

Влияние направления каналов газовых завихрителей на параметры плазменного потока

Р.А. Окулов^{1,2}, Н.В. Семенова², Е.Д. Плетнева², С.М. Ахметшин¹

¹Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация: В статье решена задача определения влияния формы газовых завихрителей с различными вариантами сочетания направления каналов на скорость и температуру плазменного потока. Создана математическая модель плазменной установки. Выполнен сравнительный анализ применения газовых завихрителей с каналами, которые направлены в одну сторону и в противоположные. Поставленная задача решена путем проведения компьютерного эксперимента методом конечных элементов при помощи программного пакета SolidWorks. Итоги расчетного эксперимента были верифицированы путем проведения натурного эксперимента при помощи экспериментальной плазменной установки, которая применяется для получения порошка, нанесения покрытий и модификации поверхностей изделий, с учетом ее конструктивных особенностей. Предложены рекомендации по ведению этих процессов. Результаты имеют практическую пользу для разработчиков и потребителей технологического оборудования.

Ключевые слова: математическая модель, плазменный поток, температура, скорость, газовый завихритель, плазменный метод, получение порошка, нанесение покрытия, модификация поверхности.

Введение

Получение порошков с заданными свойствами является актуальной задачей в области аддитивных технологий, в которой порошки используются в качестве сырья [1]. Плазменный метод получения порошков ультрадисперсной [2], нанодисперсной [3] фракции нашел широкое применение [4]. Данный метод применяется для поверхностной модификации поверхности [5, 6]. Также он широко применяется и для нанесения функциональных покрытий [7, 8].

Параметры получаемых порошков и покрытий, а также свойства модифицированных поверхностей зависят от параметров плазменного потока [9]. Среди параметров плазменного потока наибольший интерес для изучения представляют скорость и температура, их изменение вдоль его оси. Параметры плазменного потока зависят от формы внутреннего канала

плазменной головки [10]. Форму плазменной головки описывают составные части, входящие в ее состав. Таким образом, изучение влияния формы внутреннего канала плазмотрона на параметры плазменного потока является актуальной темой исследования.

В институте металлургии уральского отделения российской академии наук разработана и функционирует лабораторная плазменная установка МАК-100, применяемая для нанесения покрытий, получения порошков и модификации поверхностей. В состав лабораторной плазменной установки входят узлы водного охлаждения и подачи плазмообразующего газа, вентиляция, источник питания, манипулятор и плазменная головка, а также камера приема порошкового материала, используемая в процессе получения порошков. Плазменная головка состоит из анодного и катодного узлов, межэлектродной вставки, узла подачи сырья и двух газовых завихрителей. Более подробное описание лабораторной плазменной установки приведено в работе [11]. Сечение вдоль оси плазменной головки, с целью демонстрации профиля деталей, входящих в ее состав и их расположения представлено на рис.1.

Газовые завихрители предназначены для подачи плазмообразующего газа в плазменную головку. В лабораторной плазменной установке применяются два газовых завихрителя: верхний, расположенный между анодным узлом и межэлектродной вставкой и нижний, расположенный между межэлектродной вставкой и катодным узлом. При работе плазмотрона плазменная дуга может оказывать негативное влияние на перегрев катодного узла в том случае если ее положение остается неизменным, что приводит к прогаранию стенки катода и его плавлению и ведет к отказу плазмотронного оборудования. Для того, чтобы плазменная дуга при функционировании плазмотрона не имела стационарное положение, каналы в газовых завихрителях выполняются таким образом, чтобы плазмообразующий газ

закручивал плазменную дугу, меняя ее положение. В каждом газовом завихрителе выполнены шесть каналов, которые вводят плазмообразующий газ в тангенциальном направлении. Площадь поперечного сечения канала в верхнем завихрителе составляет 15 мм^2 , в нижнем 9 мм^2 . Возможны два варианта сочетания применённых газовых завихрителей. Первый вариант – верхний и нижний газовые завихрители имеют сонаправленные каналы. Второй вариант – каналы верхнего и нижнего газовых завихрителей направлены в противоположные стороны (рис.1).

