

**ELECTROLYTIC-PLASMA REMOVAL OF TWO-LAYER
SDP1+VSDP20 COATING FROM THE SURFACE OF PARTS
MADE OF EP866-SH STEEL**

*Nikolay Vladimirovich Plotnikov¹, Damir Ramilevich Tamindarov¹,
Ksenia Alexandrovna Zyryanova², Anatoly Mikhailovich Smyslov^{3a}*

¹ LLC SPE "Uralaviaspetstekhnologiya" LLC, 5 Tramvaynaya St., build. 1, 450027, Ufa, Russia

² PJSC "United Engine Corporation – Ufa Engine Production Association", EDB "Motor", 2 Ferina St., 450039, Ufa, Russia

³ Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

^a smyslovam@yandex.ru

ABSTRACT

This article presents the results of selecting an electrolyte for removing a 2-layer vacuum plasma coating SDP1+VSDP20 from a substrate made of EP866-Sh steel using the method of electrolytic plasma polishing (EPP). The article shows that the SDP1+VSDP20 coating has a complex chemical composition that varies with depth, resulting in problems with its removal using various chemical and electrochemical methods. As a result of the study, it was established that this coating can be removed by the EPP method by adding substances to the electrolyte that form complex compounds which are easily soluble in water with metal ions included in the composition of the coating and substrate. It has been shown that the addition of ligands in an amount of 0.5–2% can ensure uniform removal of the SDP1+VSDP20 coating without damaging the substrate material.

KEYWORDS

Electrolytic-plasma polishing; coating SDP1+VSDP20; coating removal.

**УДАЛЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ СДП1+ВСДП20
С ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ ЭП866-Ш
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ**

*Николай Владимирович Плотников¹, Дамир Рамилевич Таминдаров¹,
Ксения Александровна Зырянова², Анатолий Михайлович Смыслов^{3а}*

¹ ООО НПП «Уралавиаспецтехнология», 450027, Россия, Уфа, ул. Трамвайная, 5, к1

² ПАО «Объединённая двигателестроительная корпорация – Уфимское моторостроительное производственное объединение», ОКБ «Мотор», 450039, Россия, Уфа, ул. Ферина, 2

³ Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^a smyslovam@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В данной статье приведены результаты подбора электролита для удаления 2-х слойного вакуумно-плазменного покрытия СДП1+ВСДП20 с подложки из стали ЭП866-Ш методом электролитно-плазменного полирования (ЭПП). В статье показано, что покрытие СДП1+ВСДП20 имеет сложный химический состав, изменяющийся по глубине, в результате чего возникают проблемы с его удалением различными химическими и электрохимическими методами. В результате исследования установлено, что данное покрытие может быть удалено методом ЭПП при добавлении в электролит веществ, которые образуют легкорастворимые в воде комплексные соединения с ионами металлов, входящими в состав покрытия и подложки. Показано, что добавка лигандов, в количестве 0,5–2%, может обеспечить равномерное удаление покрытия СДП1+ВСДП20 без повреждения материала подложки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электролитно-плазменное полирование; покрытие СДП1+ВСДП20; удаление покрытия.

Введение

Защитные покрытия являются одним из наиболее действенных способов повышения ресурса и эксплуатационной надежности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), работающих в условиях высоких температур, нагрузок и агрессивных сред. Для обеспечения сопротивления высокотемпературному окислению, газовой коррозии и термической усталости поверхность пера лопаток компрессора высокого давления (КВД), изготавливаемых из стали ЭП866-Ш и сплава ЭП718ИД, подвергается защите путем нанесения 2-х слойного вакуумно-плазменного покрытия СДП1+ВСДП20 [1]. Первый слой на основе никеля (Ni-Cr-Co-Y) является жаростойким связующим, а внешний алюминидный слой (Al-Si-Co-Y) препятствует развитию коррозионных очагов в процессе эксплуатации ГТД. Учитывая сложность сборки лопаток в двигателе, существует риск повреждения их защитного покрытия в виде сколов, забоин и отслаивания, частичное восстановление которого является весьма трудоемким, и в целом ряде случаев лопатки с такими повреждениями бракуются. В связи с этим возникает необходимость полного удаления покрытия с поверхности пера без повреждения материала основы лопатки и сохранения ее геометрических размеров с целью его повторного нанесения.

В настоящее время для удаления покрытий с поверхности рабочих лопаток компрессора используются, в основном, химические, электрохимические и механические методы [2–5]. В случае химического и электрохимического методов обработки поверхностный слой покрытия стравливается полностью, либо разрыхляется, после чего производят гидроабразивную или пескоструйную обработку. Механический способ удаления покрытия предполагает обработку лопаток на полировальном станке с использованием абразивных кругов разной зернистости. Перечисленные способы трудозатратны и не гарантируют полного удаления покрытия. Кроме того, при механической обработке трудно сохранить геометрические размеры лопаток, а химический и электрохимический методы обработки могут привести к насыщению поверхности водородом [6].

