



УДК 621.791

## SIMULATION OF PLASMOTRON NOZZLE COOLING SYSTEM FOR SURFACE HARDENING AND NANOSTRUCTURING

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛА ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ

**Mazur V. / Мазур В.А.***c. t. s., as. prof / к. т. н., доц.*

ORCID: 0000-0003-1935-1938

**Mikula V. / Микула В.***Student / студент*

*Pryazovskyi State Technical University, str. 7 University, Mariupol  
ГВУЗ Приазовский государственный технический университет  
ул. Университетская 7, г. Мариуполь*

**Аннотация.** Работа посвящена вопросам совершенствования и оптимизации системы охлаждения сопла плазмотрона косвенного действия. Правильный выбор параметров охлаждения и конструктивных особенностей плазмотрона влияет на эффективность и производительность упрочнения, достигаемый уровень свойств. В работе определены критерии оптимизации системы охлаждения. Произведен расчет распределения потоков, скоростей и режимов течения жидкости, охлаждающей сопло плазмотрона.

**Ключевые слова:** сопло, нагрев, охлаждение, эффективность, модель, элемент, скорость, поток, турбулентность

#### **Вступление.**

Современная технология производства многих изделий ответственного назначения предусматривает получение поверхностного слоя со свойствами, значительно отличающимися от свойств основного металла. Требуемые свойства такого слоя могут быть получены под воздействием интенсивного поверхностного нагрева или формированием поверхности с необходимыми свойствами. Одним из наиболее перспективных направлений развития подобных технологий является создание конструкционных и инструментальных материалов новых классов – нанокристаллических, субмикроструктурных, ультрадисперсных и т.п. [1 – 2]. Материалы с такой структурой обладают уникальным комплексом свойств – намного более высокой твердостью, прочностью, износостойкостью – по сравнению со сталями и сплавами, полученными по традиционным технологиям.

#### **Основной текст**

##### **Анализ литературных данных и постановка проблемы**

От правильного выбора типа и конструктивных параметров плазмотрона зависят эффективность и производительность упрочнения, достигаемый уровень свойств. Из анализа литературных данных следует, что в настоящее время отсутствует мнение о предпочтительности использования для поверхностной закалки плазмотронов прямого или косвенного действия. В работах [3, 4] описано эффективное использование плазмотронов прямого действия, однако плазмотроны косвенного действия применяют шире [5, 6, 7]. При нагреве плазмотроном косвенного действия теплопередача в обрабатываемый металл осуществляется только путем конвективного нагрева



его струей плазмы. Регулируя параметры режима обработки, обеспечивают требуемую температуру нагрева и осуществляют обработку как с оплавлением поверхности, так и без оплавления.

Для процессов поверхностной модификации в большинстве случаев применяют штатные плазмотроны косвенного действия установок для сварки, наплавки, напыления. Это плазмотроны с самоустанавливающейся длиной дуги, в которых длина канала  $l_k$  невелика и составляет, как правило, 5...6 калибров:  $l_k = (5...6)d_K$ , где  $d_K$  — диаметр канала, равный 5...10 мм [8]. К недостаткам таких плазмотронов относят шунтирование дуги стенкой дугового канала, зависящее от  $d_K$ , тока, рода и расхода плазмообразующего газа [5]; пульсации напряжения, тока и параметров плазменной струи в процессе работы [5], а также наличие падающей ВАХ, обуславливающей значительную зависимость напряжения от расхода газа (в пределах 35—80 %) [8]. В соответствии с этим для поверхностной модификации эффективно применение плазмотронов с фиксированной длиной дуги, из которых наиболее высокие характеристики имеют плазмотроны с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ). Их преимущества — более высокая температура струи (вследствие достаточно протяженного дугового столба, увеличивающего время пребывания газа в канале); более высокая мощность при тех же значениях тока; высокий КПД; длительный ресурс работы; наличие восходящей ВАХ, что обеспечивает малую зависимость напряжения  $U$  от расхода газа  $Q$  ( $U \sim Q^{0,2}$ ); уменьшение пульсаций параметров дуги и потока плазмы [5, 8].

#### **Объект, цель и задачи исследования**

Качественные и количественные характеристики упрочнения, а также ресурс работы плазмотронов в значительной степени зависят от обеспечения требуемого внутреннего охлаждения. Общеизвестно, что при недостаточном охлаждении плазмотрона возможен быстрый его выход из строя из-за оплавления электродных узлов и изолирующих прокладок. А чрезмерное охлаждение может привести к снижению термического КПД плазменной обработки. Общие принципы расчетов систем охлаждения плазмотронов приведены в работах [5, 8]. Однако для плазмотронов принятой схемы методики расчета системы охлаждения в литературе отсутствуют.

