

## Разработка системы охлаждения вакуумной камеры установки по нанесению многокомпонентных нанокompозитных покрытий

*А.А. Татарканов, А.Н. Муранов, А.Х. Лампежев, Н.З. Иванов*

*Институт конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН)*

**Аннотация:** Рост глобальной экономики и активное развитие промышленности ограничены среди прочего возможностями существующей техники. При этом потенциал улучшения функциональных характеристик классических материалов практически исчерпан, а широкое применение новых композиционных материалов и высокоэнтальпийных сплавов ограничено высокой стоимостью и сложностью технологического процесса их изготовления и обработки. Таким образом, актуален вопрос разработки технологий и оборудования для модификации поверхностного слоя и создания многокомпонентных покрытий специального назначения, в том числе нанокompозитных. В статье приводятся результаты исследования, посвященного созданию установки для нанесения подобных покрытий методом плазменного напыления. Одним из ключевых элементов конструкции установки является вакуумная камера, корпус которой в процессе эксплуатации подвергается интенсивному термическому нагружению. Для сокращения материальных и временных ресурсов на этапе проектирования и экспериментальной отработки было проведено моделирование температурного состояния корпуса камеры, за счет которого удалось исключить из рассмотрения нерелевантные варианты системы охлаждения. Результаты моделирования подтверждают работоспособность системы охлаждения корпуса вакуумной камеры в условиях эксплуатации. Определены следующие рабочие параметры системы: давление на входе составляет 0,6 МПа, расход воды – 2 л/с, а среднemasсовая температура воды на выходе – около 40°C.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, моделирование температурного состояния, вакуумная камера, система охлаждения.

### Введение

Развитие глобальной экономики, увеличение темпов промышленного производства и соответственно потребления материальных и энергетических ресурсов приводит к возникновению экологических проблем, истощению природных ресурсов, усилению интенсивности труда и повышенному износу техники и оборудования. В связи с этим вопрос экономии невозобновляемых ресурсов становится в последнее время все актуальнее. Одним из возможных направлений решения данной проблемы является увеличение срока службы технических систем. При этом, несмотря на совершенствование комплекса технического обслуживания и ремонта, экономические потери, связанные с

---

преждевременным выходом из строя оборудования, в развитых странах составляют до 3-4 % ВВП [1-3].

Также стоит отметить значительное развитие за последние десятилетия конструкционных материалов и технологических процессов их получения. Для удовлетворения потребностей ракетно-космической, авиационной, атомной, нефтегазовой и других отраслей промышленности, в которых изделия и оборудование испытывают повышенные нагрузки, разрабатываются более прочные и термостойкие материалы. В частности, все более широкое применение в технике получают многофазные композиционные материалы и высокоэнтальпийные сплавы. Композиты представляют собой многокомпонентные анизотропные материалы регулярной структуры, в которых, как правило, можно выделить армирующий наполнитель и матрицу, в то время как высокоэнтальпийные сплавы – это соединения пяти или более легирующих элементов в равных или почти равных концентрациях без четкого разделения на атомы растворителя и растворенных веществ. Данные материалы могут обладать комплексом характеристик, таких, как повышенные прочность, твердость, термическая стабильность, стойкость к коррозии и износу, которые обуславливают их широкое инженерное применение. Однако актуальным остается вопрос их эффективной технологической обработки [4-6].

Современные знания о физикомеханических, теплофизических и химических характеристиках материалов позволяют сделать вывод о том, что структурно-фазовое состояние тонкого поверхностного слоя во многих случаях имеет определяющее значение в процессах износа, разрушения, химической и термической деструкции материалов. Особенно данная информация релевантна по отношению к рабочим поверхностям инструментального и обрабатывающего оборудования (резцам, фрезам, сверлам, а также другим инструментам для резки, штамповки, дробления и

---

т.д.), которые в процессе эксплуатации подвергаются интенсивным механическим и тепловым нагрузкам [7-9].

Общим подходом к решению вышеперечисленного комплекса проблем, связанных с увеличением срока службы техники, включая обрабатывающие инструменты и станки, необходимые, в том числе, для работы с новыми высокопрочными и термостойкими материалами, является модификация поверхностного слоя и создание различного рода функциональных покрытий, обладающих необходимым комплексом характеристик, которые зависят от области применения. Необходимо отметить, что потенциал одноэлементных покрытий к настоящему времени уже практически исчерпан. Поэтому актуальной является задача разработки технологий и оборудования для нанесения многокомпонентных нанокompозитных покрытий [10-12].