Наиболее перспективным методом удаления защитных покрытий является метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) [7]. Данный метод обработки широко используется для выполнения операции полирования широкого круга электропроводных материалов. Обработку выполняют погружением детали в ванну с электролитом, который нагрет до температуры 80–90 °С. При этом к детали прикладывают положительное напряжение (270–300 В) относи-

тельно стенок ванны, а в качестве электролита используют водные растворы солей низкой концентрации [8]. Удаление материала с поверхности детали происходит за счет его окисления химически активной средой парогазовой оболочки, возникающей вокруг обрабатываемой детали, и уноса в электролит в виде растворимых соединений (комплексов), а также за счет кавитационного воздействия пузырьков газа [9].

Цель данной работы – разработка технологии удаления 2-х слойного вакуумно-плазменного покрытия СДП1+ВСДП20 методом ЭПП с подбором соответствующего электролита, обеспечивающего отсутствие повреждения материала подложки из материала ЭП866-Ш.

1. Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали круглые образцы из материала ЭП866-Ш диаметром 25 мм и толщиной 5 мм. Перед нанесением покрытия образцы подвергали термической обработке, включающей отжиг и двойной отпуск [10] с последующей шлифовкой плоских поверхностей до значения шероховатости $Ra = 0,6$ мкм. Покрытие СДП1+ВСДП20 наносили на плоские поверхности образцов по технологии [11], включающей:

1) подготовку поверхности под нанесение покрытия методом ЭПП на установке ЕРР-50ЕМ;

2) нанесение подслоя СДП1 толщиной 5–7 мкм и слоя ВСДП20 толщиной 6–8 мкм в камере установки ВУ-2М в едином вакуумном объеме;

3) высокотемпературный отжиг исследуемых образцов с покрытием в течение 6 часов в печи Nabertherm N60E.

Строение покрытия и диффузионной зоны с материалом подложки исследовали на поперечных шлифах.

Эксперименты по удалению покрытия с поверхности образцов методом ЭПП производили на установке ЕРР-50Е с использо-

ванием экспериментальной рабочей ванны емкостью 2000 мл.

Оценку качества удаления покрытия проводили с интервалами в 1 минуту. При наличии положительной динамики, процесс вели до полного удаления покрытия. Для оценки качества поверхности исследуемых образцов после удаления покрытия использовали следующие критерии:

1) полнота удаления покрытия – по степени выявления структуры материала, характерной для стали ЭП866-Ш;

2) механическое повреждение поверхности подложки – по наличию кратеров и лунок на поверхности образца;

3) химическое и электрохимическое повреждение поверхности подложки – по наличию растравливания структурных составляющих материала на кромках образцов.

Состояние поверхностного слоя после обработки образцов методом ЭПП исследовали на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA100. Детализированный металлографический анализ с определением распределения химических элементов на поверхности образцов и по толщине исходного покрытия выполняли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6490 LV. Шероховатость поверхности оценивали по параметру Ra с использованием профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-210.

С целью определения оптимального состава электролита, обеспечивающего равномерное удаление материала покрытия без повреждения материала образцов, была приготовлена серия растворов. При выборе компонентов раствора исходили из предположения, что достижение равномерного растворения покрытия и одновременного полирования подложки в процессе ЭПП возможно при наличии в его составе лигандов [12] – веществ, которые образуют комплексные соединения с ионами металлов и легко растворяются в воде, в отличие от их оксидов и гидрооксидов. В качестве лигандов могут выступать соли неорганических кислот, а также слабые

кислоты. Для исследования были подобраны наиболее доступные лиганды с наибольшей степенью термодинамической устойчивости с металлами, входящими в состав покрытия и подложки. Предпочтение отдавалось лигандам, образующим соединения с наибольшей номенклатурой элементов, входящих в состав покрытия. Лиганды вводили в состав электролитов в виде небольших добавок (0,5–2 масс.%), при этом основу электролитов составляли компоненты, обеспечивающие необходимые для их работы уровень кислотности и электропроводности [12].

Для исследований были выбраны следующие лиганды, образующие устойчивые соединения с ионами Ni^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} : фториды, сульфаты, цитраты, оксалаты, комплексоны трилон А и трилон Б. Для обеспечения кислотности и электропроводности раствора ЭПП использовали фосфаты, хлориды, сульфаты и нитраты [13]. Для приготовления растворов использовали дистиллированную воду и химические реактивы со степенью чистоты – химически чистый (Х.Ч.) по ГОСТ 13867-68.

2. Результаты

Анализ поверхности поперечного шлифа на образце с покрытием после высокотемпературного отжига (рис. 1, а) позволил выявить, что толщина покрытия, подлежащего удалению, составляет порядка 14...16 мкм. Установлено, что покрытие имеет сложную структуру с несколькими диффузионными зонами. Внешний слой ВСДП20 имеет ячеистое строение, а внутренний слой СДП1 – сплошную структуру (рис. 1, а). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что на отдельных участках слой ВСДП20 содержит мелкодисперсную капельную фазу диаметром до 200 нм с повышенным (до 60 масс.%) содержанием алюминия (рис. 1, б).

