on the surface of the heat-resistant coating., consisting of several zones. A uniform distribution of the main elements that make up the combined ion-plasma coating (Ni, Cr, Al) along the thickness of the coating within the boundaries of the modified layer has also been established, and the main phase in the modified layer is the β-phase (NiAl). When analyzing the level of residual macro stresses in the surface layer of the blade coating after irradiation, it was shown that the relaxation of tensile residual stresses occurs, as well as the absence of defects in the form of pores, delaminations and discontinuities.**

Keywords: **high-intensity pulsed electron beams, surface modification, working blades of a gas turbine engine, structural research, ion plasma coatings, comprehensive research.**

Библиографическое описание статьи

Быценко О.А. Влияние модифицирования высокоинтенсивными импульсными электронными пучками на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия для рабочих лопаток ГТД / О.А. Быценко, В.В. Тишков, А.В. Широкожухов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №3. – С. 74-80. DOI: 10.24892/RIJIE/20250321

Reference to article

Bitsenko O.A., Tishkov V.V., Shirokozhukhov A.V. The effect of high-intensity modification pulsed electron beams on the structural and phase state of the surface layer of a heat-resistant condensation-diffusion coating for turbine blades, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.3, pp. 74-80. DOI: 10.24892/RIJIE/20250312