#### **Материалы и методы исследования**

При охлаждении потоком воды нагретое тело за счет теплопередачи нагревает воду. В разрезе, где температура воды достигает кипения, на стенках начнут образовываться пузырьки пара. Такой режим кипения получил название пузырькового, и он соответствует максимальной теплопередаче. Вниз по потоку количество пузырьков непрерывно увеличивается и за каким-то сечением вся стенка оказывается покрытой паровой пленкой. Для этого режима коэффициент теплоотдачи существенно ниже предыдущего, что приводит к повышению температуры стенки. Наступает кризис кипения или при рассмотрении ситуации с точки зрения охлаждения кризис теплопередачи.

Увеличение плотности теплового потока от стенки к воде приводит к тому, что паровая пленка начинает образовываться раньше среднемассовой температуры жидкости достигнет температуры кипения. Таким образом, чем



выше плотность теплового потока, тем раньше наступит кризис охлаждения при прочих равных условиях.

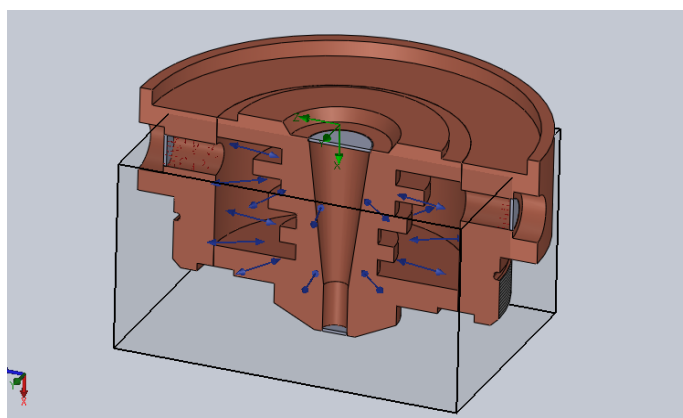
В плазмотроне косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой основная тепловая нагрузка приходится на сопло, которое не только выступает в роли анода, но и осуществляет сжатие плазменной струи, повышая плотность тепловой энергии. Неправильный выбор режимов охлаждения приводит к чрезмерной эрозии внутреннего канала сопла, преждевременной выработке и выходу из строя.

Длина эродированной зоны в гладком цилиндрическом канале определяется крупномасштабным шунтированием. Исходя из экспериментальных данных [8] при работе в диапазоне токов от 100 до 600 А и расхода газа  $1 - 70 \times 10^{-3} \text{ кг/с}$  она равна 3 – 5 d. Форму эрозионной поверхности электрода для простоты расчета можно представить в виде разностороннего треугольника, основание которого равно размаху крупномасштабного шунтирования, а высота допустимой (из прочностных соображений) выработке толщины стенки электрода.

Общепринятым методом увеличения эффективности охлаждения деталей является увеличение площади контакта с охлаждающей жидкостью за счет формирования дополнительных технологических ребер. Это позволяет избежать увеличения расхода охлаждающей жидкости и, таким образом, снизить вероятность образования турбулентных потоков снижающих эффективность охлаждения.

Для определения оптимальных, с точки зрения эффективности охлаждения, геометрических параметров сопла целесообразно на этапе проектирования проводить конечно-элементное моделирование распределения потоков охлаждающей жидкости.

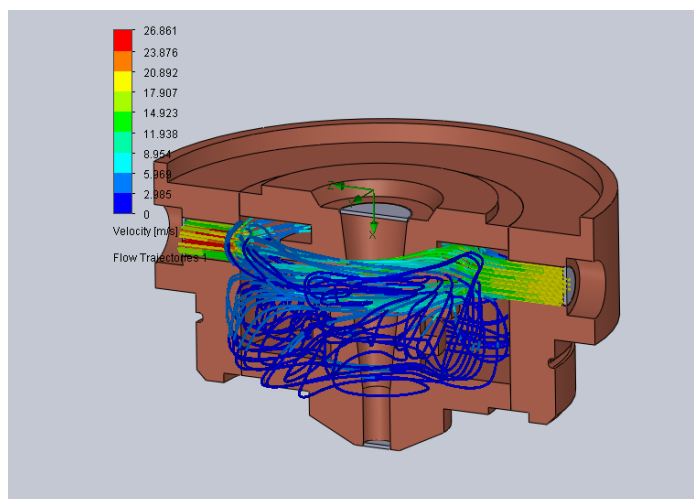
Твердотельная модель сопла в сборе с корпусом представлена на рисунке 1



**Рисунок 1. Сопло плазмотрона косвенного действия**

Задавая расход охлаждающей среды и параметры давления производится расчет траекторий и скоростей потоков по трем координатным осям. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

Расчет показывает, что в области, прилегающей в наружной поверхности сопла скорости потока не превышают критического значения. Режим течения носит характер ламинарного, что позволяет избежать кавитационных явлений.



**Рисунок 2. Результаты расчета траекторий и скоростей потоков охлаждающей жидкости**

Однако распределение потоков не является оптимальным. Ребра охлаждения выступают в роли своеобразного канала, препятствующего смешению слоев жидкости. Основной объем воды проходит в верхней части сопла, в то время как в нижней части сопла скорость потока минимальна, что может привести к снижению эффективности охлаждения.

