

Эффективность теплоотвода в системе охлаждения плазмотрона в зависимости от материала анода

P.A. Окулов^{1, 2}, Е.С. Коновалова², Н.В. Семенова²

¹*Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН*

²*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина*

Аннотация: Проведено исследование влияния материала анода на эффективность теплоотвода в системе охлаждения плазмотрона. Методом компьютерного моделирования выполнены расчеты тепловых и гидродинамических процессов для анодов из меди М1, латуни Л63 и бронзы БрО8Ц4. Наибольшая эффективность теплоотвода достигнута при использовании меди благодаря её высокой теплопроводности, что подтверждено натурным экспериментом. Результаты показывают, что выбор материала анода является ключевым фактором для повышения надежности и срока службы плазмотрона.

Ключевые слова: плазмотрон, анодный узел, медь, латунь, бронза, теплоотвод, теплопроводность, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, эффективность охлаждения, тепловой режим.

Введение

Интенсификация рабочих процессов в энергетической, авиационной и ракетно-космической технике обуславливает рост тепловых нагрузок, что приводит к ускоренному износу и повышению эксплуатационных расходов [1, 2]. В связи с этим, разработка конструкций, активно снижающих и эффективно отводящих тепловые потоки, приобретает первостепенное значение.

Благодаря способности создавать сверхвысокие температуры, плазменный метод активно используется в промышленности для порошкового напыления, сварки, наплавки, обработки поверхностей и т.д [3-5]. Преимущества плазмотронов делают их незаменимыми: достижение экстремально высоких температур, недоступных традиционным методам, простота управления, регулировки мощности, запуска/остановки, высокая надежность и компактность [6-8].

Для повышения качества порошков аддитивного производства (получаемых плазменным распылением) и эффективности работы

плазмотрона ведутся исследования: характеристики электрической дуги, параметров плазменного потока, механизмов распыления, вольт-амперной характеристики [9-11].

Ключевым фактором, определяющим производительность и эксплуатационную устойчивость плазмотрона, является материал анодного элемента. В условиях воздействия экстремальных температур, высоких плотностей энергии и значительных скоростей потока плазмообразующей среды, анод подвергается интенсивным тепловым нагрузкам. В этой связи эффективность теплоотвода от анодного узла становится определяющим условием надежности всей установки, поскольку локальный перегрев приводит к выходу из строя критически важных компонентов, таких как катод, анод и сопло. Задача повышения энергоэффективности и ресурса плазмотронов напрямую связана с углубленным исследованием механизмов теплообмена в области взаимодействия плазменной дуги со стенками канала и системой охлаждения.

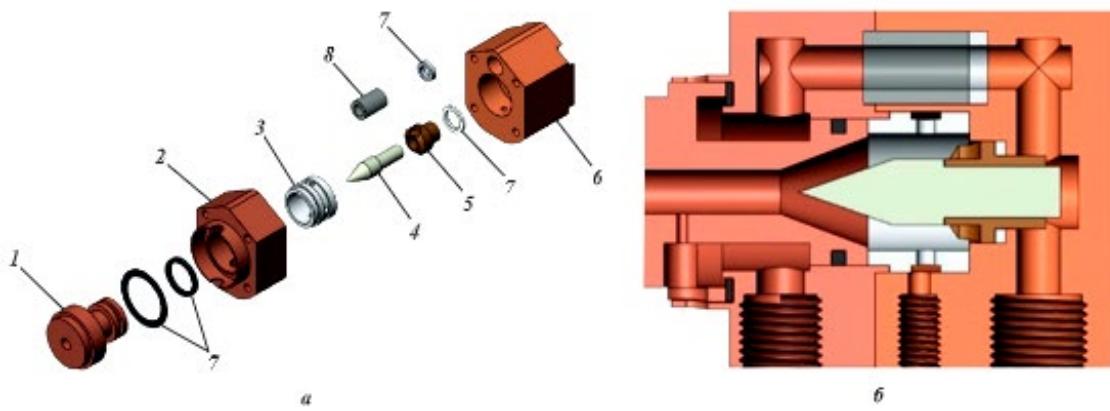
Целью настоящего исследования является анализ влияния материала анода на интенсивность теплоотвода в системе охлаждения плазмотрона.

