

**TiN COATING THICKNESS UNIFORMITY IMPROVEMENT FROM VACUUM
ARC DISCHARGE PLASMA ON A BLISK SIMULATOR**

*Aleksey Valeryevich Oleynik ^a, Aleksey Aleksandrovich Nikolaev,
Kamil' Nurullaevich Ramazanov, Yuldash Gamirovich Husainov, Almaz Yunirovich Nazarov*

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

^a liptosomov@yandex.ru

ABSTRACT

During the deposition process of complex parts, there can be unevenness in the thickness of the coating. This may exceed the tolerance limits specified in the design documentation. An example of this is blisk. According to literature data, the thickness of coating on inner surfaces can be up to four times greater than on outer surfaces. In this research, we used Monte Carlo simulation to improve the uniformity of coating thickness on a three-blade blisk simulator. The initial coating thickness was between 0.5 and 9 microns, while the optimized coating thickness ranged from 2 to 8.5 microns. Measurements on samples showed a significant increase in microhardness, 30% in average, from 920–900 HV0.05 to 1300–1900. Adhesive strength and roughness remained relatively unchanged.

KEYWORDS

Vacuum-arc discharge coatings; numerical methods.

**ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ TiN ИЗ ПЛАЗМЫ
ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА ИМИТАТОРЕ БЛИСКА**

*Алексей Валерьевич Олейник ^a, Алексей Александрович Николаев,
Камиль Нуруллаевич Рамазанов, Юлдаш Гамирович Хусаинов, Алмаз Юнирович Назаров*

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

^a liptosomov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

При нанесении покрытия на сложнопрофильные изделия возникает неравномерность толщины покрытия, которая может превышать установленный конструкторской документацией допуск. Одним из примеров таких случаев является блиск. Литературные данные свидетельствуют о неравномерности толщины на внутренних поверхностях до четырех раз в сравнении с внешними. В данной работе при помощи имитационной модели Монте-Карло равномерность толщины покрытия на имитаторе блиска из трех лопаток повышена с 0,5–9 мкм по ба-

зовой технологии до 2–8,5 мкм по оптимизированной. Измерения на образцах продемонстрировали при этом существенный рост микротвердости покрытия в среднем на 30% с 920–1300 до 1300–1900 HV0,05. Адгезионная прочность и шероховатость не претерпели существенных изменений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Покрyтия из плазмы вакуумно-дугового разряда; численные методы.

Введение

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) являются одними из самых ответственных и массовых деталей и испытывают широкий спектр воздействий [1]. При этом одной из главных причин их досрочного схода является эрозионный износ [2, 3]. Наиболее перспективный вариант повышения эрозионной стойкости – это нанесение защитного покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда [4, 5]. Установлено, что покрытия систем TiN, (Ti-V)N, (Ti-Cr)N и других снижают скорость эрозионного износа лопаток компрессора в 3–5 раз [6]. При этом эрозионная стойкость покрытия зависит от его материала, структуры и толщины. Оптимальная толщина эрозионно-стойкого покрытия TiN из плазмы вакуумно-дугового разряда для лопаток ГТД должна лежать в пределах 5–10 мкм [7]. Данный параметр оказывает влияние на ряд других свойств как покрытия (микротвердость, пластичность, остаточные напряжения и другие [8]), так и детали в целом (усталостная прочность [9]). Поэтому толщина покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда и допуск на нее является контролируемым параметром, указываемым в конструкторской документации на изделие наряду с шероховатостью, адгезией и микротвердостью. Таким образом, для обеспечения качества наносимого покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда необходимо обеспечить установленный допуск на толщину.

Для одиночных лопаток обеспечение допуска на толщину покрытия решается за счет равномерного движения в камере. Однако, использование данного подхода для сдво-

енных лопаток приводит к снижению толщины наносимого покрытия на внутренних поверхностях до четырех раз по сравнению со внешними [10]. Это объясняется линейным распространением частиц испаренного вещества покрытия в вакуумной камере. При наличии поверхностей, создающих препятствия на пути движения потока плазмы, в некоторых областях детали образуются «тени» [11].

Другим примером детали с наличием теневых зон являются лопатки блисков. В литературе [12] данная задача решается оптимизацией расположения источников плазмы вакуумно-дугового разряда. Однако данный подход предполагает создание оборудования под каждый типоразмер изделия, что экономически целесообразно только в случае массового производства. В остальных случаях единственным вариантом обеспечения допуска на толщину покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда остается оптимизация технологического процесса нанесения, т.е. подбор технологических режимов, в том числе оптимизация траектории перемещения в вакуумной камере. Данный подход успешно был использован на практике для сдвоенных лопаток [10], а вариант реализации для блисков запатентован фирмой Дженерал Электрик [13], в котором установлен допуск на отклонение толщины в 50%. Аналогичный способ запатентован и в России [14]. В работе [10] данный подход успешно применен для покрытия из плазмы магнетронного разряда. При этом подбор скорости вращения детали осуществлен при помощи имитационной модели Монте-Карло. В данной работе схожий подход использован для оптимизации враще-

ния имитатора моноколеса из трех лопаток. Таким образом, цель данной работы – проверка работоспособности имитационных моделей Монте-Карло для подбора траектории перемещения сложнопрофильных деталей с наличием теневых зон, а также исследование свойств покрытия в затененных областях.

1. Материалы и методы исследования

В качестве образцов использованы модельные лопатки из сплава Ti-64. Изготовлен имитатор сектора моноколеса из трех лопаток, представленный на рис. 1. Образцы располагались по центру вакуумной камеры и совершали одноосное вращение. Покрытие TiN наносилось на установке ННВ-6.1 [15] в течение 2,5 часов. Режим нанесения – ток дуги 80 А, напряжение – 180 В. Образцы предварительно очищались при помощи ПИНКа, ток дуги – 15 А, напряжение – 180 В. Толщина покрытия контролировалась на средней лопатке. Образцы, вырезанные из замковой части для контроля микротвердости, адгезии и шероховатости покрытия, рас-

полагались на внутренней стороне крайних лопаток. Первым шагом наносилось покрытие при равномерной скорости вращения оси стола. Затем на деталь наносилось покрытие при выбранных угловых положениях в течение рассчитанных отрезков времени.



