

УДК 621.365.29

к.т.н. Мурга В. В.,
Грищенко Е. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМОТРОНОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований КПД электродуговых плазмотронов и плазмотрона с жидким электродом. Предложена методика оценки теплового поля плазмотрона с жидким электродом на основании дифференциальных уравнений. Получены количественные оценки теплового КПД различных плазмотронов и предложены рекомендации по применению плазмотронов с жидким электродом для промышленного использования.

Ключевые слова: электродуговые плазмотроны, электролитный нагрев, плазмотрон с жидким электродом, тепловой КПД, энергетическая эффективность.

В настоящее время при термообработке изделий из стали и сплавов прогрессивным направлением является использование низкотемпературной плазмы. Эффективность использования плазменного метода обработки зависит от свойств источника плазмы, т. е. плазмотрона. Наиболее изученными являются электродуговые плазмотроны как универсальные источники нагрева материалов. Однако ресурс таких устройств невелик — от 10 до 500 часов. Одним из перспективных устройств в этом классе термической обработки являются плазмотроны, у которых одним из электродов является жидкость. Такие устройства имеют неограниченный ресурс, просты в эксплуатации и имеют самую низкую себестоимость процесса термообработки. Данная работа посвящена анализу эффективности преобразования электрической энергии в тепловую в плазмотронах различных типов.

Среди всех методов термообработки плазменная отличается рядом преимуществ: достаточно высоким КПД процесса, возможностью ведения процесса без охлаждающих сред, низкой стоимостью, простотой, малыми габаритами оборудования, возможностью роботизации и автоматизации процесса, высокой производительностью [1].

Недостатком термообработки плазмотроном прямого действия является высокая ве-

роятность получения в детали больших термических напряжений, ведущих к развитию дефектов структуры. Это связано с трудностью отвода высокой плотности теплового потока плазмы. В случае с плазмотроном косвенного действия наблюдается резкое снижение общего КПД процесса [2]. Самым очевидным недостатком электродуговых плазмотронов является ресурс работы, который определяется эрозией электродов.

Применять катодный нагрев начали в середине 20 века, однако широкого распространения этот способ не получил ввиду сложности формирования разряда в парогазовой оболочке.

Разряд представляет собой множественный искровой нестационарный канал (рис. 1). Образующаяся плазма существенно неравновесная. Температура электронной и ионной составляющей отличается в разы. Однако внимание привлекает простота реализации процесса нагрева деталей и большой ресурс. На рисунке 2 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) плазмотрона с жидким катодом, полученная в ходе эксперимента со стальным образцом. ВАХ имеет условный падающий участок, соответствующий образованию парогазовой оболочки.

На основе источников [2, 3] можно сопоставить значения основных параметров процесса упрочнения (см. таблицу 1).