Характер распределения химических элементов по глубине покрытия СДП1+ВСДП20, подлежащего удалению, представлен на рис. 2. Видно, что, несмотря на поочередное нанесение слоев, в результате высокотемпературного отжига происходит «диффузионное перемешивание» химических элементов из внутреннего слоя СДП1 и внешнего слоя ВСДП20 (рис. 2). Происходит увеличение концентрации никеля во внешнем слое ВСДП20 до 30 масс.%, и увеличение концентрации алюминия в слое СДП1 до 35 масс.%. Результаты оценки качества удаления покрытия СДП1+ВСДП20 методом ЭПП в исследуемых растворах приведены в табл. 1.

Результаты оценки качества удаления покрытия СДП1+ВСДП20 методом ЭПП в исследуемых растворах приведены в табл. 1.

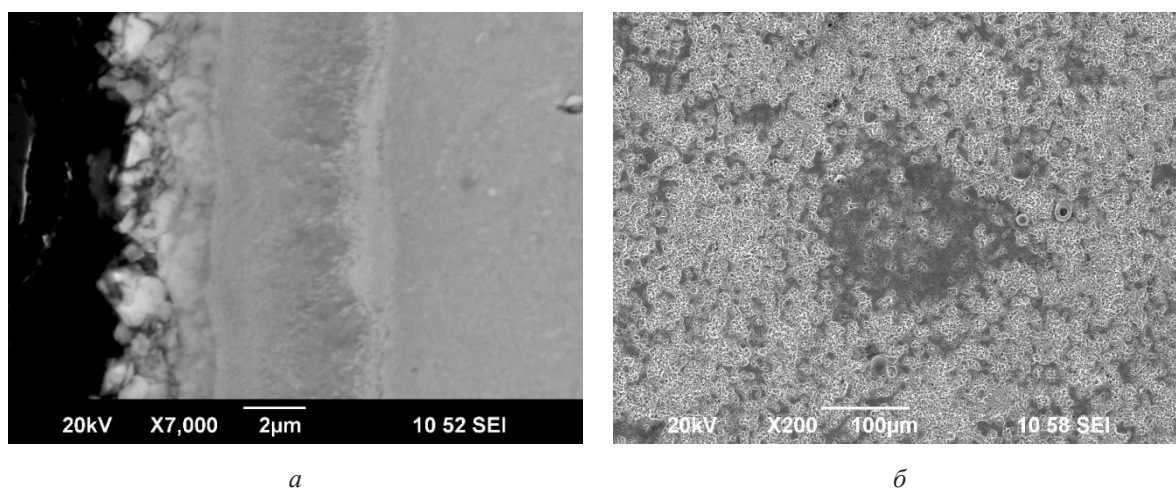


Рис. 1. Внешний вид покрытия СДП1+ВСДП20 после высокотемпературного отжига: а – на поперечном шлифе; б – на плоской поверхности

Fig. 1. Appearance of the SDP1+VSDP20 coating after high-temperature annealing: а – on a transverse section; б – on a flat surface

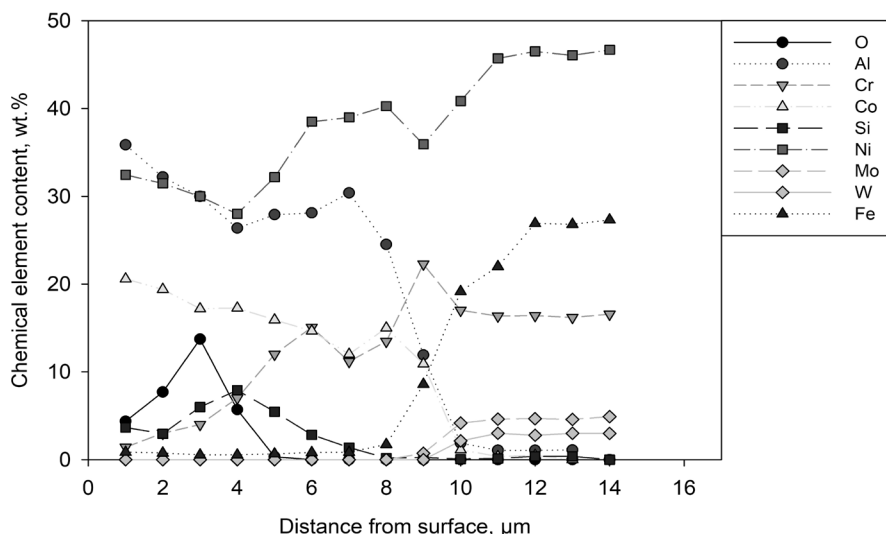


Рис. 2. График распределения химических элементов в покрытии СДП1+ВСДП20 после высокотемпературного отжига

Fig. 2. Graph of the distribution of chemical elements in the SDP1+VSDP20 coating after high-temperature annealing

Таблица 1. Результаты оценки качества удаления покрытия СДП1+ВСДП20 с образцов из материала ЭП866-Ш методом ЭПП