Среди существующих методов формирования покрытий значительное распространение для широкого спектра применений получил достаточно универсальный метод плазменного напыления, который позволяет наносить покрытия металлов и их химических соединений путем осаждения на подложку многокомпонентных потоков плазмы. При этом за счет варьирования в широком диапазоне технологических параметров процесса: подготовки поверхности, количества электродов, элементного состава материалов, силы тока дуги, времени выдержки, давления реактивного газа и т.д., удастся создавать покрытия с заданными эксплуатационными характеристиками [13, 14]. Также данная технология позволяет проводить предварительную обработку рабочей поверхности изделия потоком плазмы, при которой происходит не только очистка от загрязнений, но и модификация поверхностного слоя, что позволяет увеличить сцепление покрытия с основой [15]. Совмещение данных процессов в одном технологическом цикле, а также широкие возможности настройки

---

параметров, обуславливают эффективность и соответственно распространённость данного метода.

Одним из ключевых элементов технологического оборудования для данного метода является вакуумная камера, изолирующая изделие от внешнего воздействия и позволяющая контролировать давление и чистоту газовой смеси при напылении покрытия. При эксплуатации корпус камеры подвергается интенсивному термическому нагружению. Соответственно вопрос проектирования системы охлаждения корпуса является актуальным.

### **Вакуумная камера установки по нанесению многокомпонентных нанокompозитных покрытий**

Вакуумная камера представляет собой герметичный сосуд с двойными стенками, системой технологических отверстий и закрываемой дверцей (Рисунок 1).

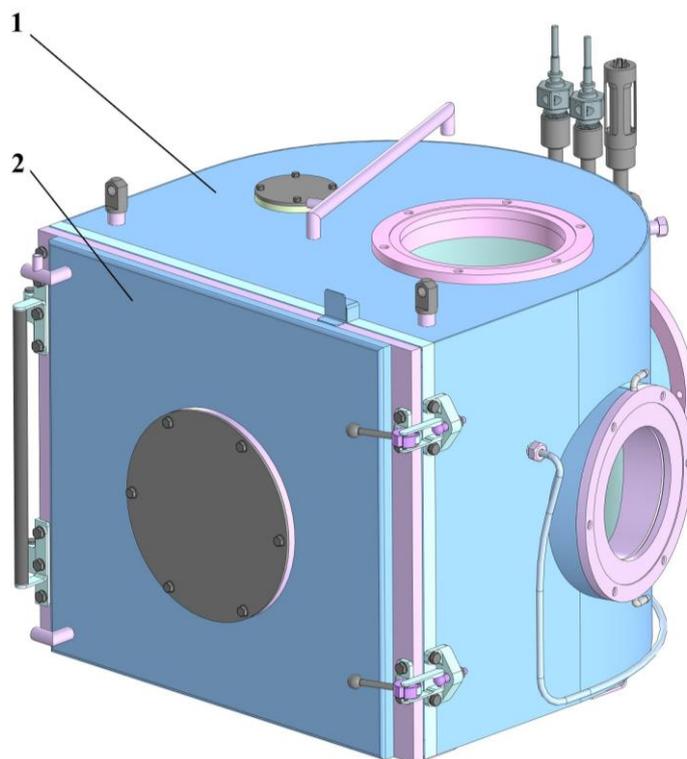


Рис. 1. – Вакуумная камера установки по нанесению многокомпонентных нанокompозитных покрытий: 1 – корпус камеры; 2 – дверца

Двойные стенки камеры образуют полость охлаждения (или подогрева для ускорения процесса вакуумирования камеры) рабочего объема камеры. Внутренние стенки выполнены из малогазящей нержавеющей стали. На верхней плоскости и по бокам камеры имеются проемы с фланцами 3, 4 и 5 для установки системы электродов (Рисунок 2). На нижней плоскости имеется проем с фланцем 6 для установки вращающегося стола. Также снизу расположены четыре упора для крепления камеры к основанию посредством болтового соединения. Патрубки 7 предназначены для подключения вакуумной системы, которая способна обеспечить давление до  $10^{-4}$  Па. Отверстие 8 необходимо для установки температурного реле. Все соединения, включая места для подключения электродов и вращающегося стола, должны обеспечивать герметичность установки.