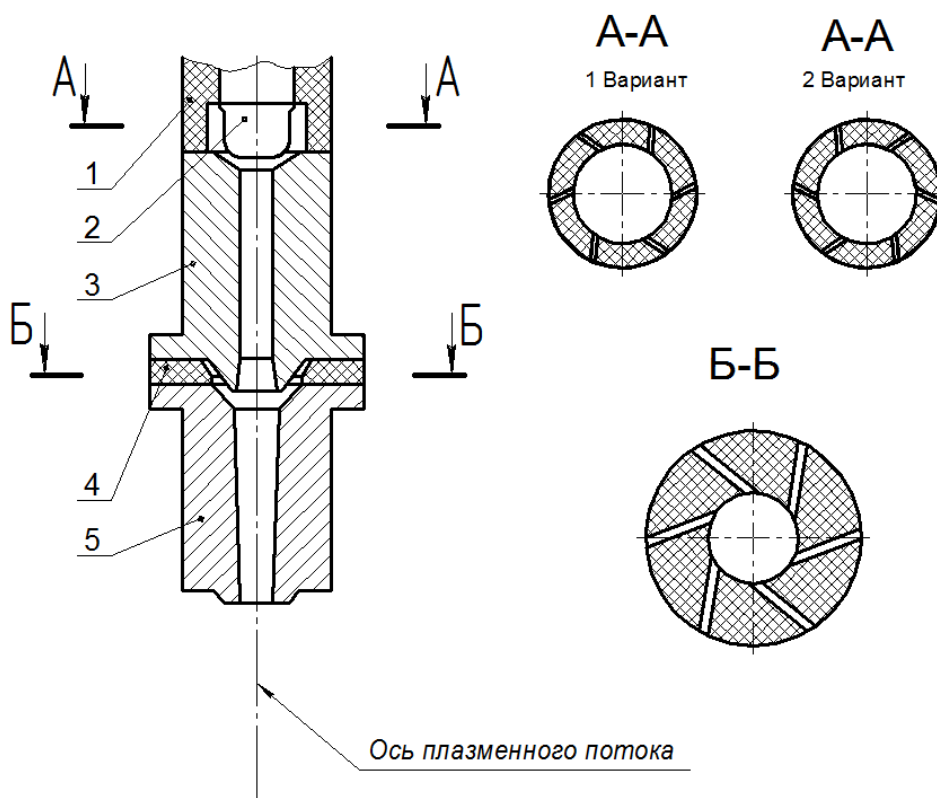


Рис. 1 – Схема головки плазматрона

1 – верхний завихритель; 2 – катодный узел; 3 – межэлектродная вставка;
4 – нижний завихритель; 5 – анодный узел

В рамках данной статьи поставлена задача определения влияния формы газовых завихрителей с различными вариантами сочетания направления каналов на скорость и температуру плазменного потока, их изменение вдоль его оси. Для этого выполнен сравнительный анализ применения газовых

завихрителей с каналами, которые направлены в одну сторону и в противоположные.

Поставленная задача решалась путем проведения компьютерного эксперимента с последующей верификацией путем проведения натурального эксперимента. Метод конечных элементов зарекомендовал себя при решении подобных задач и нашел широкое применение в производственной практике [12]. Например, ANSYS [13], SolidWorks [14] и JmarPro [15] использованы при моделировании процессов нанесения покрытий. Для моделирования производства порошков плазменным методом, применяют ANSYS [16], FLOW-3D [17] и COMSOL [18]. Численный метод применяется для изучения формирования функциональных покрытий из высоко энтропийных сплавов, например, GdTbDyHoSc и GdTbDyHoY [19].