Описание компьютерного эксперимента

Для достижения поставленной цели был применен комбинированный метод, включающий компьютерное и натурное моделирование. На первом этапе методом конечных элементов был выполнен численный анализ тепловых и гидродинамических процессов. Данный метод широко используется для решения задач подобного класса [12, 13]. Расчеты проводились в программном комплексе Flow Simulation, входящего в состав в системы автоматизированного проектирования SolidWorks (версия 2023, www.solidworks.com). Результаты численного моделирования были верифицированы путем проведения натурного эксперимента на указанной установке.

Была разработана трехмерная компьютерная модель лабораторной плазменной установки МАК-6,5, физический прототип которой создан в Институте металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН.

МАК-6,5 – это плазменная установка косвенного действия, в состав которой входит источник питания мощностью 6,5 кВт. Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б) МАК-6,5 представлено на рис. 1 [14, 15].

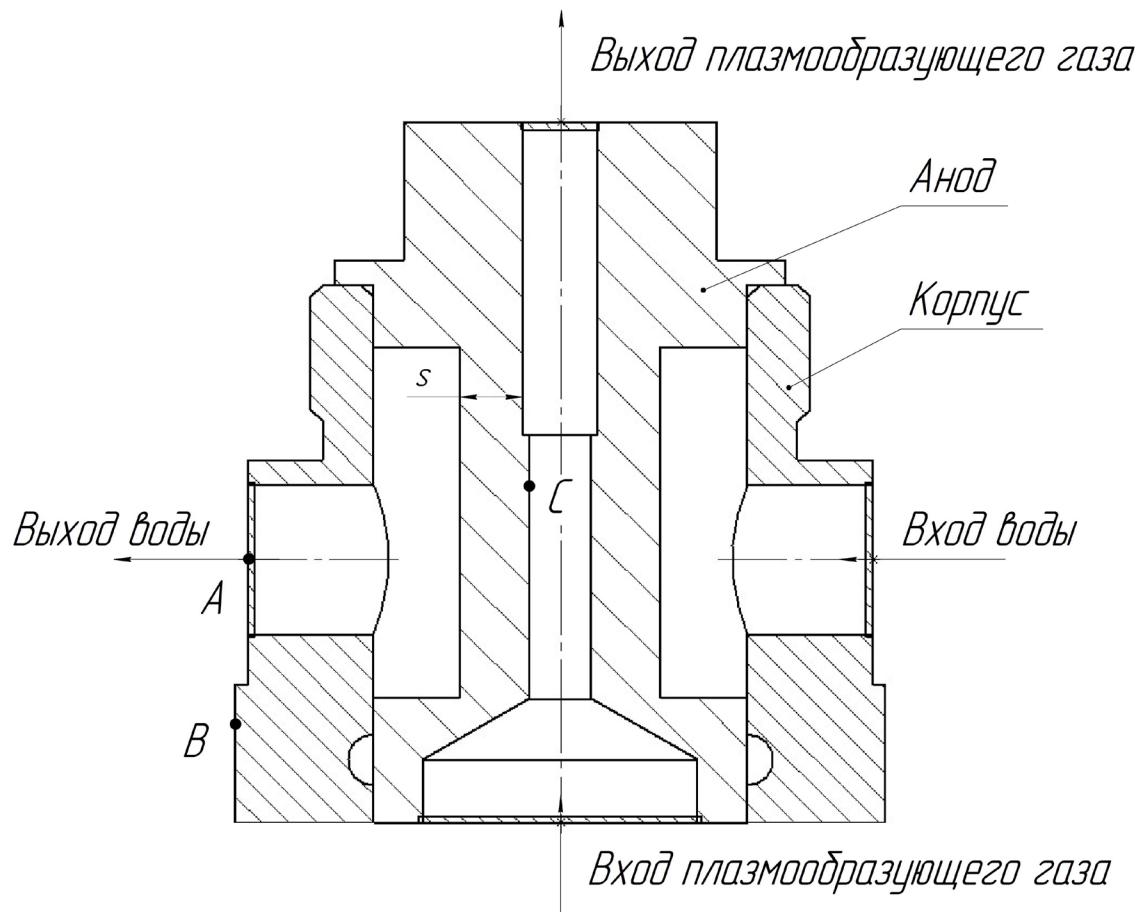


1 – анод, 2 – корпус, 3 – завихритель, 4 – катод, 5 – втулка, 6 – корпус катода, 7 – уплотнительные кольца, 8 – втулка

Рис. 1. – Конструкция плазменной головки установки в разобранном состоянии (а) и в поперечном сечении вдоль оси (б)

Принципиальная схема плазменной установки МАК-6,5 представлена на рис. 2.

В качестве плазмообразующего газа был применен воздух. Объемный расход плазмообразующего газа составлял 2,5 л/мин. Плазменный поток направлен в воздушное пространство. Время работы установки составляло 10 минут. Для охлаждения применялась техническая вода с параметрами на входе: температура 293 К, давление 101325 Па. Объемный расход охлаждающей воды составлял 1 м³/ч. Материал элементов конструкции плазменной головки: корпуса – литая легированная сталь по ГОСТу 4543-2016.



А – точка замера температуры воды

В – точка замера температуры наружной стенки корпуса

С – точка замера температуры внутренней стенки анода

s – толщина стенки анода, $s = 5,0$ мм

Рис. 2. – Принципиальная схема плазменной установки