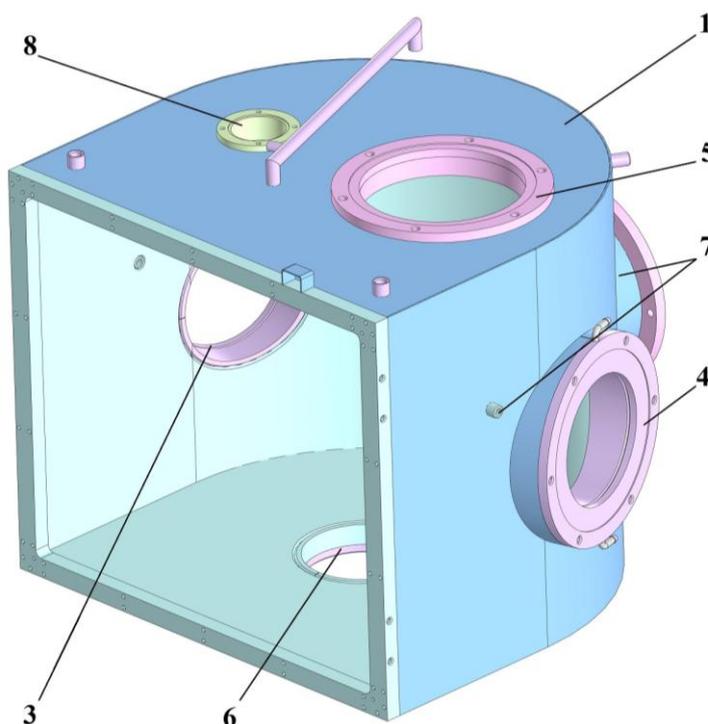


Рис. 2. – Корпус вакуумной камеры: 3, 4, 5 – фланцы для подключения системы электродов; 6 – фланец для установки вращающегося стола; 7 – патрубки вакуумной системы; 8 – отверстие для установки температурного реле

Аналогичным образом с двойными стенками для охлаждения/подогрева выполнена и дверца камеры (Рисунок 3). В дверце также предусмотрен проем с фланцем 9 для установки системы электродов. Крепление дверцы к корпусу осуществляется посредством кронштейнов, эксцентриков и прижимных валов для обеспечения герметичности.

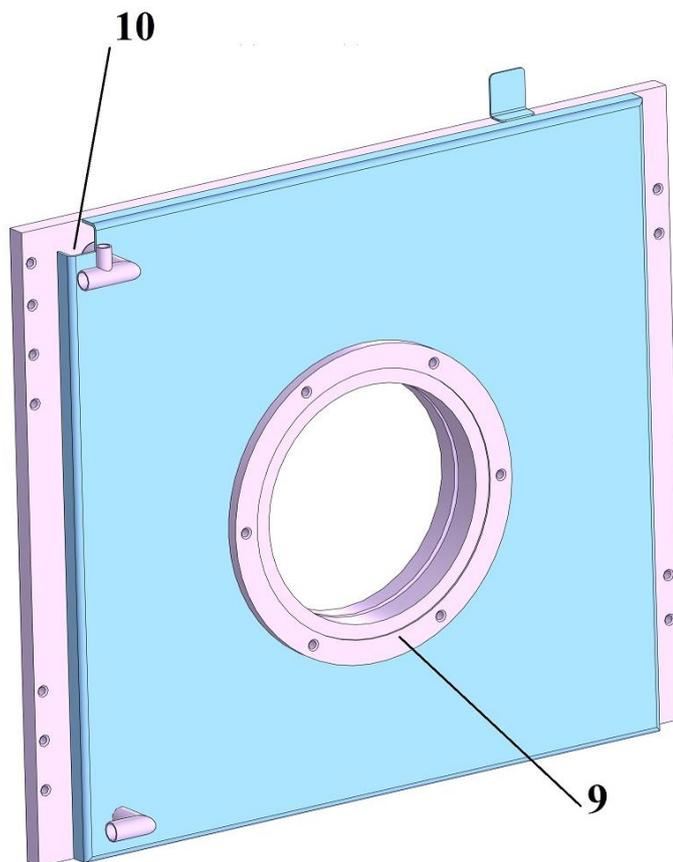


Рис. 3. – Дверца вакуумной камеры: 9 – фланец для установки системы электродов; 10 – полость охлаждения/подогрева

Функционирование установки по нанесению многокомпонентных нанокompозитных покрытий сопровождается нагревом ее конструктивных элементов, в том числе, вакуумной камеры. В связи с этим необходимо рассмотреть вопрос охлаждения камеры в процессе эксплуатации.