Table 1. Results of assessing the quality of removal of the SDP1+VSDP20 coating from samples made of EP866-Sh material using the EPP method

| № / No. | Состав раствора / Composition of the solution | Время удаления покрытия, мин / Coating removal time, min | Присутствие (+) / отсутствие (-) кратеров, лунок на поверхности / Presence (+) / absence (-) of craters, holes on the surface | Степень выявления структурных составляющих подложки / Degree of identification of the structural components of the substrate | Присутствие (+) / отсутствие (-) растратов по границам зерен на кромках / Presence (+) / absence (-) of stains along grain boundaries on the edges |
|---------|---|--|---|--|--|
| 1 | NH_4NO_3 | 14 | + | Высокая / High | + |
| 2 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 10 | + | Средняя / Medium | + |
| 3 | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ | 16 | + | Высокая / High | + |
| 4 | NH_4Cl | 12 | + | Средняя / Medium | + |
| 5 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Оксалат ион / Oxalate ion | 7 | - | Минимальная / Minimum | - |
| 6 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Цитрат ион / Citrate ion | 7 | - | Минимальная / Minimum | - |
| 7 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Оксалат ион / Oxalate ion Цитрат ион / Citrate ion | 7 | - | Минимальная / Minimum | - |
| 8 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ NaF | 8 | + | Высокая / High | + |
| 9 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Оксалат ион / Oxalate ion NaF | 7 | - | Средняя / Medium | + |
| 10 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Трилон Б / Trilon B | 7 | - | Минимальная / Minimum | - |

Анализ состояния поверхности образцов после полного или частичного удаления покрытия с использованием растворов, приведенных в табл. 1, показал, что в растворах 1...4 (без добавления лигандов) проявля-

ется сильное растравливание структурных составляющих материала подложки. Вдоль кромки образцов образуются лунки глубиной 0,5–5 мкм (рис. 3).

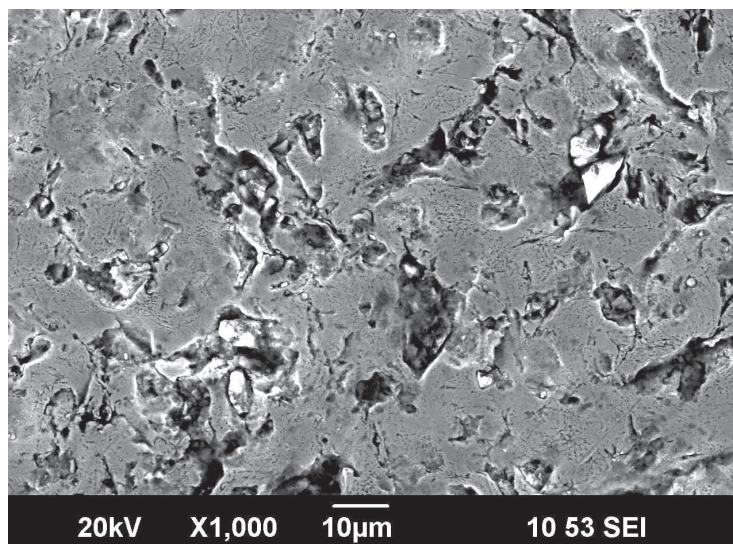


Рис. 3. Увеличенное изображение дефектов, возникающих на поверхности после полного удаления покрытия СДП1+ВСДП20

Fig. 3. Enlarged image of defects appearing on the surface after complete removal of the SDP1+VSDP20 coating

