

## Моделирование и экспериментальное исследование влияния давления в системе подачи газа плазменной установки на скорость потока

*Р.А. Окулов<sup>1,2</sup>, Н.В. Семенова<sup>2</sup>, Н.Д. Бузолин<sup>1</sup>, С.Е. Петров<sup>2</sup>, В.А.*

*Крашанинин<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург*

*<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

**Аннотация:** Статья посвящена изучению скорости потока в зависимости от давления в системе подачи газа плазменной головки. Поставленная задача решалась путем проведения компьютерного эксперимента с последующей верификацией результатов натурным экспериментом. Смоделирована лабораторная плазменная установка МАК-10 собранная на базе ИМЕТ УрО РАН, применяемая в процессах нанесения покрытий, получения порошка и модификации поверхностей деталей. Компьютерный эксперимент проведен с использованием программного пакета SolidWorks Flow Simulation. В результате выполненной работы, продемонстрировано распределение скорости потока вдоль его оси при работе плазменной установки с давлением в системе подачи газов: 0,1; 0,2 и 0,3 МПа. Разработаны рекомендации по ведению процессов нанесения покрытий, получения порошков и модификации поверхности, имеющие практическую пользу для потребителей технологического оборудования.

**Ключевые слова:** Математическая модель, поток, скорость, давление, плазменный метод, получение порошка, нанесение покрытия, модификация поверхности.

### Введение

Плазменный метод нашел применение в современном производстве [1]. При помощи плазменного распыления получают порошковые материалы, например, применяемые в качестве сырья для аддитивных технологий [2 – 4]. Плазменный метод позволяет производить порошки nano дисперсной фракции [5 – 7], в том числе, из таких тугоплавких материалов, как вольфрам [8]. Плазменный метод широко применяется в процессах напыления функциональных покрытий [9 – 11], в том числе из композитных материалов [12]. При помощи плазменного метода производят термическую обработку поверхности для ее модификации и восстановления свойств [13 – 15].

В свою очередь, на свойства получаемых порошков, оказывает влияние параметры плазменной струи, в частности скорость. Скорость потока зависит от давления, которое подается в систему подвода плазмообразующих газов к

плазменной головке. Таким образом, изучение влияния давления в системе подачи газов на скорость потока является актуальной темой исследования.

В ИМЕТ УрО РАН разработана многофункциональная лабораторная плазменная установка МАК-10, применяемая в процессах нанесения функциональных покрытий, получения металлических порошков и модификации поверхностей деталей.

В данной статье поставлена задача определить распределение скорости вдоль оси потока в зависимости от различных значений давления в системе подачи плазмообразующего газа плазменной головки. Поставленная в рамках данной статьи задача решена при помощи проведения компьютерного эксперимента с последующей его верификацией проведением натурального эксперимента.

Компьютерное моделирование нашло широкое применение в производственной практике, поскольку позволяет сократить затраты при отработке и совершенствовании различных процессов [16]. Метод конечных элементов используется для решения подобных задач [17-19]. Например, для нанесения покрытий применяют ANSYS [20], SolidWorks [21] и JmarPro [22]; для исследования процессов получения порошков плазменным методом – ANSYS [23], FLOW-3D [24] и COMSOL [25].

### **Описание компьютерного эксперимента**

Для решения поставленной задачи применили программу для параметрического моделирования потока SolidWorks Flow Simulation. С ее помощью определено значение скорости потока вдоль оси потока в зависимости от различных значений давления в системе подачи плазмообразующего газа: 0,1; 0,2 и 0,3 МПа. При помощи данного программного пакета создана трехмерная математическая модель, описывающая лабораторную плазменную установку МАК-10, собранную в ИМЕТ УрО РАН. Данная плазменная установка состоит из источника

питания мощностью 6,5 кВт, chillера, холодопроизводительностью 6,2 кВт, компрессора, газового шкафа, пульта управления источником питания и плазменной головки. Конструкция плазменной головки МАК-10 приведена на рис. 1. Подробно о составе и особенностях лабораторной установки МАК-10 написано в работе [26].