### **Моделирование температурного состояния вакуумной камеры**

Для оценки температурного состояния конструкции вакуумной камеры при напылении было проведено моделирование в конечно-элементном

программном комплексе. Рассматривались два альтернативных варианта – воздушное и водяное охлаждение. При этом схема подачи охлаждающей среды (рисунки 4 и 5) оставалась неизменной. Камера считалась изолированной от внешнего теплового воздействия. Материал конструкции принимался сплошным, однородным, термостабильным с неизменным агрегатным состоянием и химическим составом. По итогам моделирования было получено температурное состояние вакуумной камеры (рисунки 6 и 7). Показано, что для обеспечения безопасного функционирования целесообразно использовать водяное охлаждение. Получены следующие рабочие параметры системы: давление на входе – 0,6 МПа, расход охлаждающей жидкости – 2 л/с, среднемассовая температура охлаждающей жидкости на выходе – около 40°C.

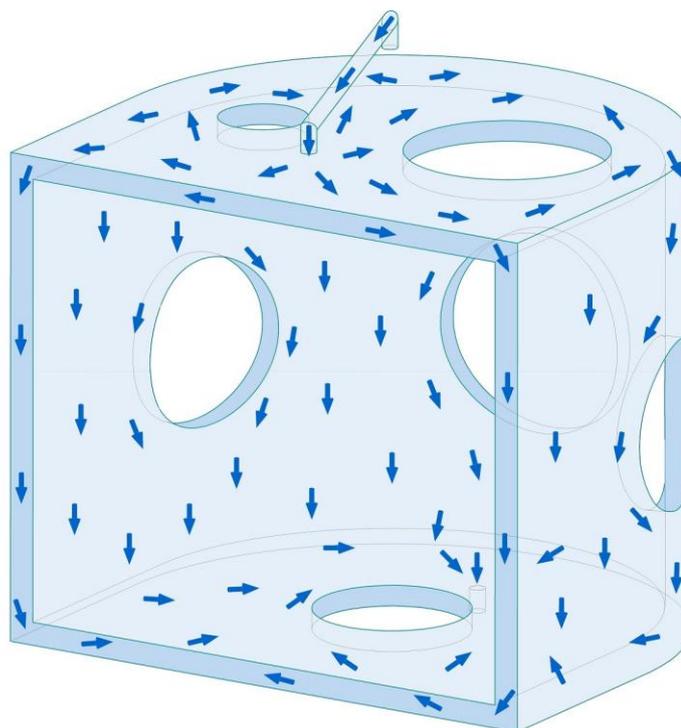


Рис. 4. – Схема охлаждения стенок вакуумной камеры

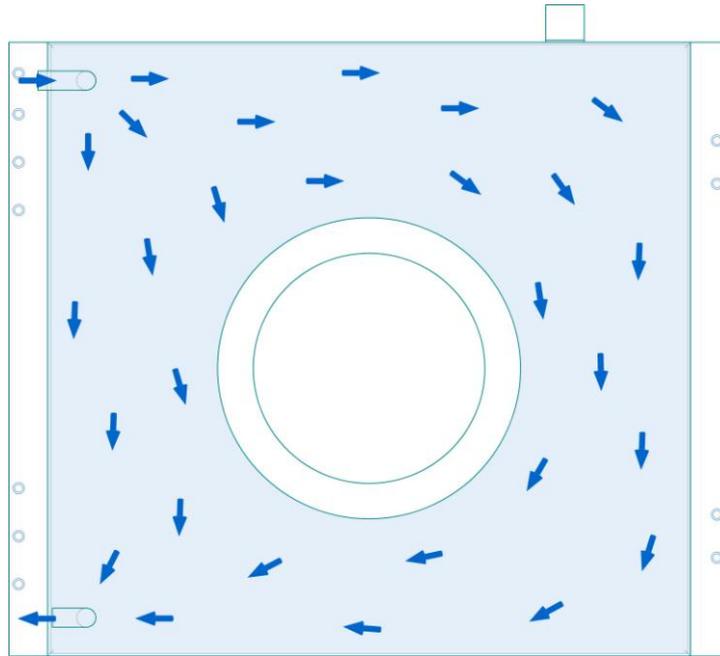


Рис. 5. – Схема охлаждения дверцы вакуумной камеры

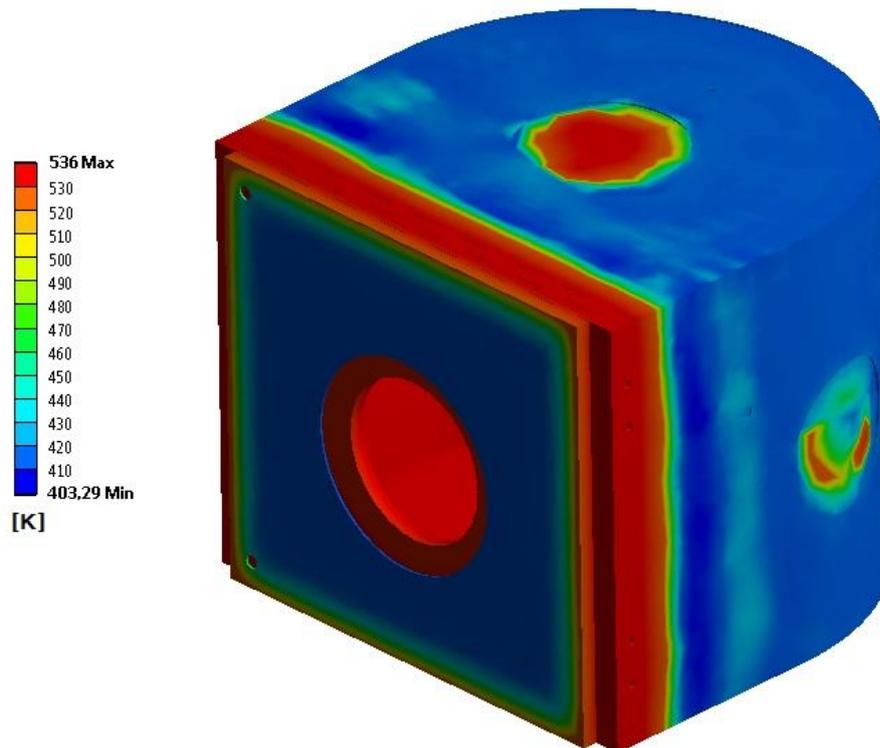


Рис. 6. – Распределение температуры камеры при воздушном охлаждении

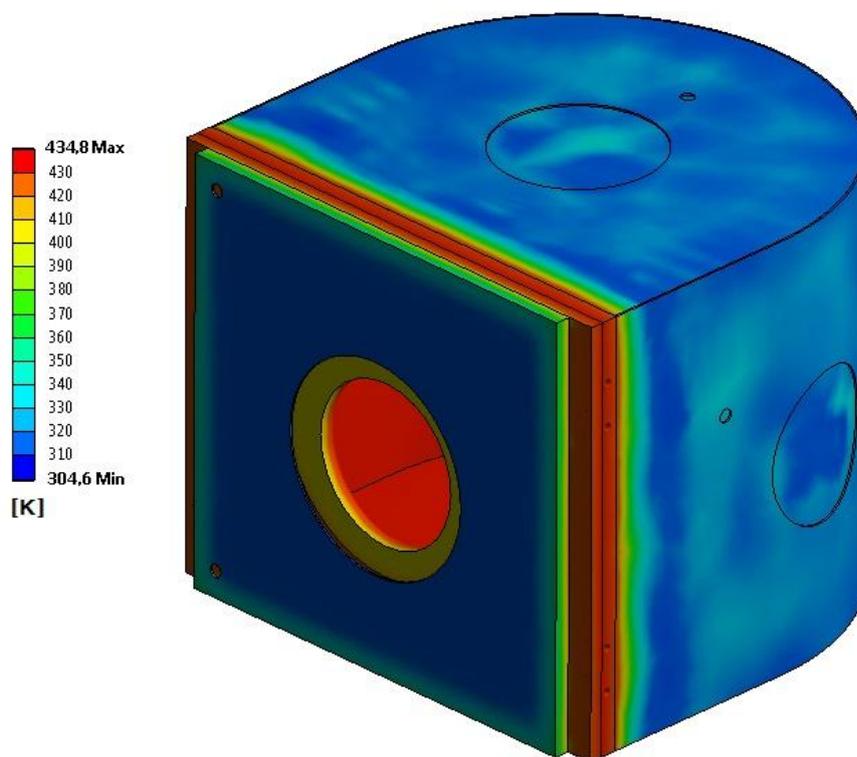


Рис. 7. – Распределение температуры камеры при водяном охлаждении

### Заключение

Таким образом, на основе результатов моделирования доказана работоспособность системы охлаждения корпуса вакуумной камеры в условиях эксплуатации. Анализ температурного состояния конструкции камеры позволяет определить, что наибольшие температуры наблюдаются в неохлаждаемых