Рис. 1. Внешний вид образцов с нанесенным покрытием

Fig. 1. The appearance of the coated samples

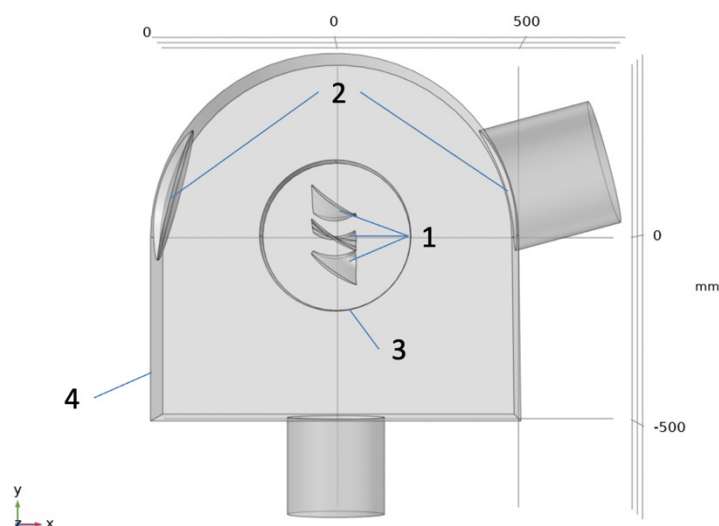


Рис. 2. Расчетная геометрия и граничные условия имитационной модели:

- 1 – Подложка (ГУ Wall с условием “stick” и “accumulator”);
- 2 – источник плазмы (ГУ Inlet);
- 3 – Граница между вращающимся и неподвижным интерфейсами (ГУ Particle continuity);
- 4 – Остальные границы (ГУ Wall “disappear”))

Fig. 2. Geometry and boundary conditions of the model:

- 1 – Substrate (BC Wall with the condition “stick” and “accumulator”);
- 2 – Plasma source (BC Inlet);
- 3 – Boundary between rotating and stationary interfaces (BC Particle continuity);
- 4 – Other boundaries (BC Wall “disappear”))

Для измерения толщины использован оптический микроскоп Nikon MA-100 Eclipse. Исследования адгезии покрытия с подложкой проводили методом склерометрии при помощи прибора CSM Scratch Tester. Измерение шероховатости поверхности производилось при помощи прибора MarSurf PS1. Чтобы получить профиль лопатки, использована оптическая координатно-измерительная система ATOS II 400. Измерение микротвердости покрытия производилось при помощи EMCO-Test DuraScan 50.

Расчет толщины покрытия и подбор скорости вращения имитатора производился при помощи программного комплекса Comsol Multiphysics в модулях Mathematical particle tracing и Deformed mesh. Более под-

робно с моделью можно ознакомиться в работе [16]. Расчетная геометрия и граничные условия (ГУ) представлены на рис. 2.

Оптимизационные расчеты производились при помощи модуля Optimization в Comsol Multiphysics. Система уравнений для оптимизации будет приведена ниже.

2. Результаты и их обсуждение

После нанесения средняя лопатка была разрезана, и была измерена толщина покрытия по поверхности спинки и корыта. Внешний вид микроструктур продемонстрирован на рис. 3, где указаны также исследуемые сечения. Измеренные значения толщины покрытия совместно с результатами расчета представлены на рис. 4.

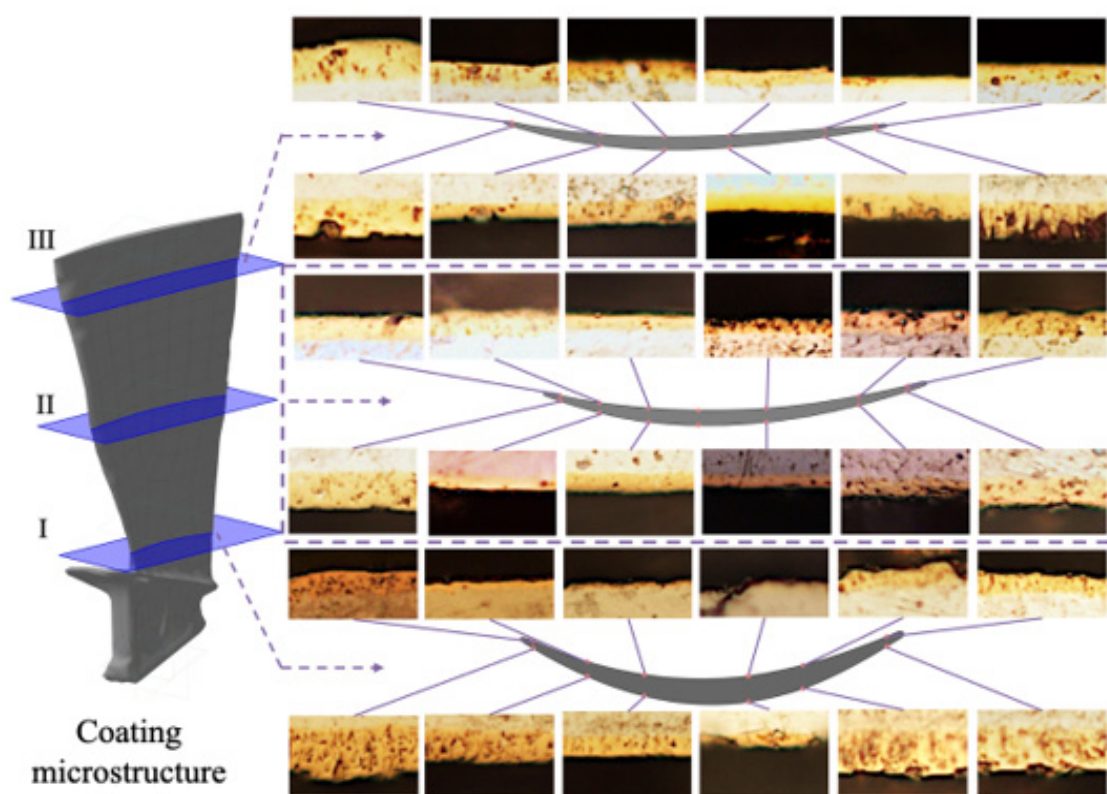


Рис. 3. Микроструктуры нанесенного покрытия

Fig. 3. Microstructures of the applied coating

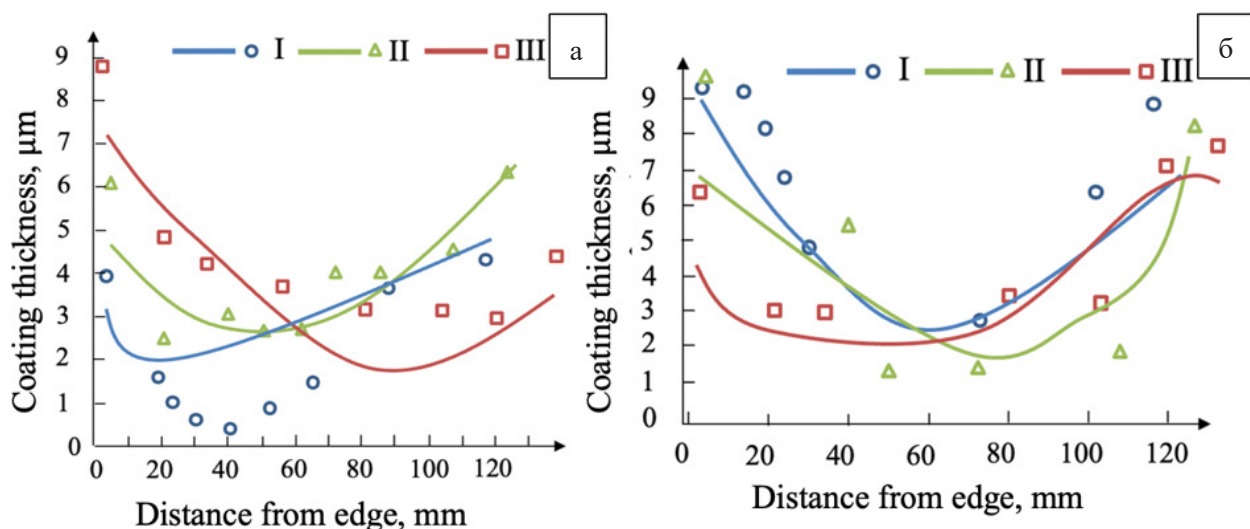


Рис. 4. Распределение толщины покрытия по поверхности корыта (а) и спинки (б) лопатки