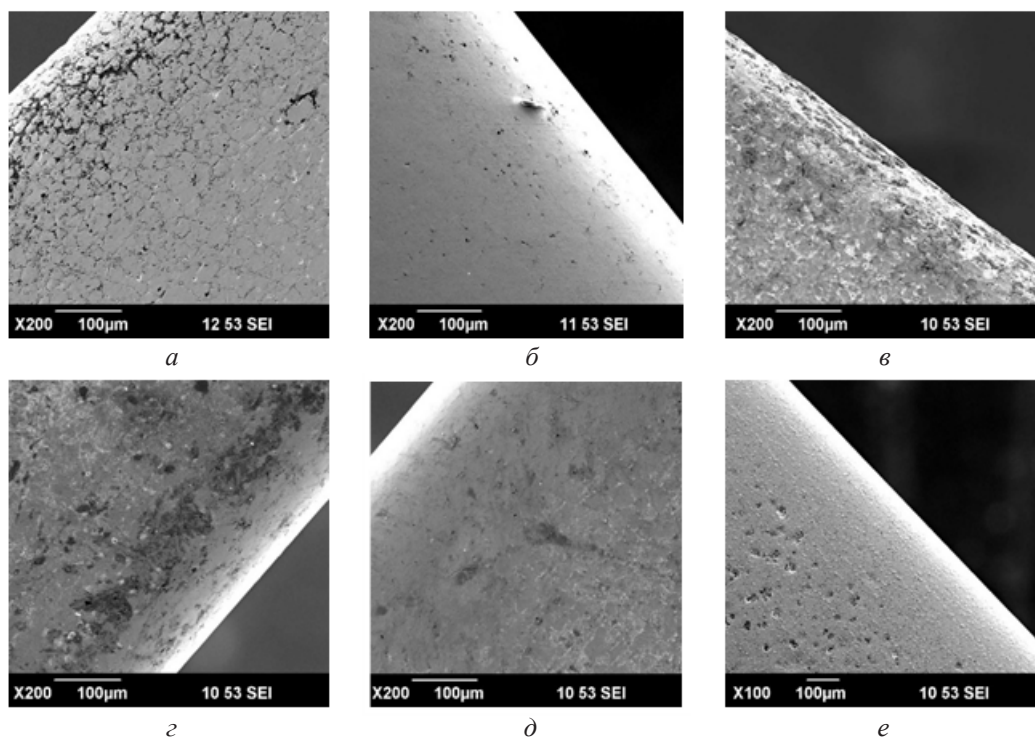


Рис. 4. Увеличенное изображение кромок образцов после удаления покрытия методом ЭПШ в различных растворах: а – раствор №2; б – раствор №5; в – раствор №6; г – раствор №10; д – раствор №7; е – раствор №9

Fig. 4. Enlarged image of sample edges after removing the coating using the EPT method in various solutions: а – solution No. 2; б – solution No. 5; в – solution No. 6; г – solution No. 10; д – solution No. 7; е – solution No. 9

Добавка в электролит лигандов, приводит к уменьшению количества механических дефектов, а также степени вытравливания структурных составляющих, при этом время удаления покрытия сокращается (табл. 1). Состояние поверхности образцов после удаления покрытия в растворах, содержащих добавку различных лигандов, представлено на рис. 4–5. Из рис. 4 видно, что наименьшее количество дефектов на поверхности и наименьшее вытравливание структуры материала подложки наблюдается при обработке в растворе №5, содержащем в качестве лиганда оксалат ион.

На рис. 6 показан внешний вид образца после частичного и полного удаления покрытия в растворе №5. После 4 мин ЭПП на поверхности образцов присутствуют остатки темно-серого покрытия ВСДП20 и остатки слоя СДП1 в виде тонких полупрозрачных пленок (рис. 6, а), которые визуально отличаются по сравнению с полностью полированной подложкой (рис. 6, б).

Капельная фаза на поверхности образцов четко проявляется после 30 секунд ЭПП (рис. 7).

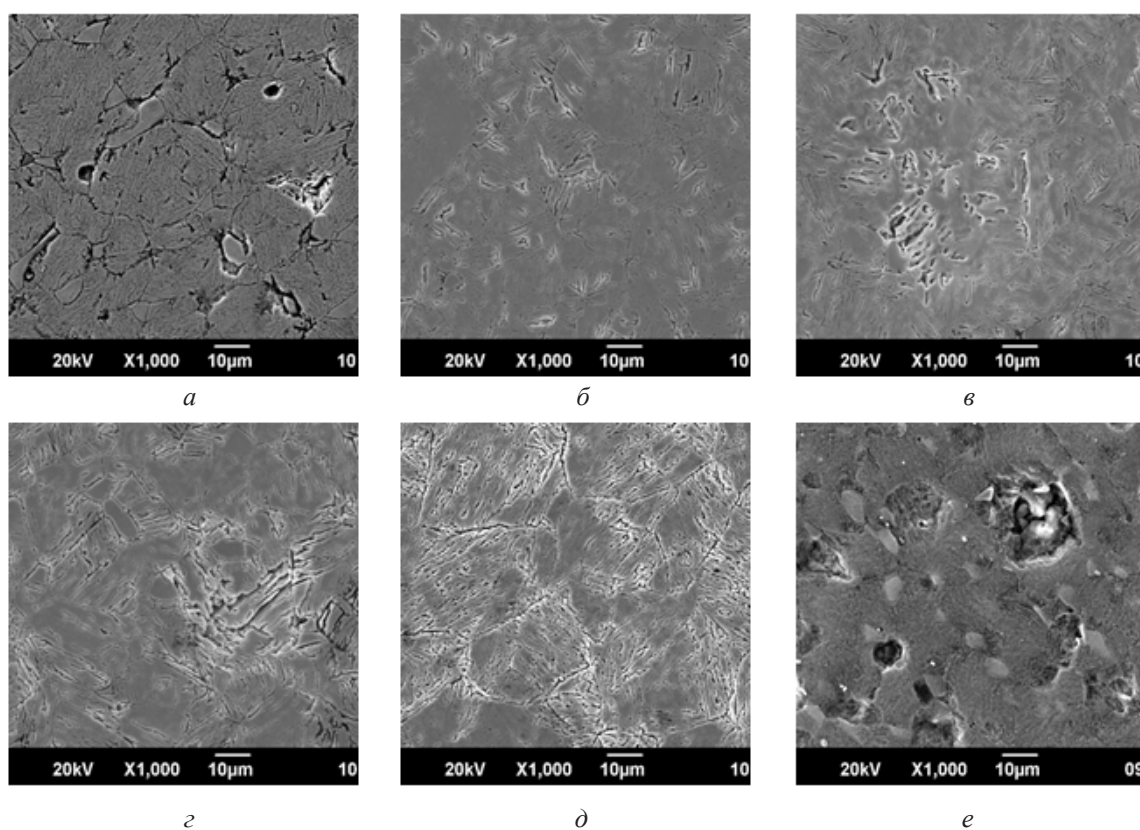


Рис. 5. Увеличенное изображение плоских поверхностей образцов после удаления покрытия методом ЭПП в различных растворах:
а – раствор №2; б – раствор №5; в – раствор №6; г – раствор №10;
д – раствор №7; е – раствор №9