Для анода рассмотрены следующие варианты материала: медь, латунь, бронза (см. таблицу №1). При расчете использовались следующие фундаментальные законы теплопередачи: закон сохранения массы и уравнения Навье-Стокса для моделирования течения охлаждающей воды и плазмообразующего газа; уравнение энергии и Закон Фурье для анализа теплопроводности в стенках анода; закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена между стенкой анода и охлаждающей водой; закон Стефана-Больцмана для учета радиационного теплообмена в высокотемпературных зонах.

Таблица № 1

Параметры разных материалов анода

№ п/п	Параметр	Медь	Латунь	Бронза
1	Теплопроводность, Вт/(м·К)	385–400	109–121	42–50
2	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	385–390	375–380	340–360
3	Плотность, кг/м ³	8930–8960	8400–8500	8700–8800
4	Коэффициент температуропроводности, м ² /с	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$0,34 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$
5	Удельная теплоёмкость (объёмная), Дж/(м ³ ·К)	$3,45 \cdot 10^6$	$3,20 \cdot 10^6$	$3,10 \cdot 10^6$
6	Температура плавления, К	1356	1173 - 1213	1253 - 1293
7	Нормативный документ	ГОСТ 859-2001	ГОСТ 15527-2004	ГОСТ 5017-2006

Допущения при проведении компьютерного эксперимента:

- процесс адиабатический;
- течение установившееся;
- массовый расход постоянен;
- влияние гравитации пренебрежимо мало.

В таблице №2 представлены сравнительные данные по температуре воды на выходе, измеренные в точках *A*, *B*, *C*, полученные путем компьютерного моделирования для различных материалов анода.

Таблица № 2

Зависимость температуры для разных материалов анода

Параметр	Медь М1	Латунь Л63	Бронза БрО8Ц4
Температура в точке <i>A</i> , К	310,82	315,61	323,54
Температура в точке <i>B</i> , К	306,23	310,89	318,45
Температура в точке <i>C</i> , К	1160,80	1178,18	1195,52

Проведенный анализ температур подтверждает, что материал анода является критическим фактором для теплового режима плазмотрона. Медь М1 проявляет себя как наилучший материал благодаря высокой теплопроводности, обеспечивая самый интенсивный отвод тепла от зоны плазменного потока (на что указывает самая низкая температура в точке *C*) и его эффективную передачу охлаждающей жидкости (самые низкие температуры в точках *A* и *B*). Латунь Л63, уступая меди, является приемлемым компромиссным вариантом. Бронза БрО8Ц4 показала наихудшие результаты по всем трем точкам, что делает ее наименее подходящим материалом для анода в условиях интенсивного тепловыделения, так как она приводит к перегреву и снижает общую эффективность системы охлаждения.