Fig. 4. Coating thickness distribution over the surface of the blade concave (a) and convex (б)

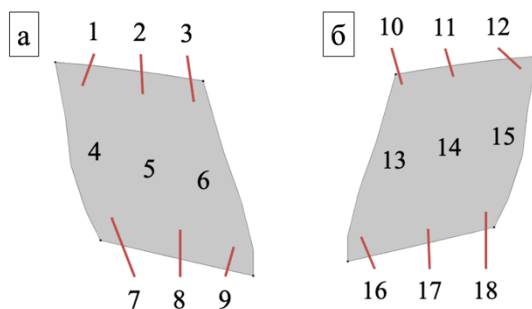


Рис. 5. Расположение точек по поверхности спинки (а) и корыта (б) лопатки

Fig. 5. The location of points on the surface of the convex (a) and the concave (б) of the blade

Исходя из представленных результатов установлено, что экспериментальный диапазон толщины покрытия при равномерной скорости вращения образцов составляет 0,5–9 мкм. Таким образом, имеется неравномерность 95% в нижней зоне лопатки по сравнению с зоной кромок, что объясняется кривизной лопаток и малым расстоянием между ними порядка нескольких сантиметров.

С целью повышения равномерности толщины покрытия произведена оптимизация скорости вращения образцов. Первым шагом на поверхности спинки и корыта лопатки выбрано по 9 точек, как на схеме 5.

Затем составлена система уравнений вида 1, где коэффициенты n_i равны толщине покрытия за расчетный период под каждым углом относительно начального положения. Таких углов выбрано 6: 0, 60, 120, 180, 240 и 300 градусов. Данное решение обусловлено конструкцией механизма вращения опорного стола камеры. h_i – общая толщина покрытия в выбранной точке, $\bar{h}$ – среднееарифметическое значение толщины покрытия в 18 точках, σ – среднеквадратическое отклонение толщины покрытия. Таким образом была составлена система уравнений вида (1), которая является целевой функцией при оптимизации:

$$\begin{cases}
 h_1 = 18n_1 + 4n_2 + 5n_3 + 0n_4 + 5n_5 + 21n_6 \\
 h_2 = 8n_1 + 4n_2 + 12n_3 + 0n_4 + 10n_5 + 2n_6 \\
 h_3 = 12n_1 + 20n_2 + 11n_3 + 0n_4 + 6n_5 + 2n_6 \\
 h_4 = 6n_1 + 28n_2 + 0n_3 + 0n_4 + 8n_5 + 0n_6 \\
 h_5 = 15n_1 + 0n_2 + 1n_3 + 0n_4 + 11,5n_5 + 0n_6 \\
 h_6 = 12n_1 + 0n_2 + 24n_3 + 0n_4 + 6n_5 + 23n_6 \\
 h_7 = 17n_1 + 1n_2 + 20n_3 + 27n_4 + 0n_5 + 20n_6 \\
 h_8 = 10n_1 + 7n_2 + 0n_3 + 18n_4 + 0n_5 + 0n_6 \\
 h_9 = 4n_1 + 13n_2 + 0n_3 + 3n_4 + 25n_5 + 0n_6 \\
 h_{10} = 14n_1 + 21n_2 + 4n_3 + 19n_4 + 23n_5 + 1n_6 \\
 h_{11} = 0n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 12n_4 + 5n_5 + 3,5n_6 \\
 h_{12} = 7n_1 + 1n_2 + 21n_3 + 22n_4 + 3n_5 + 24n_6 \\
 h_{13} = 6n_1 + 1n_2 + 24n_3 + 21n_4 + 8n_5 + 32n_6 \\
 h_{14} = 0n_1 + 11n_2 + 0n_3 + 14n_4 + 0n_5 + 0n_6 \\
 h_{15} = 0n_1 + 22n_2 + 0n_3 + 9n_4 + 16n_5 + 23n_6 \\
 h_{16} = 3n_1 + 14n_2 + 0n_3 + 1n_4 + 25n_5 + 20n_6 \\
 h_{17} = 10n_1 + 7n_2 + 0n_3 + 18n_4 + 0n_5 + 0n_6 \\
 h_{18} = 18n_1 + 1n_2 + 21n_3 + 25n_4 + 0n_5 + 0n_6 \\
 \bar{h} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{18} h_i \\
 \sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{h} - h_i)^2 \right)}
 \end{cases} \quad (1)$$

Полученные в результате оптимизационного расчета коэффициенты переведены во время нанесения под каждым углом относи-

тельно начального положения. Таким образом рассчитана зависимость, представленная на рис. 6.

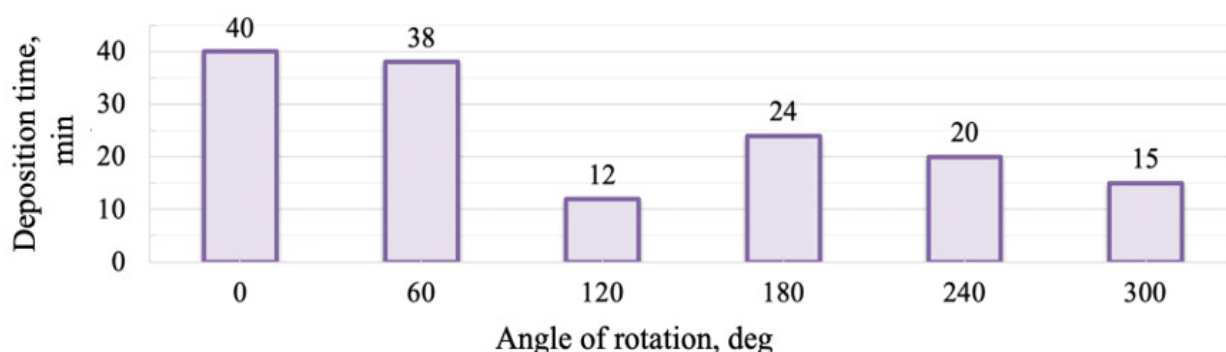


Рис. 6. Время нанесения покрытия в зависимости от угла поворота относительно начального положения

Fig. 6. The coating deposition time depending on the angle of rotation relative to the starting position

Микроструктуры покрытия после оптимизации скорости вращения детали в вертикальной оси камеры продемонстрированы на рис. 7.

Расчетные и экспериментальные распределения толщины покрытия представлены на рис. 8.