Описание компьютерного эксперимента

В качестве программного пакета, реализующего метод конечных элементов, для решения задачи, стоящей в рамках выполненного исследования, применили SolidWorks [20]. При помощи программного пакета создана трехмерная математическая модель, адекватно описывающая лабораторную плазменную установку и определены значения температуры и скорости потока вдоль оси плазменного потока. Геометрические параметры модели и тип газовой среды выбраны в соответствии с применяемыми на лабораторной плазменной установке при проведении натурального эксперимента. Исходные данные, примененные при моделировании методом конечных элементов: тип плазмообразующего газа – аргон чистотой 99,993% ГОСТ 10157-2016, объемный расход газа – 50 дм³/мин; мощность плазмотрона 80 кВт. Конструкция плазмотрона состояла из анода с коническим конфузورным участком с переходом диаметра с 11 до 8 мм, длина конфузорного участка составляла 52 мм. Более подробное описание примененной математической модели представлено в работе [21].

Результаты компьютерного эксперимента

Результаты выполненного компьютерного эксперимента приведены на рис.2.

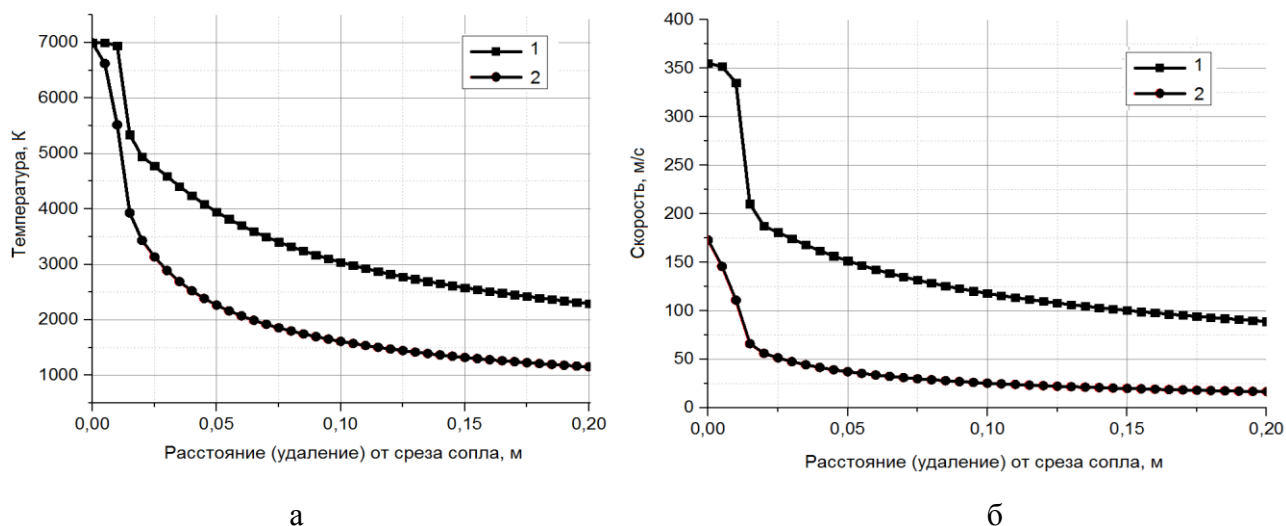


Рис. 2. – Температура (а) и скорость (б) вдоль оси плазменного потока для вариантов исполнения каналов завихрителей: в одну (1) и противоположные (2) стороны

Как видно из представленных данных, применение газовых завихрителей для двух возможных вариантов исполнения каналов оказывает существенное влияние на температуру и скорость плазменного потока. В случае применения верхнего и нижнего газовых завихрителей, у которых каналы направлены в одну сторону, значение температуры и скорости плазменного потока выше, чем в случае применения варианта, при котором каналы газовых завихрителей направлены в противоположные стороны.

Для процесса нанесения покрытий рекомендуется применять вариант ориентации каналов газовых завихрителей, направленных в одну сторону, поскольку достигаются наибольшие значения скорости и температуры плазменного потока, которые благоприятно влияют на свойства наносимых покрытий. Представленные данные согласуются с описанными в литературе [22].

Для процесса производства порошков рекомендуется применять вариант ориентации каналов газовых завихрителей, направленных в противоположные стороны, поскольку для данного процесса имеет значение более низкая скорость плазменного потока, что позитивно сказывается на уменьшении габаритов установки и сфероидизацию частиц порошка [23].

