

УДК 621.793

В. С. ЕФАНОВ<sup>1</sup>, И. А. ПЕТРИК<sup>1</sup>, А. Н. ПРОКОПЕНКО<sup>1</sup>, А. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## НАНЕСЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Показана необходимость повышения ресурса работы лопаток турбины за счет проектирования многослойного комплексного покрытия с учетом локального увеличения толщины слоя в зоне возникновения повреждений во время эксплуатации. Разработано и применено специализированное приспособление для нанесения дополнительного слоя покрытия на входную кромку пера лопатки. Проведено исследование влияния теневых зон приспособления на формирование дифференцированного слоя покрытия. Отработана технология нанесения дополнительных слоев покрытий на входную кромку пера лопатки, с целью снижения эрозионно-коррозионного воздействия и увеличение ресурса работы лопатки.

**Ключевые слова:** турбина, лопатка рабочая, жаростойкость, эрозионно-коррозионное воздействие, ионно-плазменные покрытия.

### Введение

В настоящее время основной перспективой развития современных газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного назначения, является повышение температуры рабочего газа турбины, что обеспечивает рост мощности и экономических характеристик [1].

Одним из направлений повышения характеристик существующих конструкций ГТД, в том числе продления ресурса работы лопаток турбины, является применение защитных ионно-плазменных многослойных жаростойких покрытий обеспечивающих работу лопаток в пределах температур 900–1200°C и защиту от эрозионно-коррозионного воздействия [2, 3].

### Состояние вопроса

В процессе эксплуатации лопаток турбины компрессора (ТК) на вспомогательном двигателе, имеют место повреждения входной кромки пера лопатки с покрытием ГЦП+СДП-2 (ГЦП - газодиффузионное покрытие CrAl, СДП-2 - жаростойкой сплав системы Ni-Cr-Al-Y) (рис. 1). Повреждения лопаток квалифицированы как эрозионно-коррозионный износ в условиях действия рабочих температур, при этом перегрева материала самой лопатки (ЖС32-ВИ) во время эксплуатации не установлено.

Анализ характера и мест возникновения дефектов позволил рассмотреть необходимость примене-

ние комплексного многослойного покрытия с увеличенным защитным слоем на входной кромке пера лопатки.

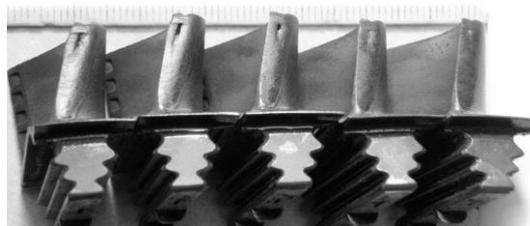


Рис. 1. Эрозионно-коррозионный износ входной кромки пера лопаток с серийным покрытием ГЦП+СДП-2

Комплексное покрытие должно учитывать функциональное назначение каждого слоя в различных зонах пера лопатки. Так, на входной кромке лопатки требуется защита от высоких температур, а в районе выходной кромки нужно пластичное покрытие с высоким сопротивлением к образованию трещин термической усталости. Для обеспечения этих требований выбрано комплексное многослойное покрытие с локальным нанесением дополнительных слоев.

### Цель работы

Повышение ресурса работы лопаток путем совершенствования технологии нанесения комплексного жаростойкого покрытия с применением метода

дифференцированного формирования слоев и учетом функционального назначения различных зон лопатки.

### Результаты проведенных работ

В качестве замены существующего покрытия ГЦП+СДП-2 предложено комплексное многослойное покрытие ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16), при этом два последних дополнительных слоя СДП-2 и ВСДП-16 (ВСДП-16 - диффузионное покрытие системы Al-Ni-Y) наносятся только на входную кромку пера лопатки (рис. 2).