Fig. 5. Enlarged image of the flat surfaces of the samples after removing the coating using the EPT method in various solutions:
a – solution No. 2; б – solution No. 5; в – solution No. 6; г – solution No. 10;
д – solution No. 7; е – solution No. 9

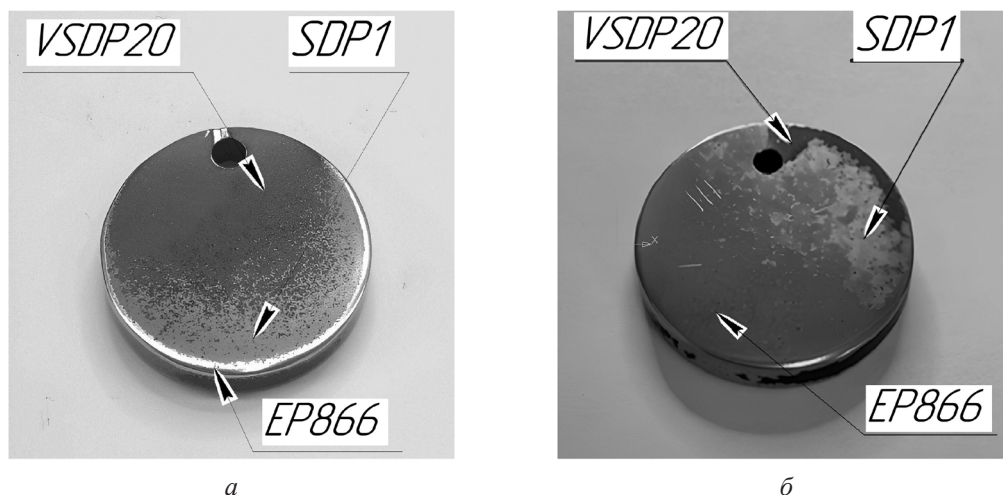
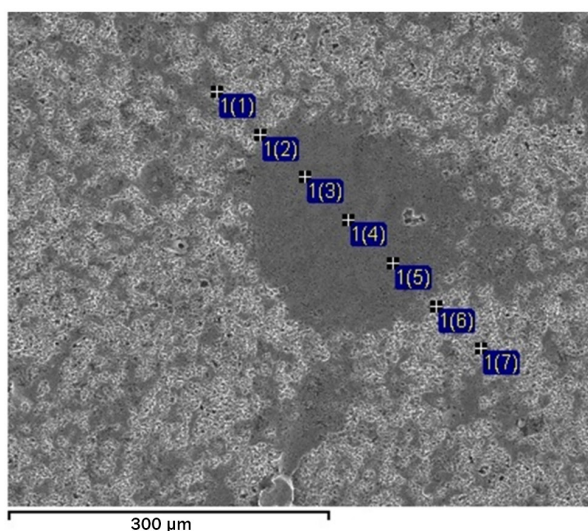


Рис. 6. Внешний вид образцов после удаления покрытия методом ЭПП в растворе №5:
а – после 4 мин; б – после 7 мин

Fig. 6. Appearance of the samples after removing the coating using the EPP method in solution No. 5:
а – after 4 min; б – after 7 min



| Spectrum | Al | Si | Cr | Fe | Co | Ni |
|----------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 1(1) | 24.86 | 12.03 | 26.15 | 1.36 | 18.65 | 12.26 |
| 1(2) | 43.43 | 0 | 4.72 | 1.08 | 20.29 | 30.48 |
| 1(3) | 48.42 | 0 | 1.13 | 1.17 | 25.65 | 23.63 |
| 1(4) | 52.31 | 0 | 0.77 | 0.90 | 26.53 | 19.51 |
| 1(5) | 55.13 | 0 | 1.24 | 0 | 25.13 | 18.50 |
| 1(6) | 30.02 | 0 | 6.54 | 1.47 | 20.93 | 31.04 |
| 1(7) | 28.08 | 3.01 | 14.50 | 1.64 | 18.08 | 24.11 |

Рис. 7. Увеличенное изображение поверхности образца с определением элементного состава в нескольких точках после 30 сек. ЭПП в растворе №5

Fig. 7. Enlarged image of the sample surface with determination of the elemental composition at several points after 30 sec. EPP in solution No. 5

3. Обсуждение

Анализ состояния исследуемых образцов по их плоской поверхности и на кромке показал, что наилучшим результатом по удалению покрытия является ЭПП в растворе №5 (водный раствор сульфата аммония с добавлением оксалат иона). Выявление структурных составляющих в этом элек-

тролите минимальное, кромки образцов гладкие, глубокие дефекты (лунки, рельефные впадины) отсутствуют. Это связано, в первую очередь, с тем, что оксалат ионы образуют устойчивые соединения со всеми ионами, входящими в состав покрытия СДП1+ВСД20: Ni^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Cr^{3+} .