Натурный эксперимент

В рамках верификации компьютерной модели плазменной установки МАК-6,5 был проведен натурный эксперимент по измерению температуры наружной стенки корпуса плазмотрона. В эксперименте качестве плазмообразующего газа был также применен воздух с объемным расходом 2,5 л/мин. Плазменный поток истекал в атмосферу. Охлаждающая вода (техническая) подавалась с расходом 1 м³/ч, температурой 293 К и давлением 101325 Па. Корпус плазменной головки выполнен из легированной стали (ГОСТ 4543-2016), анод из меди М1 (ГОСТ 859-2014). Время работы установки также составляло 10 минут. В течение всего эксперимента обеспечено постоянство действующих факторов, распыление порошка или пруткового материала не происходило. Температура воды в точке *B* контролировалась бесконтактным методом с помощью поверенного инфракрасного пирометра Testo 835-H1. Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.624-2006. Температура воды, измеренная в точке *B*, равнялась 317,89 К, сравнение результатов

компьютерного моделирования с данными натурного эксперимента показало их хорошую сходимость с отклонением не более 3,81 %.

Выводы

Таким образом, исследование подтвердило, что выбор материала анода с высокой теплопроводностью, то есть меди, является критически важным для повышения эффективности теплоотвода, надежности и срока службы ключевых компонентов плазмотрона. Полученные результаты имеют практическую значимость для промышленности, где надежность плазмотронов напрямую влияет на экономическую эффективность процессов восстановления и упрочнения ответственных узлов оборудования.

Благодарность за финансовую поддержку работы

Работа выполнена в рамках НИОКР по теме «Развитие научных основ разработки новых многокомпонентных сплавов, композитов и покрытий, их получения из металлических расплавов, субмикронных порошков и техногенного сырья интенсивными термическими методами» (код темы в ЕГИСУ НИОКР – FUMR-2025-0006).

Литература

1. Ingabire C., Liang D., Li L. Progress on additive manufacturing technology of solid propellants // Energetic Materials Frontiers. 2025. URL: [researchgate.net/publication/392692271_Progress_on_Additive_Manufacturing_Technology_of_Solid_Propellants](https://www.researchgate.net/publication/392692271_Progress_on_Additive_Manufacturing_Technology_of_Solid_Propellants)
2. Исаев А.П., Горшаков Д.А., Сороковиков В.А. Плазменно-механическая обработка в машиностроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 1. С. 27-29.
3. Martín-Fernández F., Martín-Sánchez M.J., Guerrero-Vacas G., Rodríguez-Alabanda Ó. Metallic cutting inserts fabrication by means of additive

manufacturing with fused filament fabrication technology // Results in Engineering. 2024. Vol. 24. P. 103194.

4. Wang W., Lai H., Wang F., Wang D., Li Y., Li S., Luo D., Yamaguchi T. The feasibility of resistance seam welding as an additive manufacturing technology for Al 1060 // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. pp. 6609–6618.

5. Fedorko G., Molnár V., Mikušová N., Neradilová H., Hajný J., Tkáč J., Mizera O. Failure analysis of test specimens conveyor belt components produced by additive technology // Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 169. P. 109170.

6. Maier S., Mayr C., Hoffmann M., Mauthner G., Bleicher F. Consistent layer height in plasma metal deposition by adjusting wire feed // Procedia CIRP. 2025. Vol. 134. pp. 963–968.

7. Caliari F.R., Miranda F.S., Reis D.A.P., Filho G.P., Charakhovski L.I., Essiptchouk A. Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 237. P. 351–360.

8. 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.