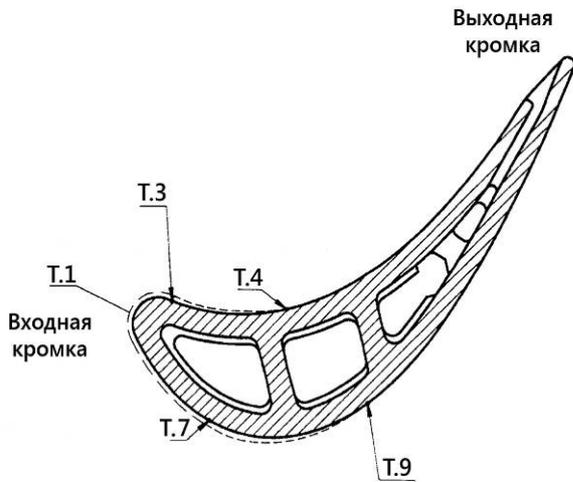


Рис. 2. Схема нанесения дополнительного слоя покрытия (доп. слой указан пунктиром)

Такой вариант нанесения комплексного покрытия обеспечивает на входной кромке защиту от высоких температур (1100-1200°C), а на выходной кромке сопротивление к образованию трещин термической усталости.

Согласно схемы (см. рис. 2) толщина дополнительных слоев в точке T.1 должна быть максимальной, а в точках T.4 и T.9 минимальной. Учитывая эти требования спроектировано и изготовлено специализированное приспособление (оснастка) (рис. 3).

При проектировании оснастки проведены расчеты необходимых технологических зазоров вдоль вертикальной оси входной кромки, что обеспечило требуемое формирование теневой зоны, при нанесении покрытия, по профилю пера лопатки и выполнение требований схемы дифференцированного распределения толщины (см. рис. 2).

Перед нанесением многослойного комплексного жаростойкого покрытия с увеличенной толщиной покрытия на входной кромке потребовалась обработка технологии нанесения и формирования дифференцированных слоев покрытий СДП-2 и ВСДП-16.

Для обработки технологии нанесения и формирования дифференцированных слоев покрытий СДП-2 и ВСДП-16 использовались лопатки без предварительно нанесенного покрытия ГЦП. Контроль толщины сформированного дифференцированного слоя производился в точках согласно схемы (рис. 4).

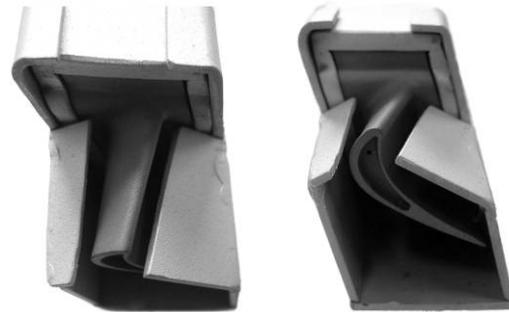


Рис. 3. Внешний вид оснастки для нанесения дополнительного слоя покрытия с закрепленной в ней лопаткой ТК

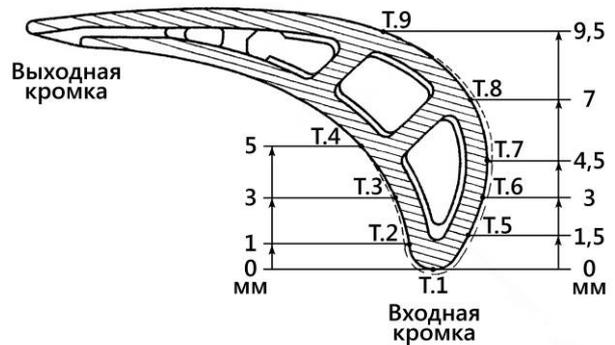


Рис. 4. Схема расположения контрольных точек (T.1...T.9) измерений толщины покрытия

Результаты измерений толщины слоя покрытия СДП-2, нанесенного на входную кромку с применением специализированной оснастки (см. рис. 3), представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений толщины покрытия СДП-2 в контрольных точках (см. рис. 4)

Обр. №	Толщина слоя покрытия, мкм								
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9
1	50	44	19	6	50	46	42	8	2
2	48	42	17	3	47	42	40	7	1
3	48	44	19	4	48	45	41	5	2

Из таблицы 1 следует, что максимальная толщина покрытия СДП-2 в точке T.1 - 48...50 мкм, а минимальная 1...6 мкм в точках T.4 и T.9. Установлено равномерное уменьшение толщины покрытия от T.1 к T.9 и T.4.