#### **Заключение и выводы.**

Качественные и количественные характеристики упрочнения, а также ресурс работы плазмотронов в значительной степени зависят от обеспечения требуемого внутреннего охлаждения. Основные тепловые нагрузки приходятся на сопло, вызывая его эрозию. Правильный выбор параметров охлаждения является основным фактором, влияющим на его работоспособность.

Применение конечно-элементного моделирования процессов охлаждения на стадии расчетов и проектирования плазмотрона позволяет учитывать влияние геометрии охлаждаемой поверхности на формирование и распределение потоков и их скоростей.

#### **Литература:**

1. Молотилов Б.В. Нанотехнологии – новое направление в прецизионной металлургии // *Сталь*. – 2005. – №1. – С. 97 – 100.
2. Наноматериалы и нанотехнологии / А.А. Лебцева, К.З. Гордашник, Е.М. Чистяков, В.Н. Кулаковский, Н.Н. Матвиенко // *Инструментальный світ*. – 2005. – №3. – С. 28–31 (ч.1); 2006. – №1. – С. 4–8 (ч.2); 2006. – №4. – С. 29 – 33 (ч. 3).
3. Упрочнение рабочих поверхностей чугуновых деталей автомобилей методом плазменного оплавления / Н.С. Шепелев, М.В.Селиванов, И.С. Чепыжев, С.И. Витвичкий, И.Л. Костюк, Н.С. Ломоносов, В.А. Новосельцев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1998. – № 12. – С 34 – 36.
4. Исследование процессов микроплазменной закалки сталей / Е.Г. Гинзбург, О.С. Кобяков, М.А. Геллер и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1988. - №5. – С. 40 – 44.
5. Даутов Г.Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими



дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Корп. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с.

6. Дзюба В.Л. Фізика, техніка та застосування низькотемпературної плазми: монографія / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 448 с.

7. Самотугін С.С. Оптимизация конструкции плазмотрона для поверхностной модификации стальных изделий. / С.С.Самотугін, В.О.Гагарін, В.О.Мазур // Вісник Приазовського державного технічного університету. серія: Технічні науки. – 2017. – вип. 35. – С. 104 – 109.

8. Литвинов В.К. Электродуговые, топливнодуговые нагреватели газа и электродуговые горелки / В.К. Литвинов, О.И. Ясько – Свердловск: УПИ, 1982. – 84 с.

### References.

1. Molotilov BV Nanotechnology - a new direction in precision metallurgy // Steel. - 2005. - №1. - P. 97 - 100.

2. Nanomaterials and nanotechnologies / A.A. Lebtseva, K.З. Gordashnik, E.M. Chystiakov, B.H. Kulakovsky, H.H. Matvienko // Instrumental world. - 2005. - №3. - P. 28 - 31 (part 1); 2006. - №1. - P. 4 - 8 (part 2); 2006. - №4. - P. 29 - 33 (part 3).

3. Strengthening of working surfaces of pig-iron details of cars by a method of plasma melting / NS Shepelev, MV Selivanov, IS Chepyzhev, SI Витвичкий, И.Л. Kostyuk, NS Lomonosov, VA Novoseltsev // Metallurgy and heat treatment of metals. - 1998. - № 12. - С 34 - 36.

4. Investigation of microplasma hardening processes of steels / E.G. Ginzburg, O.S. Kobayakov, MA Geller et al. // Metallurgy and heat treatment of metals. - 1988. - №5. - P. 40 - 44.

5. Dautov G.Yu. Plasmatrons with stabilized electric arcs / G.Yu. Dautov, V.L. Dziuba, I.N. Corp. - К.: Scientific thought, 1984. - 168 с.

6. Dziuba VL Physics, technique and application of low-temperature plasma: monograph / V.L. Dziuba, K.A. Korsunov. - Luhansk: SNU Publishing House. V. Dalya, 2007. - 448 p.

7. Samotugin SS Optimization of plasmatron design for surface modification of steel products. / SS Samotugin, VO Gagarin, VO Mazur // Bulletin of the Azov State Technical University. series: Technical sciences. - 2017. - issue. 35. - P. 104 - 109.

8. Litvinov V.K. Electric arc, fuel arc gas heaters and electric arc burners / V.K. Litvinov, O.I. Yasko - Sverdlovsk: UPI, 1982. - 84 p.

**Abstract.** The work is devoted to the issues of improving and optimizing the cooling system of the indirect action plasma torch nozzle. The qualitative and quantitative characteristics of hardening, as well as the service life of plasma torches largely depend on the provision of the required internal cooling. The main heat loads fall on the nozzle, causing its erosion. The correct choice of cooling parameters is the main factor influencing its operability. The criteria for optimizing the cooling system are defined in the paper. The application of finite-element modeling of cooling processes at the stage of calculations and design of the plasma torch allows to take into account the influence of the geometry of the cooled surface on the formation and distribution of flows and their velocities.

**Keywords:** nozzle, heating, cooling, efficiency, model, element, velocity, flow, turbulence

Статья отправлена: 12.11.2021 г.

© Мазур В.А.