местах соединения корпуса и дверцы камеры. При воздушном охлаждении температура конструкции не превышает 536 К, а при водяном 435 К. В связи с этим целесообразно использовать водяное охлаждение с давлением на входе в 0,6 МПа. Расход охлаждающей жидкости при этом составит 2 л/с, а среднемассовая температура на выходе – около 40°С. Применение математического моделирования позволяет сократить требуемые материальные и временные ресурсы на этапе проектирования и

экспериментальной отработки за счет исключения из рассмотрения нерелевантных вариантов конструктивного исполнения узлов установки.

### **Информация о финансовой поддержке**

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии от 14 декабря 2020 года № 075-11-2020-032 (идентификатор государственного контракта – 000000S207520RNU0002) по теме: «Разработка и организация высокотехнологичного производства запорной арматуры для нужд специальной и медицинской техники с повышенной надежностью и долговечностью на основе применения многокомпонентных нанокompозитных материалов» с Министерством науки и высшего образования РФ.

### **Литература**

1. Пирогов В.В. и др. Эксплуатация и ремонт технологического оборудования: монография. М.: «Эко-Пресс», 2021. 321 с.
2. Semenov A.B. et al. The modern market of blank productions in mechanical engineering and the problem of standardization of new materials and technological processes // *Advanced Materials & Technologies*. 2019. №. 1 (13). pp. 3-11. DOI: 10.17277/amt.2019.01.pp.003-011
3. Qin Y. *Micromanufacturing engineering and technology*. Second Edition. William Andrew, 2015. 858 p. DOI: 10.1016/C2013-0-19351-8
4. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // *Entropy*. 2014. V. 16. №. 9. pp. 4749-4768. DOI: 10.3390/e16094749.
5. Li W. et al. Mechanical behavior of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2021. V. 118 Art. No. 100777. 142 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100777

6. Ikeda Y., Grabowski B., Körmann F. Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicomponent alloys: A comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys // *Materials Characterization*. 2019. V. 147. pp. 464-511. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.019

7. Alexandrov I.A., Muranov A.N., Mikhailov M.S. The analysis of ways to increase the durability of shut-off valves loaded elements // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021. V. 6. №. 3. pp. 225-235. DOI: 10.17277/jamt.2021.03.pp.225-235

8. Игнатъев А.С., Моховиков А.А., Овчаренко В.Е. Влияние структурно-фазового состояния поверхностного слоя на износостойкость режущей кромки металлокерамической пластины при резании металла // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении*, Юрга, 22-23 мая 2014 года. Юрга: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. С. 244-249.

9. Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Olejnik A.V. Evaluation of the contact surface parameters at knurling finned heat-exchanging surface by knurls at ring blanks // *Periódico Tchê Química*. 2020. V. 17(36). pp. 372–389. DOI: 10.52571/ptq.v17.n36.2020.387\_periodico36\_pgs\_372\_389.pdf

10. Makhlof A.S.H., Scharnweber D. (ed.). *Handbook of nanoceramic and nanocomposite coatings and materials*. Butterworth-Heinemann, 2015. 612 p. DOI: 10.1016/C2013-0-13073-5