Микроструктурный анализ шлифов покрытия СДП-2 в точках Т.4 и Т.9 (рис. 5) установил, что сцепление слоя с поверхностью лопатки достаточно прочное, хорошего качества без дефектов, отслоений не обнаружено.

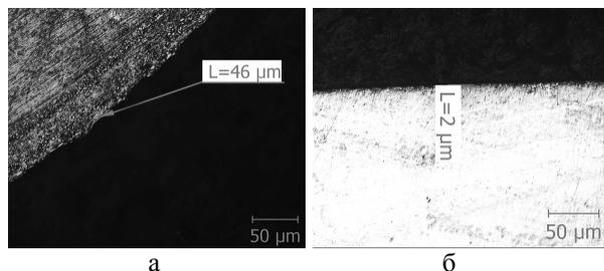


Рис. 5. Микроструктура слоя покрытия СДП-2: а – точка Т.4; б – точка Т.9 (см. рис. 4)

Учитывая полученные данные по распределению толщины (см. табл. 1) в процессе нанесения слоя СДП-2, произведено локальное нанесение покрытия ВСДП-16 на входную кромку с применением специализированной оснастки (см. рис. 3). Исследование данного покрытия проводилось до диффузионного отжига с целью получения объективного результата замера толщины слоя. Результаты измерений толщины слоя ВСДП-16 представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений толщины покрытия ВСДП-16 в контрольных точках (см. рис. 4)

Обр. №	Толщина слоя покрытия, мкм								
	Т.1	Т.2	Т.3	Т.4	Т.5	Т.6	Т.7	Т.8	Т.9
4	18	12	9	3	14	13	10	8	2
5	21	14	10	4	16	14	11	9	3
6	20	12	8	2	15	14	10	8	2

Из таблицы 2 следует, что максимальная толщина покрытия ВСДП-16 в точке Т.1 - 18...21 мкм, а минимальная 2...4 мкм в точках Т.4 и Т.9. Установлено равномерное уменьшение толщины покрытия от Т.1 к Т.9 и Т.4.

Микроструктурный анализ шлифов покрытия ВСДП-16 в точках Т.4 и Т.9 (рис. 6) установил, что сцепление слоя с поверхностью лопатки достаточно прочное, хорошего качества без дефектов, отслоений не обнаружено.

Из полученных результатов измерений толщин покрытий СДП-2 и ВСДП-16 по профилю пера лопатки (см. табл. 1 и 2), можно сделать вывод, что использование специализированной оснастки (см. рис. 3) обеспечило формирование дифференцированных слоев покрытия, требуемых величин.

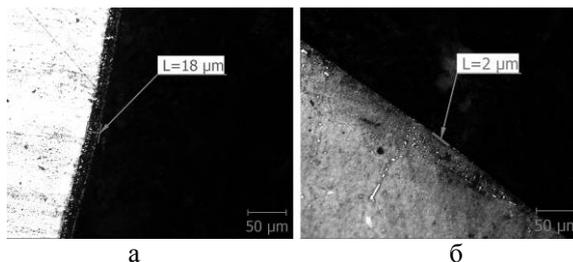


Рис. 6. Микроструктура слоя покрытия ВСДП-16: а – точка Т.5; б – точка Т.9 (см. рис. 4)

Технология нанесения комплексного жаростойкого покрытия ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16 на входную кромку) требовала предварительного нанесения слоя серийного покрытия ГЦП+СДП-2. Толщина серийного покрытия ГЦП+СДП-2 составляет 40...50 мкм по всему периметру пера лопатки.

Результаты измерений толщины слоя ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16 на входной кромке) осуществлялось по схеме (рис.3) в контрольных точках в двух сечениях (рис.7) и представлены в таблице 3. Каждый из нанесенных слоев прошел закрепляющий диффузионный отжиг.