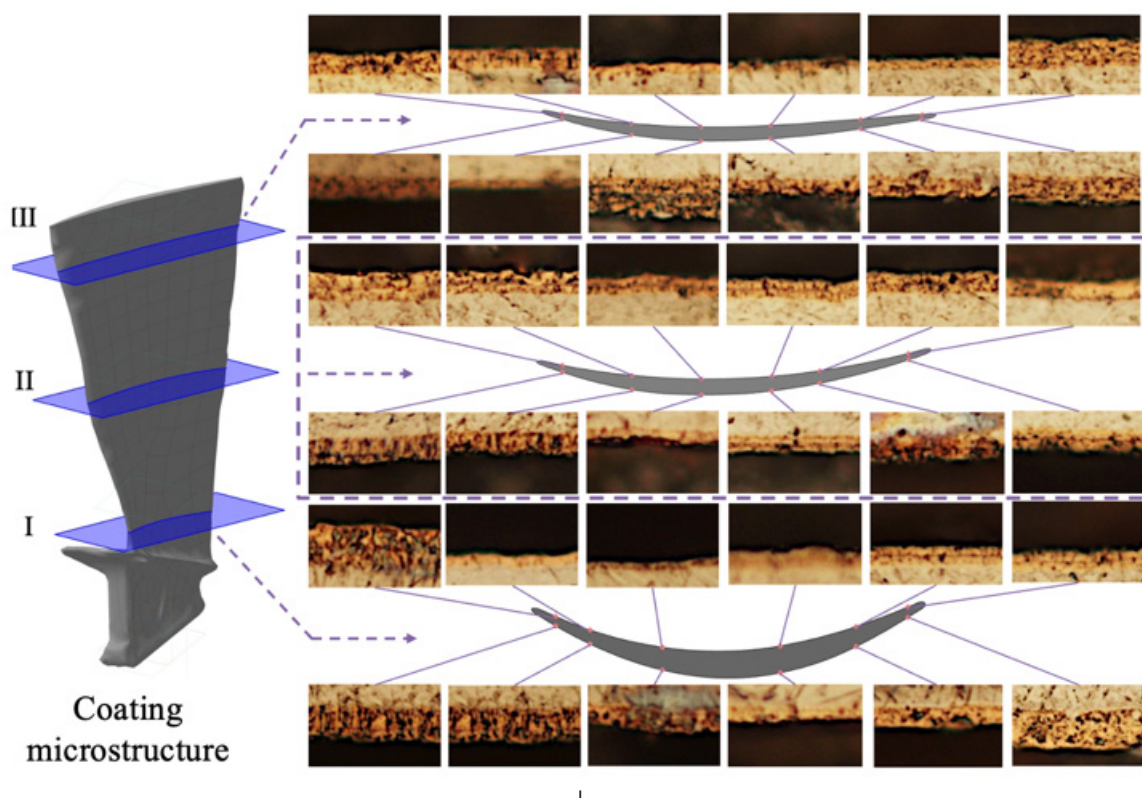


Рис. 7. Микроструктуры нанесенного покрытия после оптимизации

Fig. 7. Microstructures of the applied coating after the optimization

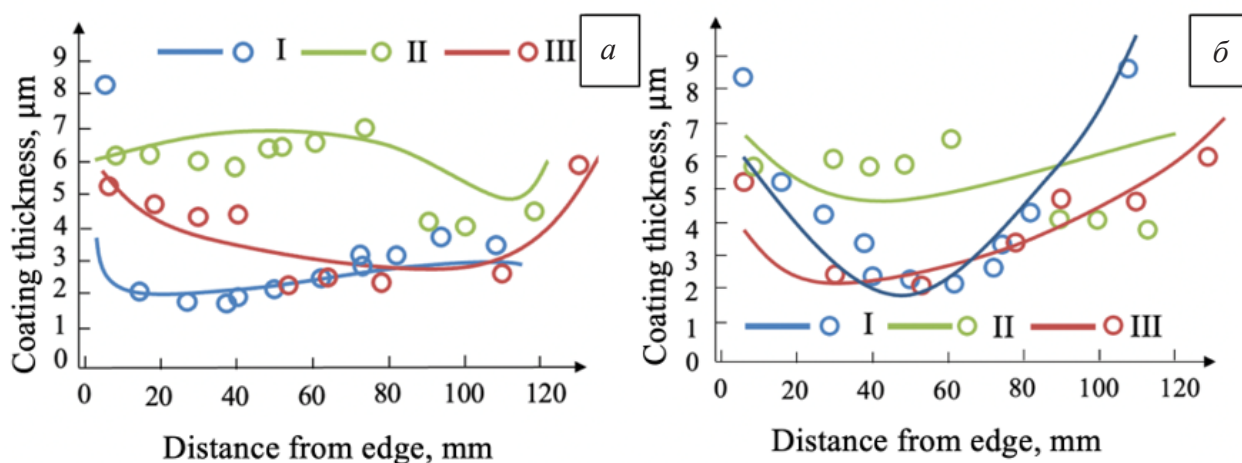


Рис. 8. Распределение толщины покрытия по поверхности корыта (а) и спинке (б) лопатки

Fig. 8. Coating thickness distribution over the surface of the blade concave (a) and convex (b)

Исходя из представленных результатов установлено, что оптимизация скорости вращения позволила сократить неравномерность толщины до 2–8,5 мкм, то есть с 95 до 75%.

Следующим этапом исследования является исследование влияния оптимизации на механические характеристики покрытия, к которым относится микротвердость, адгезия и шероховатость. Для этого на боковые лопатки были прикреплены 6 образцов, вырезанных из замковой части лопаток. Результаты измерений представлены на рис. 9 (до и после оптимизации скорости вращения).

В результате анализа измерений на образцах можно сделать следующие выводы: установлено, что микротвердость покрытия в теневых зонах выросла в среднем на 30% с 920–1300 до 1300–1900 HV_{0,05}. В теневых зонах рост составил до 55%, что можно объ-

яснить увеличением толщины покрытия, основываясь на литературных данных [17]. Данный факт положительно влияет на эрозионную стойкость детали ввиду линейности зависимости сопротивления эрозии от микротвердости [18].

Оптимизация скорости вращения не оказала заметного влияния на шероховатость R_a покрытия. По стандартной технологии R_a составляла 0,26–0,45 мкм, после оптимизации – 0,27–0,45 мкм. До нанесения покрытия шероховатость составляла 0,2–0,3 мкм. Полученные результаты согласуются с литературными данными [19].

Результаты измерения адгезии методом склерометрии (скратч-тест) не продемонстрировали существенных изменений. Параметр L_{c1} составлял в пределах 12–15Н. Данный вывод согласуется с литературными данными [20].