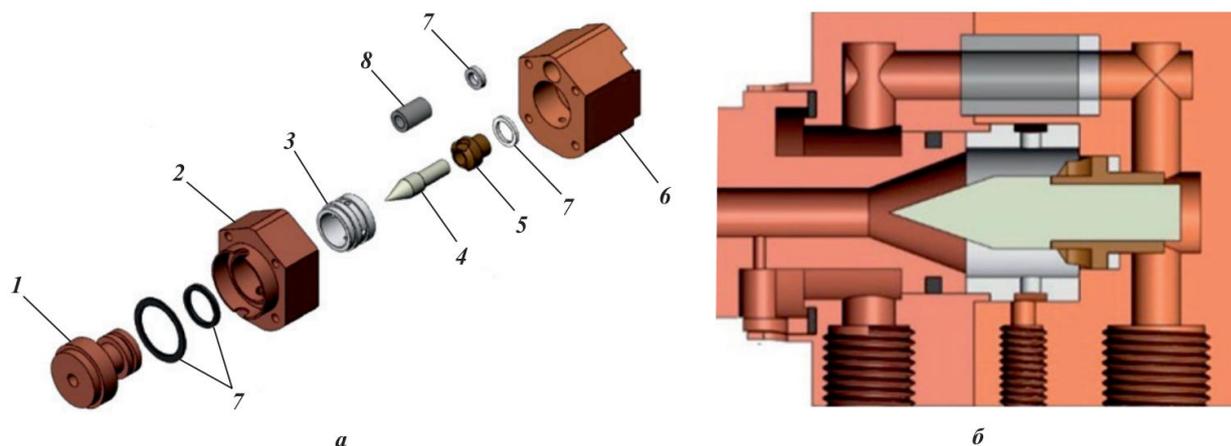


Рис. 1 – Состав плазменной головки установки МАК-10 (а) и ее поперечное сечение вдоль оси (б): 1 – анод, 2 – корпус анода, 3 – завихритель, 4 – катод, 5 – втулка катода, 6 – корпус катода, 7 – уплотнительные кольца, 8 – втулка

В качестве исходных данных применили:

Тип газовой среды – воздух;

Температура – 293 К;

Режим работы плазмотрона – холостой ход.

Выбор программного пакета обоснован удобством и точностью получаемых результатов, основанных на вычислительной гидродинамике. Применены уравнения Эйлера и Навье-Стокса.

Выполнен анализ выбора размера конечно-элементной сетки, обеспечивающей учет поверхностных, подповерхностных и срединных процессов, происходящих в потоке. Размер элемента разбиения не должен превышать 0,24 мм, для того, чтобы в наиболее узком месте расчетной области помещалось 8 элементов [27].

### **Натурный эксперимент**

С целью подтверждения представленной компьютерной модели плазменной установки провели натурный эксперимент. Для этого использовали цифровой анемометр Venetech GM816 с диапазоном измеряемой скорости ветра от 0 до 30 м/с. Шаг измерений: 0,1. Точность измерения скорости ветра:  $\pm 5\%$ . Полученные данные подвергли статистической обработке методом точечных диаграмм размахов, затем определили средние значения [28, 29]. Анемометр размещали на оси потока таким образом, чтобы замерить значение скорости вдоль его оси с шагом 50 мм, на удалении от среза анода до 500 мм. Исходные данные для проведения натурального эксперимента соответствовали компьютерному. Провели верификацию распределения скорости вдоль потока при значениях давления в системе подачи газа равного 0,1; 0,2 и 0,3 МПа.

### **Результаты и их обсуждение**

Результаты выполненных компьютерного и натурального экспериментов представлены на рис. 2.

На графике продемонстрировано распределение скорости потока вдоль оси в зависимости от рассмотренных вариантов давления в системе подачи газа. При удалении от плазменной головки скорость снижается во всех рассмотренных случаях. Чем выше давление в системе подачи газов, тем выше значение скорости потока. Полученные данные компьютерного эксперимента согласуются с результатами натурального. Отличие значений не превышает 4,8%.

Исходя из полученных данных, можно сформулировать рекомендации по ведению рассматриваемых процессов, имеющих практическую пользу для потребителей плазменного оборудования.