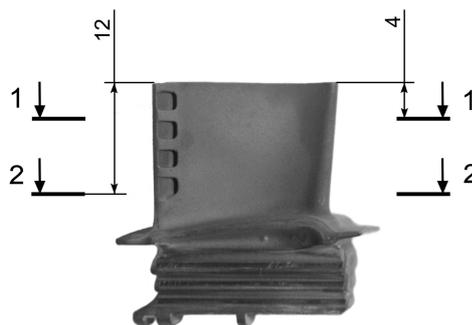


Рис. 7. Схема мест изготовления микрошлифов для замера толщины покрытия

Таблица 3

Результаты измерений толщины слоя ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16 на входную кромку лопатки) в сечении 1-1 и сечении 2-2

Обр. №	Толщина слоя покрытия, мкм								
	Т.1	Т.2	Т.3	Т.4	Т.5	Т.6	Т.7	Т.8	Т.9
Сечение 1-1									
7	92	84	57	46	91	92	82	47	45
8	95	87	58	45	93	94	84	49	47
9	93	86	58	44	90	89	81	46	44
Сечение 2-2									
7	91	80	50	45	84	88	83	57	43
8	94	85	53	46	87	90	86	56	45
9	93	83	51	45	84	84	82	55	43

Из таблицы 3 следует, что максимальная толщина многослойного покрытия приходится в точке Т.1 - 91...94 мкм, минимальная 43...47 мкм в точках Т.4 и Т.9. Установлено равномерное уменьшение толщины покрытия от Т.1 к Т.9 и Т.4.

Микроструктурный анализ шлифов (рис. 8) покрытия ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16) позволил установить, что:

- слои ГЦП полностью продиффундировал в состав *материала* лопатки;
- слой СДП-2 равномерно нанесен на все трактовые *поверхности* и имеет толщину 40...45 мкм;

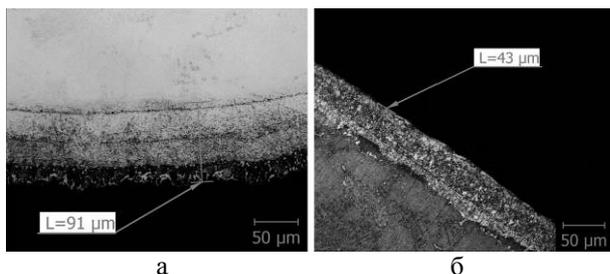


Рис. 8. Микроструктура многослойного покрытия: а - точка Т.1; б - точка Т.9 (см. рис. 4) в сечении 2-2

- дополнительный слой СДП-2 имеет дифференцированное распределение толщины с максимальным ее значением в 45 мкм на входной кромке, а минимальное в средней зоне спинки и корыта;

- дополнительный слой ВСДП-16 наносился последним, также имеет дифференциальное распределение, но при этом он на 80 % продиффундировал в состав дополнительного слоя СДП-2.

Все слои покрытия хорошего качества, трещины, поры или отслоения не обнаружены

### Заключение

Рассмотрены характерные дефекты лопаток турбины компрессора возникающие в процессе эксплуатации двигателя.

Для защиты лопаток от эрозионно-коррозионного воздействия в процессе эксплуатации предложено применение комплексного диффузионного покрытия с формированием дополнительных градиентных слоев в зонах максимальной нагрузки.

Отработана технология формирования комплексного жаростойкого покрытия ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16 на входной кромке), с примене-

нием специализированной оснастки, обеспечивающий дифференцированное распределение толщины слоев по профилю пера лопатки.

Применение *комплексного* многослойного жаростойкого покрытия ГЦП+СДП-2+(СДП-2+ВСДП-16 на входной кромке пера лопатки), взамен существующего ГЦП+СДП может обеспечить увеличение ресурса рабочей лопатки ТК минимум в два раза.

### Литература

1. Мубояджян, С. А. Эрозионно-стойкие покрытия для лопаток компрессора ГТД [Текст] / С. А. Мубояджян // *Металлы*. – 2009. – № 3. – С. 3-20.
2. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлослоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин [Текст] / С. А. Будиновский, С. А. Мубояджян, А. М. Гаямов и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 12. – С. 16-21.
3. Градиентные комплексные защитные покрытия для монокристаллических турбинных лопаток теплонапряженных ГТД [Текст] / В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, И. П. Конакова и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2007. – № 5. – С. 41-48.