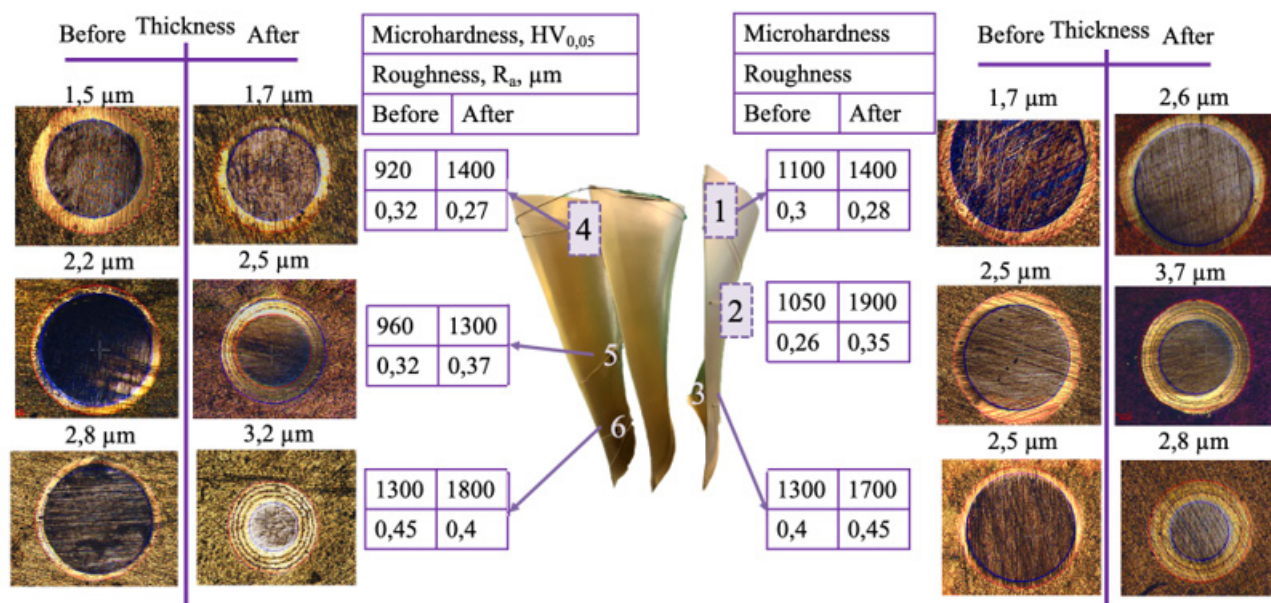


Рис. 9. Результаты измерений толщины, микротвердости и шероховатости покрытия до и после оптимизации скорости вращения

Fig. 9. The results of the coating thickness, microhardness, and roughness before and after the optimization of the rotation speed

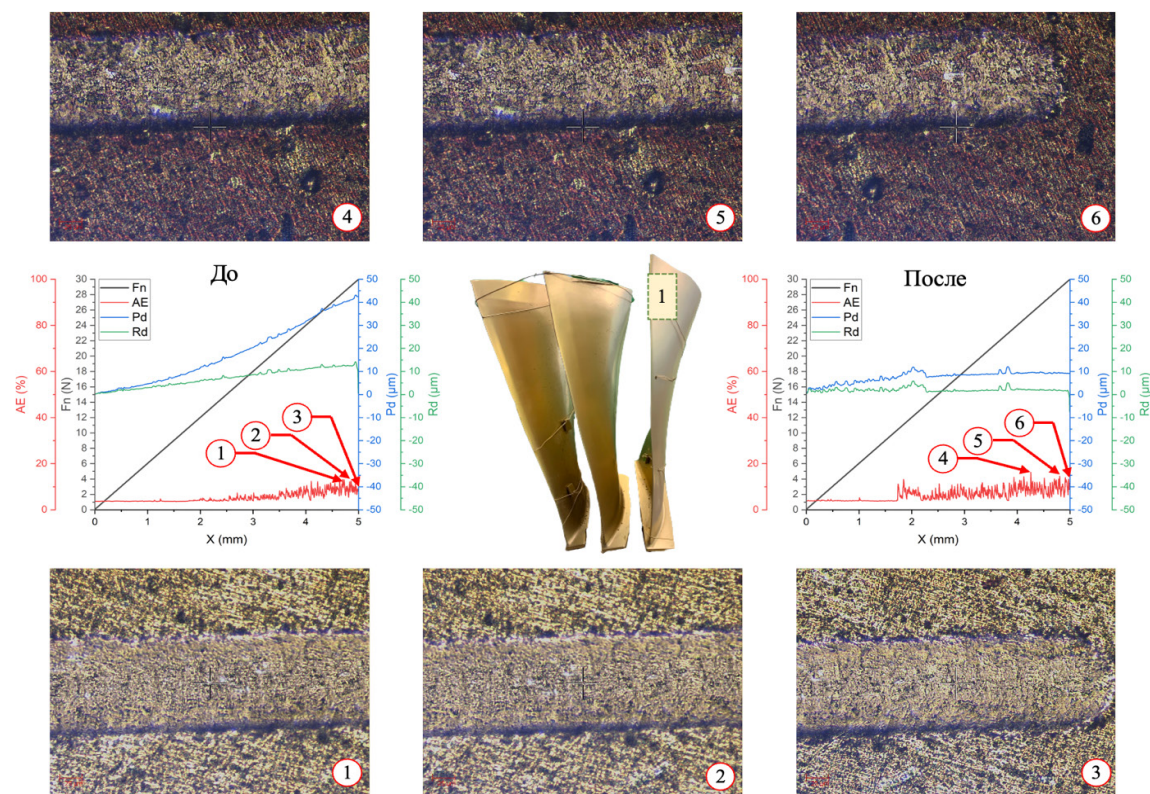


Рис. 10. Результаты скратч-теста образца 1 (до и после оптимизации)

Fig. 10. Scratch test results of sample 1 (before and after optimization)