Установлено, что в процессе ЭПП скорость удаления плотной капельной фазы на порядок ниже, чем скорость удаления менее плотного верхнего слоя ВСДП20, который обладает большей площадью контакта с полирующим раствором, благодаря ячеистому строению, и легко отслаивается по границам ячеек из-за кавитационного воздействия пузырьков газа, составляющих парогазовую оболочку вокруг обрабатываемых образцов при ЭПП [9]. Это приводит к тому, что на поверхности образцов после ЭПП присутствуют небольшие участки диаметром 40–80 мкм и выступающие над поверхностью на 2–5 мкм, в составе которых преобладает алюминий, в связи с чем, их можно идентифицировать как остатки капельной фазы с катода ВСДП20 (рис. 7, 8).

В дальнейшем, чтобы исключить появление приведенных выше отклонений по качеству удаления покрытия, обработку проводили в две стадии. На первой стадии образец, в течение 1 мин обрабатывали в растворе, содержащем лиганд F^- . Наличие

данного лиганда в электролите способствует избирательному растворению капельной фазы на поверхности благодаря образованию устойчивых комплексных соединений с Al^{3+} . На второй стадии, длительностью 4 мин образец обрабатывали в растворе №5, содержащем сульфат аммония и оксалат ион.

Удаление покрытия по предложенной двухстадийной схеме позволило добиться однородной полированной поверхности по всей обрабатываемой площади образца, внешний вид которой полностью соответствует участку, представленному на рис. 5, б: без механического повреждения материала образцов и минимальным растравом по границам зерен.

С целью удаления следов растравов по границам зерен и повышения качества поверхности после удаления покрытия методом ЭПП может быть рекомендовано проведение финишной полировки в растворе №1 в течение 1–2 мин, обеспечивающей блестящую поверхность с шероховатостью не более Ra 0,5 мкм.

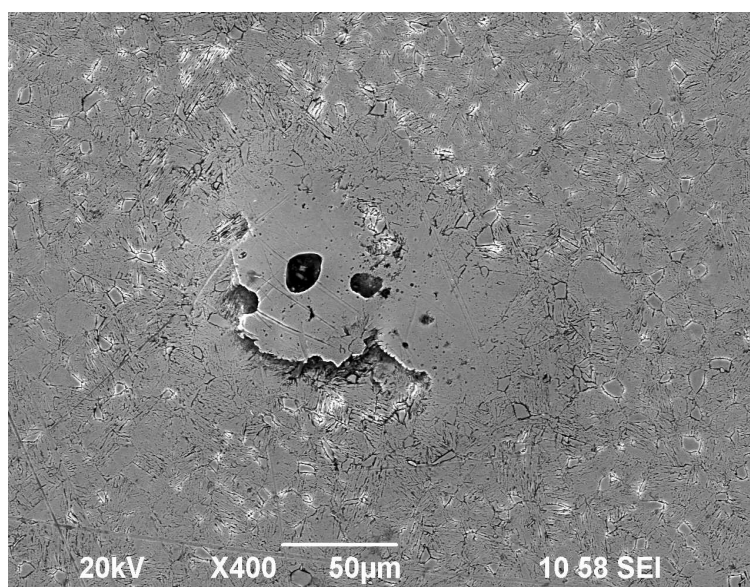


Рис. 8. Увеличенное изображение дефектов, возникающих после полного удаления покрытия СДП1+ВСДП20 с металлической подложки в растворе №5

Fig. 8. Enlarged image of defects that appear after complete removal of the SDP1+VSDP20 coating from the metal substrate in solution No. 5