### References

1. Muboyadzhyan, S. A. Erozionno-stojkie pokrytiya dlya lopatok kompressora GTD [Erosion-resistant coatings for compressor blades GTE]. *Metally*, 2009, no. 3, pp. 3-20.
2. Budinovskij, S. A., Mubojadzhyan, S. A., Gajamov, A. M. Razrabotka ionno-plazmennyh zharostojkih metallicheskih sloev teplozashchitnyh pokrytij dlya ohlazhdaemyh rabochih lopatok turbin [Development of ion-plasma heat-resistant metal layers of heat-shielding coatings for cooled turbine blades], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 12, pp. 16-21.
3. Kuznecov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P. Gradientnye kompleksnye zashchitnye pokrytiya dlya monokristal'nyh turbinnih lopatok teplonapryazhennyh GTD [Gradient complex protective coatings for single-crystal turbine blades of heat-stressed GTE], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 5, pp. 41-48.

Поступила в редакцию 16.04.2017, рассмотрена на редколлегии 9.06.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф, зав. кафедры ТАД А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**НАНЕСЕННЯ БАГАТОШАРОВОГО ЖАРОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ  
НА ЛОПАТКИ ТУРБИНИ, СХИЛЬНИХ ДО ЕРОЗІЙНО-КОРОЗІЙНОГО ВПЛИВУ*****В. С. Єфанов, І. А. Петрик, О. М. Прокопенко, О. В. Овчинников***

Показана необхідність підвищення ресурсу роботи лопаток турбіни за рахунок проектування багат шарового комплексного покриття з урахуванням локального збільшення товщини шару в зоні виникнення пошкоджень під час експлуатації. Розроблено та застосовано спеціалізоване пристосування для нанесення додаткового шару покриття на вхідний кромці пера лопатки. Проведено дослідження впливу тінювих зон пристосування на формування диференційованого шару покриття. Відпрацьовано технологію нанесення додаткових шарів покриттів на вхідну кромку пера лопатки, з метою зниження ерозійно-корозійного впливу і збільшення ресурсу роботи лопатки.

**Ключові слова:** іонно-плазмові покриття, турбіна, лопатка робоча, жаростійкість, ерозійно-корозійна дія.

**MULTI-LAYER HEAT-RESISTANT COATING DEPOSITION  
ON TURBINE BLADES EXPOSED TO EROSION-CORROSION*****V. S. Yefanov, I. A. Petrik, A. N. Prokopenko, A. V. Ovchinnikov***

A need indicated to extend turbine blade operational life due to multi-layer complex coating with regard to local layer thickness increase in damage zones occurred during operation. A special device was developed and applied for additional coating deposition on blade airfoil leading edge. A device shadow zone effect on coating differential layer formation was investigated. Tryout of additional layer deposition on blade airfoil leading edge was performed to reduce erosion-corrosion effect and to extend blade operational life.

**Keywords:** turbine, rotor blade, heat resistance, erosion-corrosion resistance, ion-plasma deposited coatings.

**Єфанов Володимир Сергєєвич** – аспірант Запорозького національного технічного університета, Запорозьке, Україна, e-mail: vsyefanov@gmail.com.

**Петрик Ігорь Андреевич** – канд. техн. наук, Головний сварщик АО «МОТОР СИЧ», Запорозьке, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Прокопенко Александр Николаевич** – канд. техн. наук, зам. головного сварщика АО «МОТОР СИЧ», Запорозьке, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Овчинников Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрой ОТСП, Запорозький національний технічний університет, Запорозьке, Україна, e-mail: iaov@rambler.ru.

**Yefanov Vladimir Sergeevich** – post-graduate student of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: vsyefanov@gmail.com.

**Petrik Igor Andreevich** – candidate of science, Chief Welding Engineer «MOTOR SICH» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Prokopenko Aleksandr Nikolaevich** – candidate of science, Deputy Chief Welding Engineer «MOTOR SICH» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Ovchinnikov Aleksandr Vladimirovich** – D.Sc, Professor, Head of department «Welding Technology and Equipment»; Zaporozhye national technical university, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: iaov@rambler.ru.