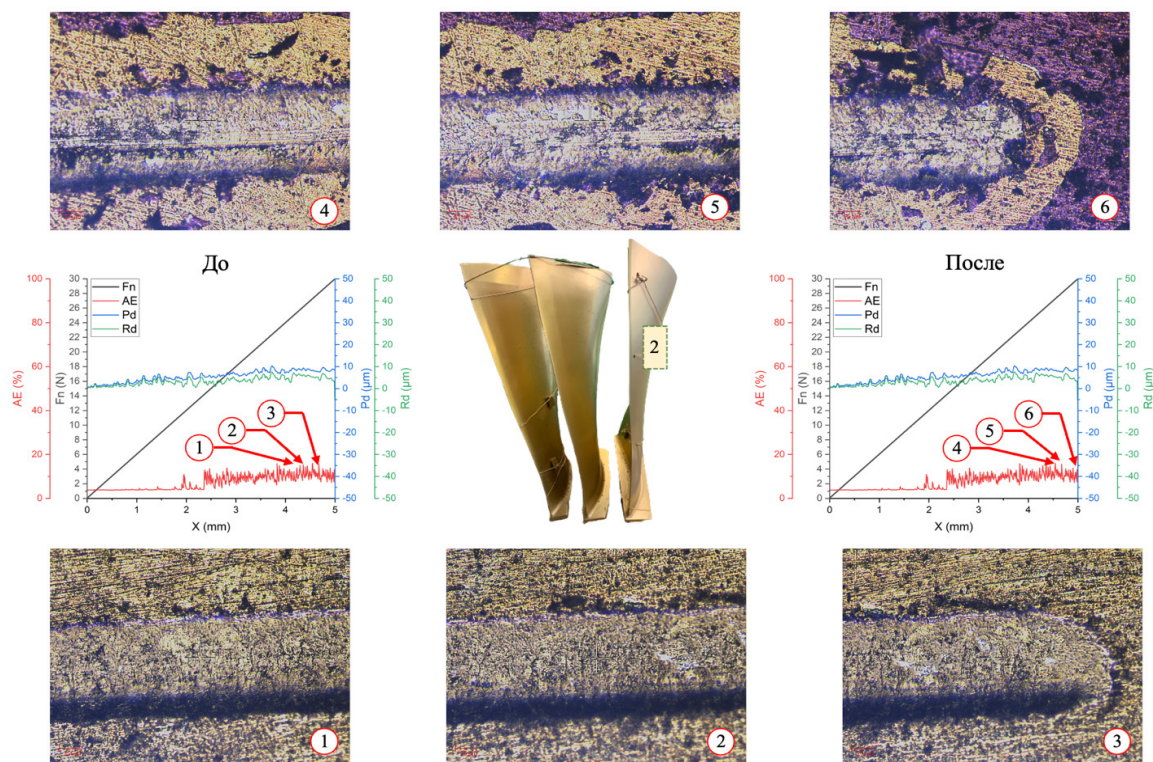


Рис. 11. Результаты скратч-теста образца 2 (до и после оптимизации)

Fig. 11. Scratch test results of sample 2 (before and after optimization)

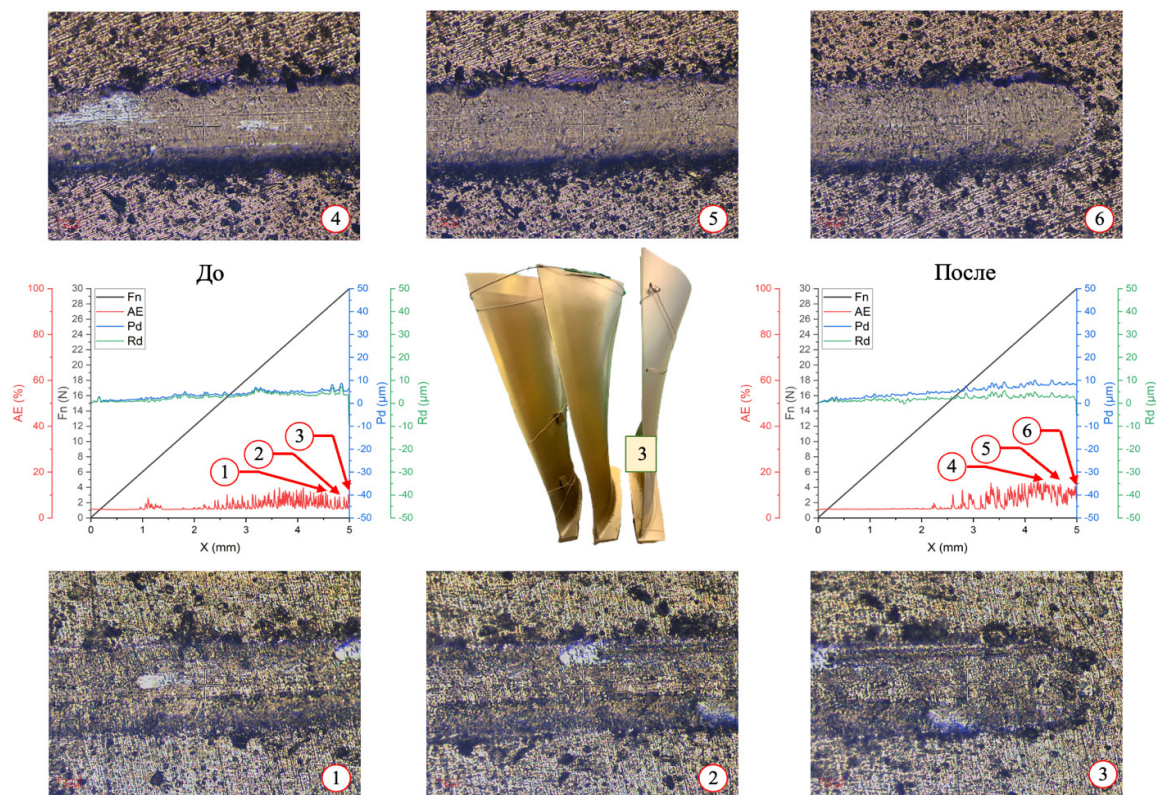


Рис. 12. Результаты скратч-теста образца 3 (до и после оптимизации)

Fig. 12. Scratch test results of sample 3 (before and after optimization)

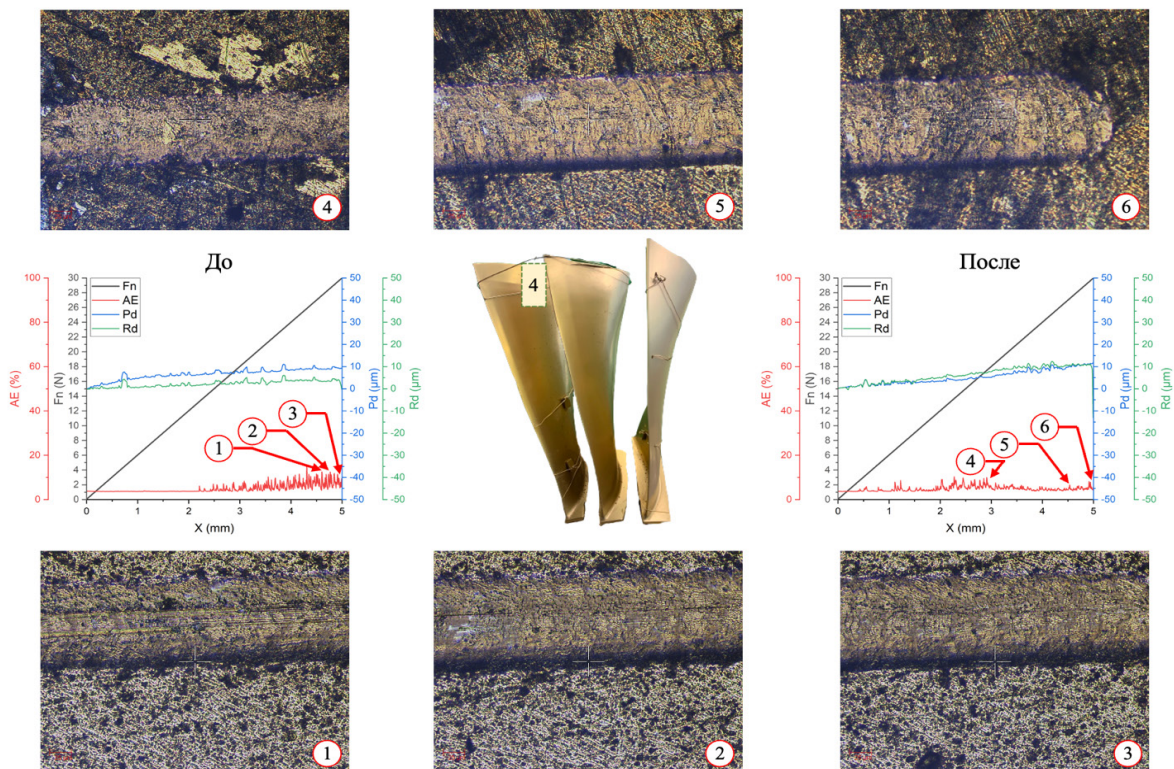


Рис. 13. Результаты скратч-теста образца 4 (до и после оптимизации)