11. Vereschaka A.S. et al. Control of Structure and Properties of Nanostructured Multilayer Composite Coatings Applied to Cutting Tools as a Way to Improve Efficiency of Technological Cutting Operations // *Journal of Nano Research*. 2016. V. 37. pp. 51-57. DOI: 10.4028/scientific.net/JNanoR.37.51

12. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // *Инженерный вестник Дона*, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476

---

13. Лясникова А.В. и др. Исследование плазмонапыленных нанокompозитных покрытий на основе магнийзамещенного трикальцийфосфата // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54. №. 3. С. 247-250. DOI: 10.7868/S0044185618030051

14. Бржозовский Б.М. и др. Технология и оборудование для синтеза нанокompозитных ионно-плазменных покрытий на рабочих поверхностях геометрически сложных изделий // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. №. 1(40). С. 216-222.

15. Долгов Н.А., Смирнов И.В., Андрейцев А.Ю. Влияние режимов плазменного напыления нанокompозитного порошка  $Al_2O_3$  -  $nanoTiO_2$  на прочность сцепления покрытий // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сборник научных трудов. В 3-х книгах Минск: Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», 2018. С. 83-92.

### References

1. Pirogov V.V. i dr. E`kspluatatsiya i remont texnologicheskogo oborudovaniya: monografiya [Operation and repair of technological equipment: monograph]. M.: «E`ko-Press», 2021. 321 p.

2. Semenov A.B. et al. Advanced Materials & Technologies. 2019. №. 1 (13). pp. 3-11. DOI: 10.17277/amt.2019.01.pp.003-011

3. Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology. Second Edition. William Andrew, 2015. 858 p. DOI: 10.1016/C2013-0-19351-8

4. Cantor B. Entropy. 2014. V. 16. №. 9. pp. 4749-4768. DOI: 10.3390/e16094749.

5. Li W. et al. Progress in Materials Science. 2021. V. 118 Art. No. 100777. 142 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100777

6. Ikeda Y., Grabowski B., Körmann F. *Materials Characterization*. 2019. V. 147. pp. 464-511. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.019
7. Alexandrov I.A., Muranov A.N., Mikhailov M.S. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021. V. 6. №. 3. pp. 225-235. DOI: 10.17277/jamt.2021.03.pp.225-235
8. Ignat`ev A.S., Moxovikov A.A., Ovcharenko V.E. *Innovacionny`e texnologii i e`konomika v mashinostroenii, Yurga, 22-23 maya 2014 goda*. Yurga: Nacional`ny`j issledovatel`skij Tomskij politexnicheskij universitet [Innovative technologies and economics in mechanical engineering, Yurga, May 22-23, 2014. Yurga: National Research Tomsk Polytechnic University], 2014. pp. 244-249.
9. Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Olejnik A.V. *Periódico Tchê Química*. 2020. V. 17(36). pp. 372–389. DOI: 10.52571/ptq.v17.n36.2020.387\_periodico36\_pgs\_372\_389.pdf
10. Makhlof A.S.H., Scharnweber D. (ed.). *Handbook of nanoceramic and nanocomposite coatings and materials*. Butterworth-Heinemann, 2015. 612 p. DOI: 10.1016/C2013-0-13073-5
11. Vereschaka A.S. et al. *Journal of Nano Research*. 2016. V. 37. pp. 51-57. DOI: 10.4028/scientific.net/JNanoR.37.51
12. Kudryavcev P.G., Figovskij O.L. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2014, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476)
13. Lyasnikova A.V. i dr. *Fizikoximiya poverxnosti i zashhita materialov*. 2018. V. 54. №. 3. pp. 247-250. DOI: 10.7868/S0044185618030051
14. Brzhozovskij B.M. i dr. *Vestnik Ry`binskoj gosudarstvennoj aviacionnoj texnologicheskoy akademii im. P.A. Solov`eva*. 2017. №. 1(40). pp. 216-222.
15. Dolgov N.A., Smirnov I.V., Andrejcev A.Yu. *Sovremenny`e metody` i texnologii sozdaniya i obrabotki materialov: Sbornik nauchny`x trudov. V 3-x knigax*. Minsk: Gosudarstvennoe nauchnoe uchrezhdenie «Fiziko-texnicheskij



institut Nacional`noj akademii nauk Belarusi» [Modern methods and technologies for creating and processing materials: Collection of scientific papers. In 3 books Minsk: State Scientific Institution "Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus"], 2018. pp. 83-92.