9. Motornenko A.P., Schünemann K. Plasmatron with Microwave Excitation of Nonequilibrium Plasma // AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2001. Vol. 55. No. 5. pp. 337–341.

10. Penkov O.V., Lee H., Plaksin V.Y., Mansur R., Kim J.H. Deposition of the ZnO transparent electrodes at atmospheric pressure using a DC Arc Plasmatron // Thin Solid Films. 2010. Vol. 518. No. 22. pp. 6160–6162.

11. 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.

12. Okulov R.A., Buzolin N.D., Akhmetshin S.M., Gel'chinskii B.R. Modeling and Experimental Investigation of the Effect of the Shape of the Internal Plasma Channel in a Plasma Installation with and without an Insert on the Parameters of a Jet // Russian Metallurgy (Metally). 2024. No. 4. pp. 870–875.

13. Окулов Р.А., Ахметшин С.М., Гельчинский Б.Р., Ремпель А.А. Траектория движения частиц титанового порошка различной фракции в плазменном потоке // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2023. Т. 17, № 3. С. 47–54.

14. Окулов Р.А., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р., Ремпель А.А. Влияние силы тяжести на движение частиц титанового порошка в плазменном потоке // Металлы. 2023. № 3. С. 3-10.

15. Okulov R., Krashaninin V., Gelchinskiy B. et al. Effect of Gravity on the Motion of Titanium Powder Particles in a Plasma Flow // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, No. 5. pp. 559–564.

References

1. Ingabire C., Liang D., Li L. Progress on additive manufacturing technology of solid propellants // Energetic Materials Frontiers. 2025. URL: researchgate.net/publication/392692271_Progress_on_Additive_Manufacturing_Technology_of_Solid_Propellants
 2. Isaev A.P., Gorshkalov D.A., Sorokovikov V.A. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. 2022. Vol. 1, pp. 27-29.
 3. Martín-Fernández F., Martín-Sánchez M.J., Guerrero-Vacas G., Rodríguez-Alabanda Ó. Results in Engineering. 2024. Vol. 24. P. 103194.
 4. Wang W., Lai H., Wang F., Wang D., Li Y., Li S., Luo D., Yamaguchi T. Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. pp. 6609–6618.
-



5. Fedorko G., Molnár V., Mikušová N., Neradilová H., Hajnyš J., Tkáč J., Mizera O. Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 169. P. 109170.
6. Maier S., Mayr C., Hoffmann M., Mauthner G., Bleicher Procedia CIRP. 2025. Vol. 134, pp. 963–968.
7. Caliari F.R., Miranda F.S., Reis D.A.P., Filho G.P., Charakhovski L.I., Essiptchouk A. Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 237, pp. 351–360.
8. Klimin V.S., Rezvan A.A., Kots I.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. No. 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5476.
9. Motornenko A.P., Schünemann K. AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2001. Vol. 55. No. 5, pp. 337–341.
10. Penkov O.V., Lee H., Plaksin V.Y., Mansur R., Kim J.H. Thin Solid Films. 2010. Vol. 518. No. 22. pp. 6160–6162.
11. Rudskaya A.G., Vlasenko M.P., Chagovets S.V., Nazarenko A.V., Teslenko P.Y., Razumnaya A.G., Kofanova N.B., Kupriyanov M.F. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. No. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1724.
12. Okulov R.A., Buzolin N.D., Akhmetshin S.M., Gel'chinskii B.R. Russian Metallurgy (Metally). 2024. No. 4, pp. 870–875.
13. Okulov R., Krashaninin V., Gelchinskiy B. et al. Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023, No. 5, pp. 559–564.
14. Okulov R.A., Akhmetshin S.M., Gel'chinskii B.R., Rempel A.A. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya. 2023. Vol. 17, No. 3. pp. 47–54.
15. Okulov R.A., Krashaninin V.A., Gel'chinskii B.R., Rempel A.A. Metally. 2023. No. 3. pp. 3-10.

Дата поступления: 3.11.2025

Дата публикации: 25.12.2025