УДК 621.45.038.72

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ РАЗНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХСЛОЕВ ДЛЯТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН ГТД**

***Лепешкин А.Р., Ильинская О.И.***

*Россия, г. Москва, Московский авиационный институт (НИУ)*

***Кувалдин А.Б, Лепешкин С.А.***

*Россия, г. Москва, НИУ-Московский энергетический институт*

***Вербанов И.С.***

*Россия, г. Москва, «ФГУП ЦИАМ»*

***Ч. Гуанхуа***

*Китай, г. Сиань, Северо-западный политехнический университет*

*Приводятся комплексные исследования различных режимов технологииэлектро-искрового нанесения теплостойкихслоев. На основе проведенных исследований осуществляется выбор параметровдля повышения эффективности электротехнологии нанесения слоевс учетом шероховатости, микро-твердости, износо-стойкости, теплового циклирования. Результаты работы позволяют усовершенствовать электротехнологию нанесения и ремонта теплостойкихслоев для деталей (лопаток) турбин при повышении энерго и ресурсосбережения технологического процесса.*

*Ключевые слова: теплостойкиеслои, электротехнология, электро-искровоенанесение, детали, шероховатость, циклирование.*

Рабочие детали турбин газотурбинных двигателей (ГТД) работают при высоких температурах, испытывают большие статические, вибрационные и температурные напряжения.

Для защиты металлов от газовой коррозии существуют следующие основные способы:жаростойкое нанесение, т.е. введение в сплав компонентов, повышающих жаростойкость;защитные слои [1-3], т.е. нанесение на поверхность металлических конструкций защитного металлического или неметаллического слоя.

Для нанесениятеплостойкихслоев используют основные группы электротехнологий, отличающихся способом испарения наносимого материала: дуговое испарение, магнетронное распыление, электроннолучевое испарение, электро-искровоенанесение.

Электро-искровоенанесение представляет собойэнерго и ресурсосберегающуюэлектротехнологию для создания стабильного, высококачественного функционального слоя с хорошими прочностными характеристиками и фрикционной производительностью за счет электрического разряда с использованием электрода, содержащего материал слоя, такого как металл или керамика.

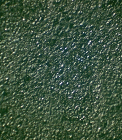
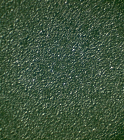
Кроме того, технология электро-искрового легированияне требует квалифицированных рабочих или предварительной и последующей обработки, она подходит для автоматизации производственной линии и экономии рабочей силы на ней. Поэтому она не требует дорогостоящего оборудования, такого как камеры для нанесения слоя, технологический процесс может быть упрощен, что приводит к снижению затрат и повышению энерго и ресурсосбережения.

Совершенствование режимов нанесения защитного слоев осуществляется для обеспечения равномерного распределения слоя на поверхности теплонапряженных деталей.

Для нанесения слоев применялись электроды из сплава СДП-2 (Ni-Cr-Al-Y). Так же проводились исследования по нанесению несколькихслоев из металлических сплавов W-Cr(Со-Ni)Al. На рисунке 1 показаны слои, нанесенные при разных энергиях импульса.

Комплексные исследования режимов нанесения теплозащитныхслоев осуществлялись для обеспечения равномерного распределения слоев на поверхности теплонапряженных деталей турбин ГТД.

Анализ состоянияслоев с учетом шероховатости и микро-твердости проводился с помощью металловедческого исследования и измерений указанных параметров.



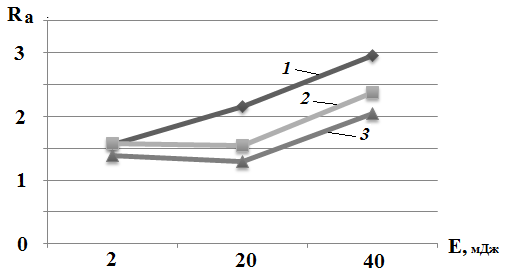
а) б) в)

***Рисунок 1– Слои Ni-Cr-Al-Y, нанесенные при энергии импульса:***

*а) Е = 2 мДж, б) Е = 20 мДж и в) Е = 40 мДж*

Шероховатость образцов измерялась компактным профилометром TR-200. Профилометр предназначен для работы в условиях производства и был использован для измерения шероховатости поверхности различных турбинных деталей. Измеритель производит расчет параметров шероховатости в соответствии с выбранной методикой и четко отображает на жидкокристаллическом экране график профиля и все измеренные параметры.Встроенный микро-процессор твердомера HVS1000 позволяет автоматически проводить испытание с отображением величины твердости на жидко-кристаллическомэкране и печатью данных на специальном устройстве.