Для процесса модификации поверхности, результаты проведенного исследования можно использовать для определения рационального положения обрабатываемой поверхности [24].

Описание натурального эксперимента

С целью верификации компьютерной модели проведен натуральный эксперимент по установлению значения величины температуры на оси потока плазменной струи при выходе из плазматрона в трех точках. Для этого выбраны прутки диаметром 3 мм из различных материалов: медь М1 ГОСТ 859-2014 ($T_{пл.}=1357$ К), Сталь 10 ГОСТ 1050-88 ($T_{пл.}=1758$ К) и вольфрам лантанированный ТУ 48-19-27-88 ($T_{пл.}=3653$ К). Прутки поочередно размещали в манипуляторе перпендикулярно оси потока плазменной струи таким образом, чтобы один конец прутка находился на оси, а второй был зажат в манипуляторе. Манипулятор располагался на расстоянии 0,5 м от плазматрона. Далее манипулятор, с вмонтированным в него прутком, постепенно перемещали с постоянной скоростью 50 мм/мин параллельно оси плазменного потока по направлению к плазматрону. Расстояние от прутка до торцевой плоскости анода (выход плазматрона) регистрировали.

Для каждого из рассматриваемых случаев направления плазменного потока проведены пять параллельных экспериментов. С целью надежного получения результатов замеров, провели статистическую обработку итогов эксперимента. Выбран в качестве наиболее подходящего метода

статистического анализа - метод точечных диаграмм размахов и их средних значений [25, 26].

В натурном эксперименте использовался пирометр оптический ЭОП-66, который фиксировал температуру поверхности свободного конца прутка. В момент, когда на поверхности прутка начинался процесс плавления, снимали данные со шкалы пирометра и фиксировали расстояния от прутка до плазмотрона. Результаты натурального эксперимента сопоставлены с итогами компьютерного (таблица №1 и рис. 3).

Таблица № 1

Расстояния от прутка до торцевой поверхности плазмотрона при достижении температуры плавления по результатам расчета и натуральных экспериментов

Материал прутка	Расчет, мм	Натурный эксперимент, мм	Относительная погрешность, %
Медь М1	141	135	4,4
Сталь 10	82	85	3,5
Вольфрам	19	20	5,0