Fig. 13. Scratch test results of sample 4 (before and after optimization)

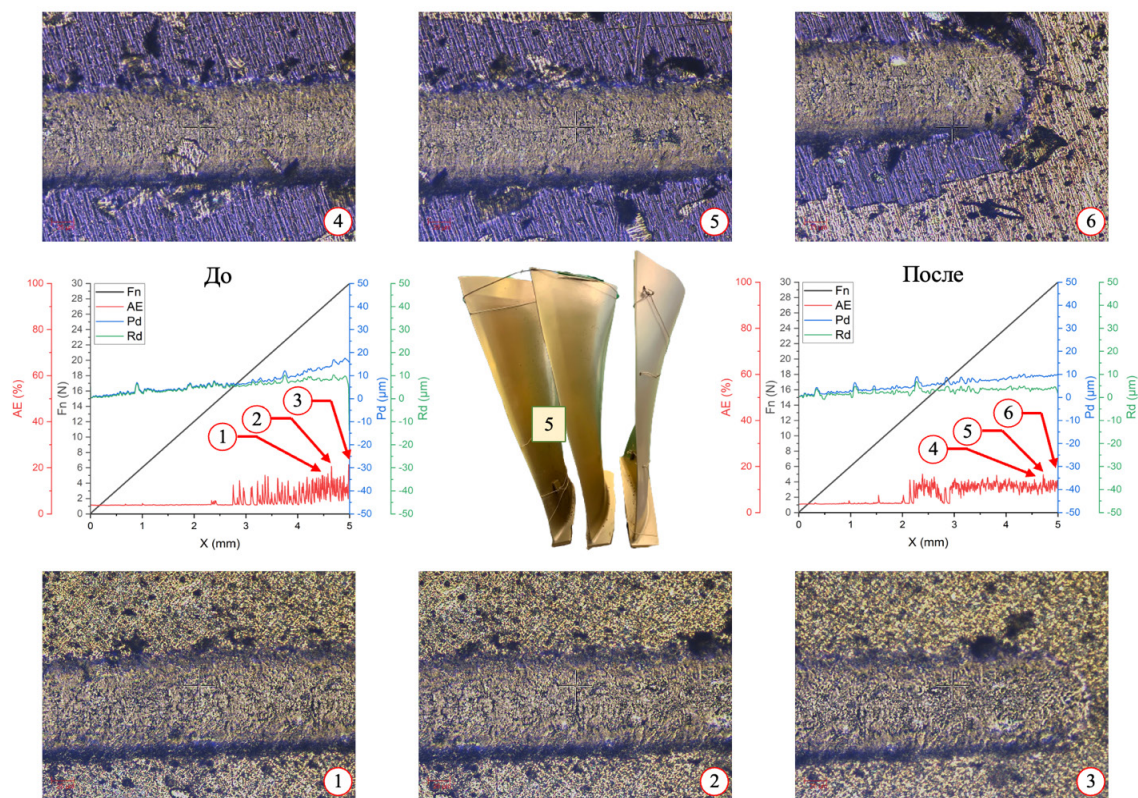


Рис. 14. Результаты скратч-теста образца 5 (до и после оптимизации)

Fig. 14. Scratch test results of sample 5 (before and after optimization)

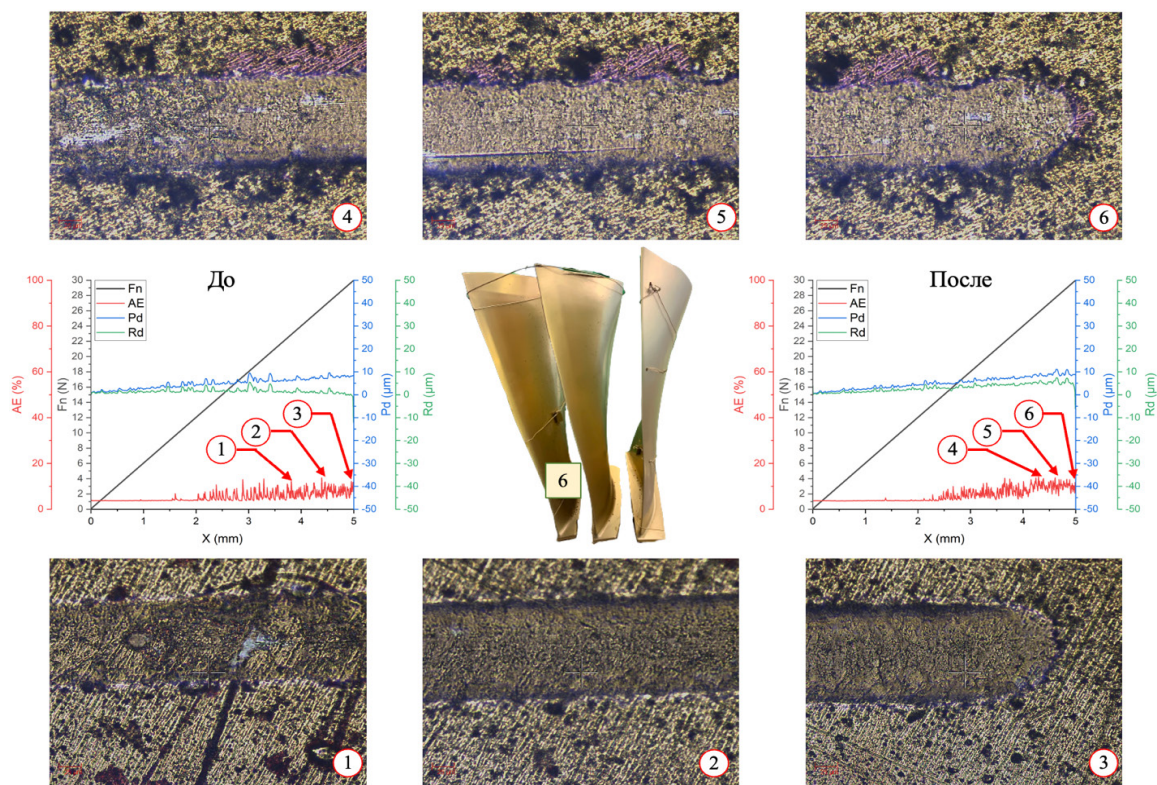


Рис. 15. Результаты скратч-теста образца 6 (до и после оптимизации)

Fig. 15. Scratch test results of sample 6 (before and after optimization)

Выводы

В результате экспериментального исследования с использованием имитатора блиска из трех лопаток установлено, что оптимизация скорости вращения в вертикальной оси камеры позволила снизить неравномерность толщины покрытия с 0,5–9 мкм до 2–8,5 мкм.

В результате анализа измерений на образцах можно сделать следующие выводы:

Толщина покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда, в том числе в теневых зонах, выросла с 1,5–2,8 до 1,7–3,7 мкм.