На рисунке2 показана зависимость шероховатости трех видов наносимых слоев от величины энергии импульса. Из рисунок 2 видно, что слои W-Cr-Ni-Al и W-Cr-Со-Al на средних и максимальных режимах обладают малой шероховатостью. Это значит, что эти многослойные слои ложатся гораздо равномернее, чем сплав Ni-Cr-Al-Y,несмотря на то, что составляющие,образующиеслой наносятся послойно, и с каждым слоем слой деградирует, увеличивается его шероховатость.



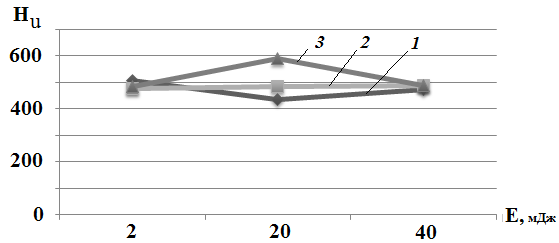
***Рисунок 2 – Кривые шероховатости слоев от энергии импульса:***

*1 – Ni-Cr-Al-Y;2 – W-Cr-Ni-Al; 3 –W-Cr-Со-Al*

При изучении микро-твердости можно сделать выводы, что только при средних режимах нанесения в слое W-Cr-Со-Al микро-твердость возрастает.

При малой и высокой энергии импульса микро-твердостьслои Ni-Cr-Al-Y выше, чем на среднем режиме. Микро-твердость же слоиW-Cr-Ni-Al практически не зависит от режимов нанесения (рисунок3).

Выбраны режимы нанесения защитных слоев для обеспечения равномерного распределения слои на поверхности теплонапряженных деталей. С увеличением энергии импульса шероховатость слоев увеличивается.При средних и минимальных режимах слой наносится более равномерно и сплошность такого слоя выше.



***Рисунок 3 – Величинае микро-твердости слоев в зависимости от величины энергии импульса:***

*1 – Ni-Cr-Al-Y; 2 – W-Cr-Ni-Al; 3 –W-Cr-Со-Al*

Исследования микро-твердостипоказали, что при минимальной и высокой энергии импульсамикро-твердостьслои Ni-Cr-Al-Y незначительно выше, чем на других режимах. Микро-твердость других слоевпрактически не зависит от режимов нанесения.

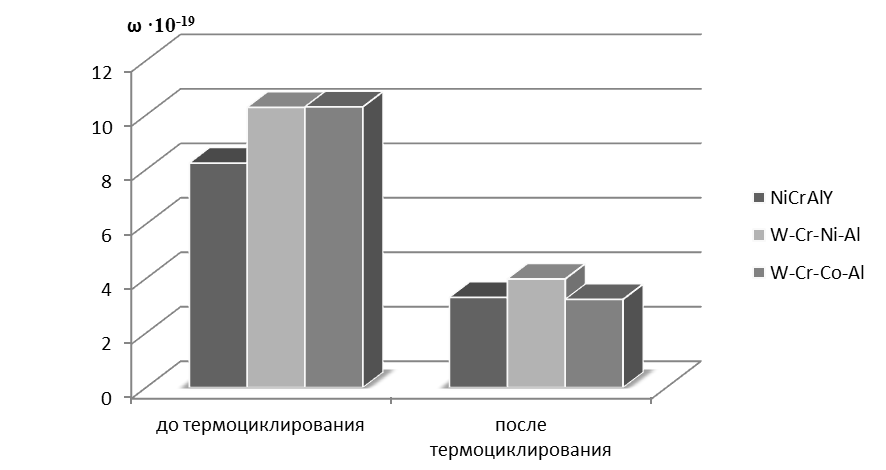
Оценка состояния слоев после теплового циклирования проводилась с помощью металловедческого исследования, т.е. с измерением шероховатости, микротвердости и износо-стойкости. В ходе визуальной оценки с помощью микроскопа удалось установить, что целостность слоев не нарушена, что видно на рисунке4.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (а) | (б) | (в) |
|  |  |  |
| (г) | (д) | (е) |
| ***Рисунок4–Слои образцов, прошедших тепловое циклирование:***  *(а) Ni-Cr-Al-Y, (б) W-Cr-Ni-Al и (в) W-Cr-Co-Al невыглаженные;*  *(г) Ni-Cr-Al-Y, (д) W-Cr-Ni-Al и (е) W-Cr-Co-Al выглаженные.* | | |

После теплового циклирования и выглаживания микро-твердость всех слоев повысилась (рисунок5). Измерение износо-стойкости, показанное на рисунке6, свидетельствует о том, что после теплового циклирования материал изнашивается в 4-5 раз меньше, а значит износо-стойкость выше, что можно объяснить образованием окисных пленок на поверхности слоев.