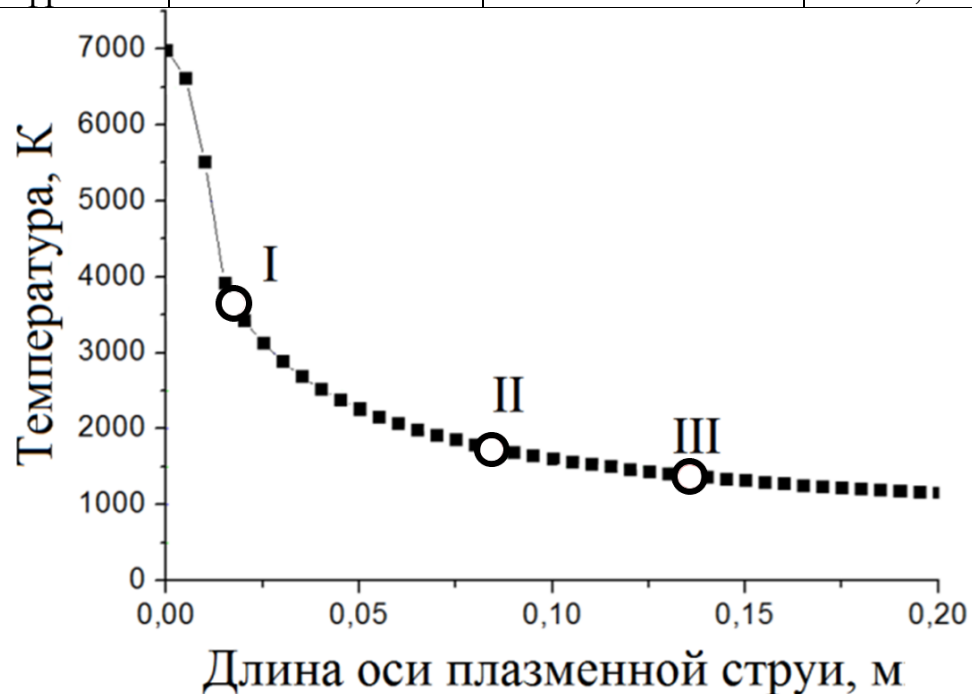


Рис. 3. – Изменения температуры вдоль оси плазменного потока, где: точки I (вольфрам), II (сталь) и III (медь) по данным натурального эксперимента

Результаты сравнительного анализа итогов натурального и компьютерного эксперимента показал удовлетворительную сходимость, погрешность не превысила 5 %. Более подробное описание проведенного натурального эксперимента представлено в работах [27-29].

Выводы

Научная новизна выполненного исследования заключается в проведении сравнительного анализа применения газовых завихрителей с двумя возможными вариантами исполнения каналов завихрителей, которые направлены в одну сторону и в противоположные.

Продемонстрировано, что применение газовых завихрителей, имеющих различный вариант исполнения каналов, оказывает существенное влияние на скорость и температуру плазменного потока.

Разработаны рекомендации, имеющие практическую пользу, для разработчиков и потребителей плазмотронного оборудования, применяемого для нанесения покрытий, получения порошков и модификации поверхностей.

Проведена верификация компьютерного эксперимента путем проведения пяти параллельных экспериментов. Усредненные данные по методикам статистической обработки данных показали удовлетворительную сходимость результатов.

Благодарность за финансовую поддержку работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-21-00063, РФФ, проект № 21-43-00015 и в рамках госзадания ИМЕТ УрО РАН, тема № 122020100287-1 ЕГИСУ НИОКТР.

Литература

1. Sunpreet S. Seeram R., Rupinder S. Material issues in additive manufacturing: A review // Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 25. pp. 185-200.
-

2. Sneha S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing // Journal of Cleaner Production. 2017. V. 142 (4). pp. 3131-3150.
 3. Neikov O.D., Yefimov N.A. Chapter 9 Nanopowders // Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. 2019. pp. 271-311.
 4. 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 LaMnO₃ (обзор) // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724.
 5. 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.
 6. 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.
 7. Zhang X., Cocks A. C.F., Okajima Y., Takeno K., Torigoe T. An image-based model for the sintering of air plasma sprayed thermal barrier coatings // Acta Materialia. 2021. V. 2062021. pp. 116649.
 8. Miao Y., Zhu H., Gao P., Li L. The effects of spraying power on microstructure, magnetic and dielectric properties of plasma sprayed cobalt ferrite coatings // Journal of materials research and technology. 2020. V. 9 (6). pp. 14237-14243.
 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.
-

10. Kim Y., Kim J.H., Han J.-W., Choi J. Multiscale mechanics of yttria film formation during plasma spray coating // *Applied Surface Science*. 2022. V. 572. pp. 151416.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.
 19. Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A. High-entropy alloys: properties and prospects of application as protective coatings // *Russian Chemical Reviews*. 2022. V. 91 (6). p. RCR5023.
 20. Матушкин А.В. Совершенствование системы газовихревой стабилизации электродуговых плазмотронов для резки металлов: дис. ... канд. техн. Наук: 05.02.10. Екатеринбург, 2017. 132 с.
 21. 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.
 22. Anupam A., Kottada R.S., Kashyap S., Meghwal A., Murty B.S., Berndt C.C., Ang A.S.M. Understanding the microstructural evolution of high entropy alloy coatings manufactured by atmospheric plasma spray processing // *Applied Surface Science*. 2020. V. 505. p. 144117.
 23. He J., Bai L., Jin H., Yuan F. Optimization of tungsten particles spheroidization with different size in thermal plasma reactor based on numerical simulation // *Powder Technology*. 2016. V. 302. pp. 288–297.
 24. Brzhozovskii B., Brovkova M., Gots I., Zinina H., Martynov V. Study of the low-temperature plasma treatment effect on the structure, physical and chemical surface characteristics of 40X13 steel // *Heliyon*. 2019. V. 5 (9). p. e02388.
 25. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.
 26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. Okulov R., Ilinykh S., Zakharov M., Akhmethin S. Mathematical Model of the Process of the Plasma Atomizing of the Rod Electrode to Produce of Titanium Powder // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russia, 2020, pp. 1-4.