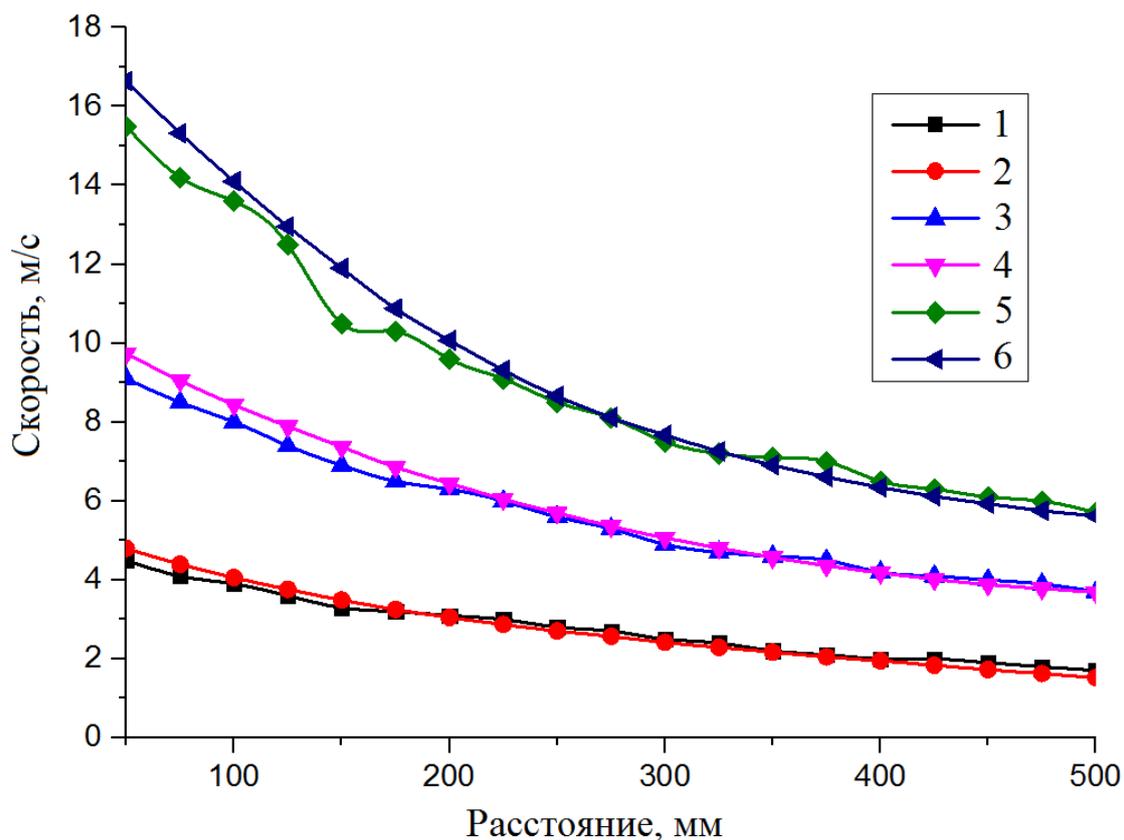


Рис. 2 – Распределение скорости потока вдоль оси по данным теоретического (1, 3, 5) и натурального (2, 4, 6) экспериментов: 1, 2 - при давлении 0,1 МПа; 3, 4 – при давлении 0,2 МПа; 5, 6 - при давлении 0,3 МПа.

При использовании плазменного метода в процессе нанесения покрытий рекомендуется применять наибольшее значение давления в системе подачи плазмообразующих газов, так как достигаются наибольшие значения скорости плазменного потока, что положительно сказывается на параметрах напыляемых функциональных покрытий, например, адгезии [30]. При использовании плазменного метода в процессе производства порошков, напротив, рекомендуется применять наименьшее значение давления в системе подачи плазмообразующих газов, так как в данном процессе применяется камера приема распыляемых порошков и пониженное значение скорости плазменного потока позволяет уменьшить габаритные размеры установки, за счет уменьшения длины реактора [31]. При использовании

плазменного метода в процессе модификации поверхности деталей представленные данные полезны в качестве выбора рационального положения детали относительно плазменной головки, а именно ее удаленности от анода или угла наклона относительно оси потока [32].

### **Выводы**

Проведенное исследование имеет научную новизну – создание компьютерной модели, позволяющей адекватно описывать скорость потока в зависимости от изменения давления в системе подачи газа. Натурный эксперимент показал удовлетворительную сходимость. Продемонстрировано, что изменение давления в системе подачи газа оказывает существенное влияние на скорость потока. Предложены практические рекомендации для потребителей плазменного оборудования, используемого в процессах получения порошков, нанесения покрытий и модификации поверхностей деталей.

### **Благодарность за финансовую поддержку работы**

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института металлургии Уральского отделения РАН (тема № 122020100287-1 ЕГИСУ НИОКТР).*

### **Литература**

1. Sneha S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing // Journal of Cleaner Production. 2017. V. 142 (4). pp. 3131-3150.
2. Sunpreet S. Seeram R., Rupinder S. Material issues in additive manufacturing: A review // Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 25. pp. 185-200
3. Qiu J., Yu D., Chen Y., Li D., Islam M. Sh., Peng X. Controllable preparation of YSZ-STHS in arc plasma spheroidization: Exploring the plasma

flow characteristics' impact on powder quality // *Ceramics International*. 2024. V. 50 (15). pp. 26569-26582.