Микротвердость покрытия в теневых зонах выросла в среднем на 30% с 920–1300 до 1300–1900 HV0,05. В теневых зонах рост составил до 55%, что можно объяснить увеличением толщины покрытия [17]. Повышение микротвердости положительно влияет на эрозионную стойкость детали ввиду линейной зависимости сопротивления эрозии от микротвердости [18].

Оптимизация скорости вращения не оказала заметного влияния на шероховатость Ra покрытия. По стандартной технологии Ra составляла 0,26–0,45 мкм, после оптимизации – 0,27–0,45 мкм. До нанесения покрытия шероховатость составляла 0,2–0,3 мкм.

Результаты измерения адгезии методом склерометрии не продемонстрировали существенных изменений, что согласуется с литературными данными [20].

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State assignment “Study of physical

and mechanical processes in the formation and strengthening of parts for aerospace and transport equipment” No. FEUE-2023-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savina Ya.N. et al. Formation of high-entropy TiZrVCrAl coating on the surface of the Ti-6Al-4V titanium alloy at different technological parameters // Materials. Technologies. Design. 6 2(17) 81-91 (2024). (in Russian) [Савина Я.Н. Формирование высокоэнтروпийного покрытия TiZrVCrAl на поверхности титанового сплава ВТ6 при различных технологических параметрах // Materials. Technologies. Design. 6 2(17) 81-91 (2024)]. DOI: 10.54708/26587572_2024_621781
2. Chichkov B.A. Working blades of aviation gas turbine engines: Part 1 - Operational damage to working blades: A training manual. Moscow: MSTUCA, 2003, 55 p. (in Russian) [Чичков, Б. А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток: учебное пособие. Москва: МГУТА, 2003, 55 с.].
3. Belousov M. G., Tsurkal A. A. Investigation of factors affecting the damage and destruction of compressor blades in aircraft engines // Trudy MAI. 65 1-14 (2013). (in Russian) [Белоусов М. Г., Цуркаль А. А. Исследование факторов, влияющих на повреждаемость и разрушение лопаток компрессоров авиационных двигателей // Труды МАИ. 65 1-14 (2013)].
4. Korsunov K. A., Ashikhmina E. A. Analysis of some physical and technical characteristics of ion plasma coating (Ti Zr) N on the rotor blades of the compressor of the TV3-117 gas turbine engine // Avtomaticheskaya Svarka. 2 49-54 (2014) (in Russian) [Корсунов К. А., Ашихмина Е. А. Анализ некоторых физико-технических характеристик ионно-плазменного покрытия (TiZr) N на лопатках ротора компрессора газотурбинного Двигателя ТВ3-117 // Автоматическая сварка. 2 49-54 (2014)].
5. Selivanov K. S. et al. Erosive wear behavior of Ti/Ti (V, Zr) N multilayered PVD coatings for Ti-6Al-4V alloy // Wear. 418 160-166 (2019). DOI: 10.1016/j.wear.2018.11.016
6. Alqallaf J. et al. Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades—A review // Processes. 8(8) 984 (2020). DOI: 10.3390/pr8080984
7. Dyblenko Yu.M. Combined ion-implantation and vacuum-plasma surface modification technologies that enhance the operational properties of steam turbine blades. Ufa: USATU, 2003, 199 p. (in Russian) [Дыбленко Ю.М. Комбинированные ионно-имплантационные и вакуумно-плазменные технологии модифицирова-

ния поверхности, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств лопаток цнд паровых турбин. Уфа: УГАТУ, 2003, 199 с.].

8. Abdoos, M., Yamamoto, K., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., & Veldhuis, S. Effect of coating thickness on the tool wear performance of low stress TiAlN PVD coating during turning of compacted graphite iron (CGI) // *Wear*, 422(423) 128–136 (2019). DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.062

9. Trapezon A. G., Lyashenko B. A., Lysenkov M. O. Fatigue resistance of metals with reinforcing coatings (review) // *Problemy Prochnosti*. 3 42-57 (2013). (in Russian) [Трапезон А. Г., Ляшенко Б. А., Лысенков М. О. Сопrotивление усталости металлов с упрочняющими покрытиями (обзор) // *Проблемы прочности*. – 2013. – № 3. – С. 42-57.]

10. Rodgers T. M., Zhao H., Wadley H. N. G. Vapor deposition on doublet airfoil substrates: Coating thickness control // *Journal of Vacuum Science & Technology*. 33(6) 061509-1 - 061509-18. DOI:10.1116/1.4929664

11. A. V. Oleinik, K. N. Ramazanov Dependence of the Nonuniformity of Thickness of the Vacuum-Arc Discharge Plasma Coating on the Geometric Parameters of the Inter-Blade Channel // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 52(8) 870-876 (2023). DOI: 10.1134/S1052618823080137

12. He G. et al. Key problems affecting the anti-erosion coating performance of aero-engine compressor: a review // *Coatings*. 9(12) 1-17 (2019). DOI: 10.3390/coatings9120821

13. United States Patent Application Publication US 2009/0061081 A1, 5.03.2009.

14. Patent RF No. 2 677 041, 15.01.2019 (in Russian) [Патент РФ № 2 677 041, 15.01.2019].

15. A.A. Maslov et al. Study of Y-Al-O system coating deposited on Inconel 718 alloy // *Materials*.

Technologies. Design. 5 3(13) 44-54 (2023). (in Russian) [A.A. Маслов и др. Изучение покрытия системы Y-Al-O, нанесенного на сплав Inconel 718 // *Materials. Technologies. Design*. 5 3(13) 44-54 (2023)]. DOI: 10.54708/26587572_2023_531344

16. Valiev R.R. et al. Mathematical modeling of complex-shaped workpiece forming from ultrafine-grained Ti alloy and subsequent deposition of protective coatings based on high-entropy alloy // *Fizicheskaya Mezomehanika*. 27(4) 117-128 (2024). (in Russian) [Валиев Р. Р. и др. Fe-Mn-Si сплавы, равноканальное угловое прессование, эффект памяти формы, микроструктура, микротвердость, механические свойства, скорость коррозии // *Физическая мезомеханика*. 27(4) 117-128 (2024)]. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_4_117-128

17. Bull S. J. Microstructure and indentation response of TiN coatings: The effect of measurement method // *Thin Solid Films*. 688 137452 (2019). DOI: 10.1016/j.tsf.2019.137452

18. Šliwa A. et al. Computer simulation of the relationship between selected properties of PVD coatings // *Archives of Metallurgy and Materials*. 61(2A) 481-484 (2016). DOI: 10.1515/amm-2016-0084

19. Yagafarov I.I. Technological assurance of the quality of the surface layer and the accuracy of precision machine parts during deposition of coatings from vacuum-arc discharge plasma. Ufa: USATU, 2014, 111 p. (in Russian) [Ягафаров И.И. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и точности прецизионных деталей машин при осаждении покрытия из плазмы вакуумно-дугового разряда. Уфа: УГАТУ, 2014, 111 с.].

20. Zhao J. et al. Coating-thickness-dependent physical properties and cutting temperature for cutting Inconel 718 with TiAlN coated tools // *Journal of Advanced Research*. 38 191-199 (2022). DOI: 10.1016/j.jare.2021.07.009