Выводы

Введение в водный раствор сульфата аммония небольшого количества лигандов в значительной степени повышает скорость и равномерность удаления покрытия СДП1+ВСДП20 с поверхности образцов из стали ЭП866Ш методом ЭПП. Наилучший результат без образования механических дефектов с минимальными растрывами по границам зерен и остатками покрытия на поверхности, достигается при двухстадийном способе обработки, включающем предварительное полирование в растворе, содержащем фторид ионы, с целью растворения капельной фазы, состоящей преимущественно из алюминия, и последующего полирования в растворе с добавлением оксалат ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Y.A. Ionic plasma protective coatings for gas turbine engine blades // *Conversion in Mechanical Engineering*. 1999. Vol. 2. P. 42–47. (In Russian) [Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Конверсия в машиностроении*. 1999. № 2. С. 42–47].
2. Patent No. 2094546 Russian Federation, IPC C25F 5/00 (1995.01). Method for removing a coating from a metal substrate: No. 95104824/02; applied 03.04.1995; publ. 27.10.1997 / Amirhanova N.A., Nevyanceva R.R., Belonogov V.A., Timergazina T.M. 4 p. (In Russian) [Патент № 2094546 Российская Федерация МПК C25F 5/00 (1995.01). Способ удаления покрытия с металлической подложки: № 95104824/02; заявл.: 03.04.1995; опубл.: 27.10.1997 / Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Белоногов В.А., Тимергазина Т.М. 4 с.].
3. Bardinova S.N., Smirnov A.V. Development of coating removal technologies in the Repair of Gas Turbine Engine Parts // *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov*. 2018. Vol. 2. P. 11–16. (In Russian) [Бардинова С.Н., Смирнов А.В. Развитие технологий удаления покрытий при ремонте деталей ГТДВ // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева*. 2018. № 2. С. 11–16].
4. Patent No. 22112616 Russian Federation, IPC C25F 5/00 (2000.01). Nickel based aluminide coating removal method: No. 2001130186/02; applied 12.11.2001; publ. 27.08.2003 / Budinovskij S.A., Muboyadzhyan S.A., Pavlov A.U. 5 p. (In Russian) [Патент № 22112616 Российская Федерация МПК C25F 5/00 (2000.01). Способ удаления алуминидного покрытия на основе никеля: № 2001130186/02; заявл.: 12.11.2001; опубл.: 27.08.2003 / Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Павлов А.Ю. 5 с.].
5. Eliseev U.S., Abraimov N.V., Krymov V.V. *Chemical-Thermal Treatment and Protective Coatings in Aircraft Engine Building*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1999, 595 p. (In Russian) [Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. Москва: Высшая школа, 1999. 595 с.]
6. Yudin K.A. *Safety Precautions When Working with Chemicals*. Moscow: VCSPPS PROFIZDAT, 1964. 144 p. (In Russian) [Юдин К.А. Техника безопасности при работе с химическими веществами. Москва: ВЦСПС ПРОФИЗДАТ, 1964. 144 с.]
7. Parfenov E.V., Nevyanceva R.R., Bybin A.A. Generalized mathematical model of the technological process of electrolytic-plasma removal of coatings // *Vestnik UGATU*. 2007. Vol. 9. P. 33–40. (In Russian) [Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р., Быбин А.А. Обобщенная математическая модель технологического процесса электролитно-плазменного удаления покрытий // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2007. Т. 9. № 7. С. 33–40].
8. Patent No. 2694397 Russian Federation, IPC C25F 5/00 (2006.01). Method for electrolytic-plasma removal of coatings from parts made of alloyed steels and heat-resistant alloys: No. 2018138849; applied 06.11.2018; publ. 12.07.2019 / Smyslov A.M., Tamindarov D.R., Mingazhev A.D., et al. 7 p. (In Russian) [Патент № 2694397 Российская Федерация МПК C25F 5/00 (2006.01). Способ электролитно-плазменного удаления покрытий с деталей из легированных сталей и жаропрочных сплавов: № 2018138849; заявл.: 06.11.2018; опубл.: 12.07.2019 / Смыслов А.М., Таминдаров Д.Р., Мингажев А.Д. [и др.]. 7 с.]
9. Plotnikov N.V., Smyslov A.M., Tamindarov D.R. About questions about the model of electrolytic-plasma surface polishing // *Vestnik UGATU*. 2013. Vol 4. No. 17. P. 90–95. (In Russian) [Плотников Н.В., Смыслов А.М., Таминдаров Д.Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2013. Т. 17. № 4. С. 90–95].
10. Kablov E.N. *Cast Blades for Gas Turbine Engines*. Moscow: MISIS, 2001. 632 p. (In Russian) [Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Москва: МИСИС, 2001. 632 с.]

11. Patent No. 2585580 Russian Federation, IPC C23C 14/48 (2006.01), C25F 3/24 (2006.01). Method for protecting turbomachine blades made of alloy steels from erosion and salt corrosion: No. 2015107364/02; applied 03.03.2015; publ. 27.05.2016 / Smyslov A.M., Dyblenko U.M., Mingazhev A.D., et al. 7 p. (In Russian) [Патент № 2585580 Российская Федерация МПК C23C 14/48 (2006.01), C25F 3/24 (2006.01). Способ защиты лопаток турбомашин из легированных сталей от эрозии и солевой коррозии: № 2015107364/02; заявл.: 03.03.2015; опубл.: 27.05.2016 / Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Мингажев А.Д. [и др.]. 7 с.].

12. Yanson E.Y. Complex Compounds. Moscow: Vysshaya Shkola, 1968. 176 p. (In Russian) [Янсон Э.Ю. Комплексные соединения. Москва: Высшая школа, 1968. 176 с.].

13. Příbil R. Complexons in Chemical Analysis / edited by Y.Y. Lurie. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1955. 188 p. (In Russian) [Прибил Р. Комплексоны в химическом анализе / ред. Ю.Ю. Лурье. Москва: Издательство иностранной литературы, 1955. 188 с.].