4. Shen Q., Guo S., Hao Z., Ma R., Wang P., Shu Y., He J. Effect of processing parameters on microstructure and properties of spherical WC-Co powder by plasma spheroidization // *Ceramics International*. 2024. V. 50 (4). pp. 6921-6930.

5. Neikov O.D., Yefimov N.A. Chapter 9 Nanopowders // *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. 2019. pp. 271-311.

6. Рудская А.Г., Власенко М.П., Чаговец С.В., Назаренко А.В., Тесленко П.Ю., Разумная А.Г., Кофанова Н.Б., Куприянов М.Ф. Методы синтеза LaMnO<sub>3</sub> (обзор) // *Инженерный вестник Дона*, 2013, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724).

7. Li X., Qu X., Liu D., Zhu G., Dong X., Jung Y. In-situ preparation of Ni@ZrO<sub>2</sub> nanocapsules powder by DC arc plasma for internal electrode of MLCC // *Vacuum*. 2024. V. 224. p. 113130.

8. Gao X., Mo Z., Hao Z., Ma R., Wang P., Shu Y., He J. Fabrication of spherical W-ZrC powder for additive manufacturing by spray granulation combined with plasma spheroidization // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. V. 28. pp. 4222-4228.

9. Климин В.С., Резван А.А., Коц И.Н. Формирование маскирующего покрытия методом фокусированных ионных пучков для плазменной обработки // *Инженерный вестник Дона*, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476).

10. Samal S., Zeman J., Kopeček J., Šittner P. Thermal plasma spraying of NiTi powder for thick coating of shape memory alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. V. 984. p. 173962.

11. Wang Y, Yang Y., Wang X., Li W., Gou J. Microstructure and properties of molybdenum composite coatings by plasma spraying of Mo-SiC and

---

MoO<sub>3</sub>-Al-SiC composite powders // *Ceramics International*. 2024. V. 50 (2). pp. 2963-2975.

12. Li F., He P., Li G., Ye L., Zhang B., Sun C., Xing Y., Wang Y., Duan X., Liang X. Microstructure development of plasma sprayed dual-phase high entropy ceramic coating derived from spray dried and induction plasma spheroidized powder // *Ceramics International*. 2024. V. 50 (13). pp. 24576-24593.

13. Wang K., Ma Q., Xu J., Liu Ch., Wang P., Chen R., Gao Y., Li L. Study on the mechanism of plasma jet surface hardening of rail steels by using numerical method // *Materials Today Communications*, 2022. V. 31. p. 103773.

14. Поклонская М.В. Усталостные свойства усовершенствованной высокопрочной стальной пластины, сваренной гибридной плазменной дуговой сваркой // *Инженерный вестник Дона*, 2022, №5 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7674](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7674).

15. Guo D., Yu D., Zhang P., Duan Y., Zhang B., Zhong Y., Qiu J. Laminar plasma jet surface hardening of the U75V rail steel: Insight into the hardening mechanism and control scheme // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 394. p. 125857.

16. Korenchenko A.E., Vorontsov A.G., Okulov R.A., Gelchinski B.R. Simulation of the Self-Assembly of Metal Nanoclusters // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022. №8. pp. 927–932.

17. Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N. Effect of the plasma-forming gas consumption on processes of plasma spray coating and metal powder production // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1281. P.012058.

18. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Influence of the Plasmatron Anode Length in the Processes of Powder Production and Coating // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2456. p. 020035.

---

19. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Plasma jet stream simulation for formation coating and powder manufacturing processes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1954. p. 012033.

20. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Effect of the core-shell structure powders on the microstructure and thermal conduction property of YSZ/Cu composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. V. 424. pp. 127658.

21. Golewski P., Sadowski T. Technological and strength aspects of layers made of different powders laminated on a polymer matrix composite substrate // *Molecules*. 2022. V. 27 (40). p. 1168.

22. Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J. A novel strategy for depositing dense self-fluxing alloy coatings with sufficiently bonded splats by one-step atmospheric plasma spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020. V. 29. pp. 173–184.

23. Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T. Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2021. V. 41. pp. 1471–1495.

24. Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A. Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process // *Powder Technology*. 2021. V. 393. pp. 301-311.

25. AlShunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A. Modelling of a non-transferred plasma torch used for nano-silica powders production // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. P. 9842.

26. Okulov R.A., Akhmetshin S.M., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Trajectories of titanium powder particles of different size in a plasma flow // *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023. 17(3). pp. 47-54.

---

27. Okulov R.A., Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Development of the computer model of the plasma installation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. p. 012044.

28. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.

29. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 88 с.

30. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Influence of the shape of the anode assembly inner channel on plasma flow velocity // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. 166 (1). pp. 58-73.

31. Окулов Р.А., Семенова Н.В., Плетнева Е.Д., Ахметшин С.М. Влияние направления каналов газовых завихрителей на параметры плазменного потока // Инженерный вестник Дона, 2023, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/20238201.

32. Okulov R., Krashaninin V., Gelchinski B., Rempel A. Effect of Gravity on the Motion of Titanium Powder Particles in a Plasma Flow // Russian Metallurgy (Metally). 2023. V. 5. pp. 559-564.

### References

1. Sneha S. Journal of Cleaner Production. 2017. V. 142 (4). pp. 3131-3150.
2. Sunpreet S. Seeram R., Rupinder S. Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 25. pp. 185-200
3. Qiu J., Yu D., Chen Y., Li D., Islam M. Sh., Peng X. Ceramics International. 2024. V. 50 (15). pp. 26569-26582.
4. Shen Q., Guo S., Hao Z., Ma R., Wang P., Shu Y., He J. Ceramics International. 2024. V. 50 (4). pp. 6921-6930.

5. Neikov O.D., Yefimov N.A. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. 2019. pp. 271-311.
  6. Rudskaya A.G., Vlasenko M.P., Chagovets S.V., Nazarenko A.V., Teslenko P.Yu, Razumnaya A.G., Kofanova N.B., Kupriyanov M.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724).
  7. Li X., Qu X., Liu D., Zhu G., Dong X., Jung Y. Vacuum. 2024. V. 224. p. 113130.
  8. Gao X., Mo Z., Hao Z., Ma R., Wang P., Shu Y., He J. Journal of Materials Research and Technology. 2024. V. 28. pp. 4222-4228.
  9. Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476).
  10. Samal S., Zeman J., Kopeček J., Šittner P. Journal of Alloys and Compounds. 2024. V. 984. p. 173962.
  11. Wang Y, Yang Y., Wang X., Li W., Gou J. Ceramics International. 2024. V. 50 (2). pp. 2963-2975.
  12. Li F., He P., Li G., Ye L., Zhang B., Sun C., Xing Y., Wang Y., Duan X., Liang X. Ceramics International. 2024. V. 50 (13). pp. 24576-24593.
  13. Wang K., Ma Q., Xu J., Liu Ch., Wang P., Chen R., Gao Y., Li L. Materials Today Communications, 2022. V. 31. p. 103773.
  14. Poklonskaya M.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7674](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7674).
  15. Guo D., Yu D., Zhang P., Duan Y., Zhang B., Zhong Y., Qiu J. Surface and Coatings Technology. 2020. V. 394. p. 125857.
  16. Korenchenko A.E., Vorontsov A.G., Okulov R.A., Gelchinski B.R. Russian Metallurgy (Metally). 2022. №8. pp. 927–932.
  17. Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N. Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1281. P.012058.
-

18. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2456. p. 020035.

19. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1954. p. 012033.

20. Li Q., Zhang N., Gao Y., Qing Y., Zhu Y., Yang K., Zhu J., Wang H., Ma Z., Gao L., Liu Y., He J. Surface and Coatings Technology. 2021. V. 424. pp. 127658.

21. Golewski P., Sadowski T. Molecules. 2022. V. 27 (40). p. 1168.

22. Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J. Journal of Thermal Spray Technology. 2020. V. 29. pp. 173–184.

23. Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2021. V. 41. pp. 1471–1495.

24. Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A. Powder Technology. 2021. V. 393. pp. 301-311.

25. AlShunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A. Applied Sciences. 2021. V. 11. P. 9842.

26. Okulov R.A., Akhmetshin S.M., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Powder Metallurgy and Functional Coatings. 2023. 17(3). pp. 47-54.

27. Okulov R.A. Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. p. 012044.

28. Solonin I.S. Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroyeniya [Mathematical statistics in engineering technology]. Moskva: Mashinostroyeniye, 1972. 215 p.

29. Kravchenko N.S., Revinskaya O.G. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenki pogreshnostey v uchebnom laboratornom praktikume: uchebnoye posobiye [Methods for processing the results of measurements and estimating errors in the educational laboratory workshop: a tutorial]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011. 88 p.

---



30. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. 166 (1). pp. 58-73.

31. Okulov R.A., Semenova N.V., Pletneva E.D., Akhmetshin S.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/20238201](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/20238201).

32. Okulov R., Krashaninin V., Gelchinski B., Rempel A. Russian Metallurgy (Metally). 2023. V. 5. pp. 559-564.

**Дата поступления: 13.06.2024**

**Дата публикации: 22.07.2024**