***Рисунок5 –Изменение микро-твердости слоя после теплового циклирования***



***Рисунок6 – Величиныудельной характеристики ω слоев до и после теплового циклирования***

Изнашивание исследуемой поверхности производилось алмазным индентором. Выбор для этих целей алмаза обусловлен его малой изнашиваемостью. Оценку величины износа производят по ширине канала, образующегося в результате изнашивания. Экспериментально установлено, что за первые 10÷50 циклов скольжения индентора происходит пластическое пере-деформирование с образованием канала приработки шириной bн Последующее увеличение ширины каналаbквызвано износом материала.В качестве критерия оценки несущей способности поверхностного слоя использовалась удельная характеристика ω:

ω = Vи/PпL (1),

где Pп - погонная нагрузка; Vи - объем изношенного материала; L - путь трения.

Для определения величины ω проводились два последовательных испытания на разных участках поверхности с разным числом циклов скольжения алмазного индентораNн и Nк. Затем производится измерение величин bн и bк.

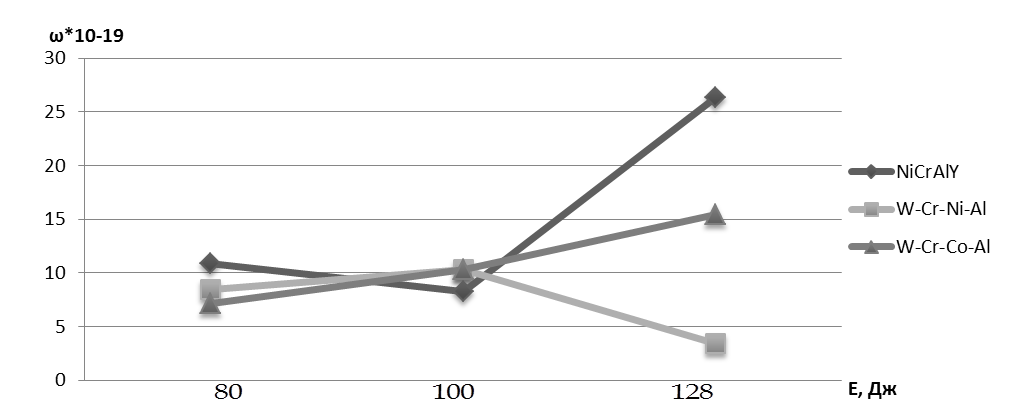
На рисунке7 показаны каналы, образовавшиеся на поверхности слоя Ni-Cr-Al-Y после 100 циклов и 1000 циклов изнашивания. Последние измерялись на инструментальном микроскопе с точностью до 0.01 мм.



***Рисунок7 –Каналы, образовавшиеся на поверхности слоя Ni-Cr-Al-Y после:***

*(а) 100 циклов и (б) 1000 циклов изнашивания*

Исследования износо-стойкости разных слоев представлены на рисунке8. Из анализа этих исследований следует, что на средних и минимальных режимах обработки износо-стойкость всех слоев наиболее стабильна, а на максимальном режиме нанесения только многослойномслой W-Cr-Ni-Al определяется наиболее износостойкими показателями (рисунок8).



***Рисунок8 - Зависимость значений удельной характеристики ω слоев от величины энергии импульса***

**Выводы**

Выбраны оптимальные режимы нанесения защитных слоев с использованием электро-искровой технологии для обеспечения равномерного распределения слои на поверхности теплонапряженных деталей. С увеличением энергии импульса шероховатость слоев увеличивается.При средних и минимальных режимах слой наносится более равномерно и сплошность такого слоя выше.

Получено, что при минимальной и высокой энергии импульса микро-твердость слоя Ni-Cr-Al-Y незначительно выше, чем на других режимах. Микро-твердость других слоев практически не зависит от режимов нанесения.

Из анализа процессов изнашивания следует, что на средних и минимальных режимах обработки износо-стойкость всех слоев наиболее стабильна, а на максимальном режиме нанесения только многослойныйсостав W-Cr-Ni-Al определяется наиболее износостойкими показателями.

Проведен также анализ режимов нанесения защитных слоев на поверхности теплонапряженных деталей после теплового циклирования.После теплового циклирования и выглаживания микро-твердость всех слоев повысилась и материалы их изнашиваются в 4-5 раз меньше. Это значит, чтоизносо-стойкость также повышена.

Результаты проведенных комплексных исследований можно использовать для выбора наиболее эффективных режимов электро-искровойтехнологии нанесения и ремонта теплостойкихслоев для лопаток турбин при повышении энерго и ресурсобережения электротехнологического процесса.

Список литературы

1. Мубояджян С. А., Будиновский С. А., Гаямов А. М., Матвеев П. В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 17–20.