References

1. Sunpreet S. Seeram R., Rupinder S. Journal of Manufacturing Processes. 2017. V. 25. pp. 185-200.

2. Sneha S. Journal of Cleaner Production. 2017. V. 142 (4). pp. 3131-3150.

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

4. 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.

5. Wang K., Ma Q., Xu J., Liu Ch., Wang P., Chen R., Gao Y., Li L.. Materials Today Communications, 2022. V. 31. p. 103773.

6. Poklonskaya M.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7674.

7. Zhang X., Cocks A. C.F., Okajima Y., Takeno K., Torigoe T. Acta Materialia. 2021. V. 2062021. P. 116649.

8. Miao Y., Zhu H., Gao P., Li L. Journal of materials research and technology. 2020. V. 9 (6). pp. 14237-14243.
 9. Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476.
 10. Kim Y., Kim J.H., Han J.-W., Choi J. Applied Surface Science. 2022. V. 572. p. 151416.
 11. Okulov R.A., Sarsadskikh K.I., Ilinykh S.A., Zakharov M.N. Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1281. P.012058.
 12. Korenchenko A.E., Vorontsov A.G., Okulov R.A., Gelchinski B.R. Russian Metallurgy (Metally), 2022. №8. pp. 927–932.
 13. 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.
 14. Golewski P., Sadowski T. Molecules. 2022. V. 27 (40). p. 1168.
 15. Dong X.-Y., Luo X.-T., Zhang S.-L., Li C.-J. Journal of Thermal Spray Technology. 2020. V. 29. pp. 173–184.
 16. Yin Z., Yu D., Zhang Q., Yang S., Yang T. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2021. V. 41. pp. 1471–1495.
 17. Cui Y., Zhao Y., Numata H., Yamanaka K., Bian H., Aoyagi K., Chiba A. Powder Technology. 2021. V. 393. pp. 301-311.
 18. AlShunaifi I.A., Elaissi S., Ghiloufi I., Alterary S.S., Alharbi A.A. Applied Sciences. 2021. V. 11. P. 9842.
 19. Gelchinski B.R., Balyakin I.A., Yuryev A.A., Rempel A.A. Russian Chemical Reviews. 2022. V. 91 (6). p. RCR5023.
 20. Matushkin A. V. Improving the system of gas-vortex stabilization of electric arc plasma torches for metal cutting [Sovershenstvovaniye sistemy gazovikhrevoy stabilizatsii elektrodugovykh plazmotronov dlya rezki metallov] URL: lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=271484 (accessed 21.12.17).
-

21. Okulov R.A., Popov E.V., Gelchinsky B.R., Rempel A.A. Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. p. 012044.
22. Anupam A., Kottada R.S., Kashyap S., Meghwal A., Murty B.S., Berndt C.C., Ang A.S.M. Applied Surface Science. 2020. V. 505. p. 144117.
23. He J., Bai L., Jin H., Yuan F. Powder Technology. 2016. V. 302. pp. 288–297.
24. Brzhozovskii B., Brovkova M., Gots I., Zinina H., Martynov V. Heliyon. 2019. V. 5 (9). p. e02388.
25. Solonin I.S. Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroyeniya [Mathematical statistics in engineering technology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972. 215 p.
26. 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.
27. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2456. p. 020035.
28. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Popov E.V. Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1954. p. 012033.
29. Okulov R., Ilinykh S., Zakharov M., Akhmetin S. "2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)". Samara. 2020, pp. 1-4.