2. Баженова А.В., Ильинская О.И. Оценка теплозащитных свойств покрытий из различных материалов для теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей **//** Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Т. 3. Сборник тезисов докладов. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 89-90.

3. Lepeshkin A.R., Feng Shi. Ceramic Coatings - Applications in Engineering. Intech. – 2012. – 286p.

**Лепешкин Александр Роальдович**, академик АЭН РФ, д.т.н., профессор МАИ (НИУ). 109240, Москва, Берниковская набережная, д. 14. Е-mail: [lepeshkin.ar@gmail.com](mailto:lepeshkin.ar@gmail.com).

**Ильинская Ольга Игоревна**, кандидат технических наук, доцент МАИ (НИУ), 109240, Москва, Берниковская набережная, д. 14. Е-mail: [madam.ilinskaya@yandex.ru](mailto:madam.ilinskaya@yandex.ru).

**Кувалдин Александр Борисович,** академик АЭН РФ, доктор технических наук, профессор кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

E-mail: [KuvaldinAB@mpei.ru](mailto:KuvaldinAB@mpei.ru).

**Лепешкин Степан Александрович**, к.т.н. кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. E-mail: [Stepan111@gmail.com](mailto:Stepan111@gmail.com).

**Вербанов Иван Сергеевич -** инженер 2 категории ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, email: [isverbanov@ciam.ru](mailto:isverbanov@ciam.ru) , тел.: +7(929)6108708

**Чжэн Гуанхуа,** руководитель лаборатории, Китай, г. Сиань, Северо-западный политехнический университет.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

UDC 621.45.038.72

**COMPLEX INVESTIGATIONSOF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF DEPOSITIONOF DIFFERENT HEAT-RESISTANT LAYERS FOR HEAT-STRENGTHED DETAILS OF GTE TURBINS**

***Lepeshkin A.R., Ilianskaya O.I.***

*Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute ((NRU)*

***Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A.***

*Russia, Moscow, NRU Moscow Power Engineering Institute*

***Verbanov I.S.***

*Russia, Moscow, CIAM*

***GuanghuaZ.***

*China, Xi'an, Northwest Polytechnic University*

*The complexinvestigations are presented of various modes of technology of electro-spark deposition of heat-resistant layers. Based on the studies, the choice of parameters is carried out to increase the efficiency of the electrotechnology of applying layers, taking into account roughness, micro-hardness, wear resistance, thermal cycling. The results of the work allow improving the electrotechnology of applying and repairing heat-resistant layers for turbine parts (blades) while increasing energy and resource saving of the technological process.*

*Key words: heat-resistant layers, electrotechnology, electro-spark coating, parts, roughness, cycling.*

Bibliography

1. Muboyadzhyan S. A., Budinovskij S. A., Gayamov A. M., Matveev P. V. Vysokotemperaturnye zharostojkie pokrytiya i zharostojkie sloi dlya teplozashchitnyh pokrytij // Aviacionnye materialy i tekhnologii. 2013. № 1. S. 17–20.

2. Bazhenova A.V., Ilinskaya O.I. Ocenka teplozashchitnyh svojstv pokrytij iz razlichnyh materialov dlya teplonapryazhennyh detalej gazoturbinnyh dvigatelej // Gagarinskie chteniya – 2016: XLII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya: T. 3. Sbornik tezisov dokladov. M.: Moskovskij aviacionnyj institut (nacional'nyj issledovatel'skij universitet). 2016. S. 89-90.

3. Lepeshkin A.R., Feng Shi. Ceramic Coatings - Applications in Engineering. Intech. – 2012. – 286 p.

**Lepeshkin Alexander Roaldovich**, AEN Academician of the Russian Federation, doctor of technical sciences, professor of MAI (NRU), 109240, Moscow, Bernikovskaya embankment, 14.E-mail: [lepeshkin.ar@gmail.com](mailto:lepeshkin.ar@gmail.com).

**Ilinskaya Olga Igorevna**, Ph.D., associate professor of MAI (NRU), 109240, Moscow, Bernikovskaya embankment, 14. E-mail: [madam.ilinskaya@yandex.ru](mailto:madam.ilinskaya@yandex.ru).

**Kuvaldin Alexander Borisovich**, AEN Academician of the Russian Federation, doctor of technical sciences, professor of AETUS Department of NRU "MEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, d. 14. E-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

**Lepeshkin Stepan Aleksandrovich,** Ph.D. AETUS Department of NRU "MEI". 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14. E-mail: Stepan111@gmail.com

**Verbanov Ivan Sergeevich -** engineer of CIAM, Moscow, email: isverbanov@ciam.ru, tel. +7(929)6108708

**Zheng Guanghua,** head of the laboratory, China, Xi'an, Northwest Polytechnic University.