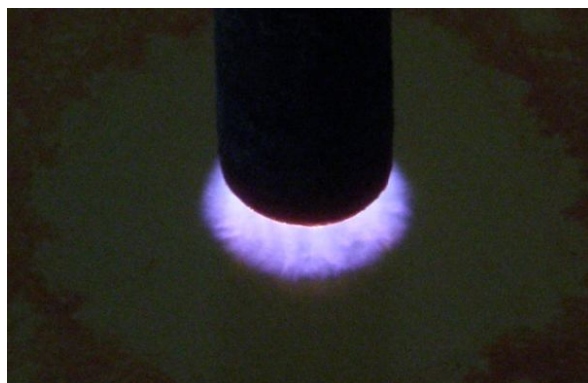


Рисунок 1 Разряд между обрабатываемой деталью и жидким катодом

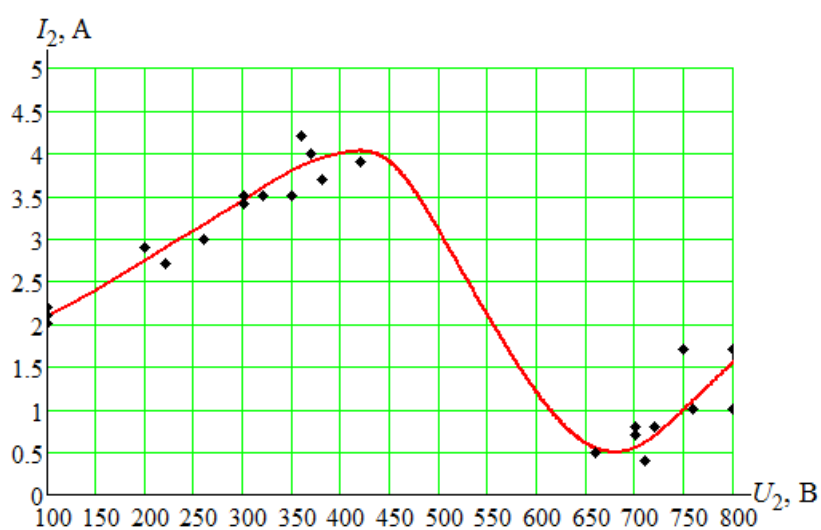


Рисунок 2 Вольт-амперная характеристика плазмотрона с жидким катодом

Таблица 1

Параметры процесса плазменного поверхностного упрочнения

Тип плазмотрона	Электродуговой прямого действия	Электродуговой косвенного действия	С жидким катодом
Пределы силы тока, А	100...350	100...250	до 10–15
Среднее значение силы тока, А	~170	~150	~9
Скорость перемещения плазмотрона, см/с	3...4	0,3...0,5	–
Глубина закалённого слоя, мм	0,8...1,2	1,5...1,8	1...10
Эффективный КПД нагрева поверхности	0,6...0,75	0,1...0,5	Нет данных
Твёрдость поверхности закалённого слоя, HRC	55...60	45...50	62...65

Как видно из таблицы 1, применение плазмотрона с жидким катодом для процесса упрочнения поверхности имеет преимущества в максимальной глубине и твёрдости упрочнённого слоя.

Сравнительный анализ эффективности плазмотронов проводился для плазмотронов трёх конструкций:

- электродугового плазмотрона постоянного тока прямого действия;
- электродугового плазмотрона постоянного тока косвенного действия;
- плазмотрона с жидким катодом.

Для определения общего КПД процесса принимались во внимание: температура генерируемой плазмы, размеры области термического воздействия, а также тепловой КПД плазмотронов. Количественные оценки КПД основывались на анализе вольт-амперных характеристик плазмотронов. Параметры электродуговых генераторов плазмы можно определить, используя методику расчёта [5].

Все три плазмотрона создают неравномерное температурное поле в зоне обработки, поэтому качество всего процесса можно оценить, определив градиенты температуры на поверхности металла (горизонтальные градиенты температур).

Для оценки зоны нагрева было исследовано распределение температуры в детали на основе решения уравнения теплопроводности в пределах зоны обработки (рис. 3).

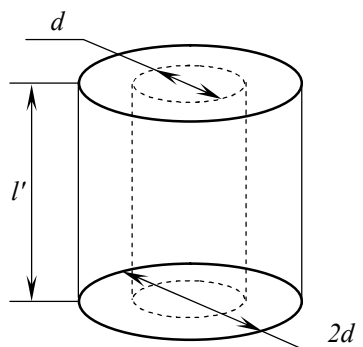


Рисунок 3 Обозначение зоны обработки: максимального (пунктир) и высокого (сплошная линия) теплового воздействия

На рисунке 3 показаны области термического воздействия:

- область максимального теплового воздействия в пределах одного диаметра сопла плазмотрона;
- область высокого теплового воздействия в пределах двух диаметров сопла.

Подобная оценка справедлива для электродуговых плазмотронов прямого и косвенного действия.

Используя данные таблицы 1, можно рассчитать энергетические параметры плазмотронов прямого и косвенного действия. Для расчёта плазмотрона прямого действия составляется система из следующих уравнений [4, 5]:

$$U = 1290 \left(\frac{I^2}{G \cdot d} \right)^{-0,15} \left(\frac{G}{d} \right)^{0,3} (p \cdot d)^{0,25}; \quad (1)$$

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I^2}{G \cdot d} \right)^{0,27} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,27} \times \\ \times (p \cdot d)^{0,3} \left(\frac{l}{d} \right)^{0,5}; \quad (2)$$

$$I = \varepsilon_I \cdot 100(10^3 d - 1); \quad (3)$$

$$U \cdot I \cdot \eta = G(h - h_H), \quad (4)$$

где U и I — напряжение и сила тока дуги; G — расход плазмообразующего газа (кг/с); η — тепловой КПД плазмотрона; p — давление газа на выходе из плазмотрона; h , h_H — удельные энтальпии газа на выходе из плазмотрона и на входе соответственно; d — диаметр сопла плазмотрона; l — максимальная длина дуги; ε_I — коэффициент занижения по силе тока. Уравнение (3) является условием отсутствия двойного дугообразования (привязки дуги к соплу).

Расчёт плазмотрона косвенного действия производится на основе следующей системы уравнений [4]:

$$U = 4,55 \left(1 + 4,6 \cdot 10^{-7} \frac{I}{d_2} \right) \left(\frac{G}{d_2} \right)^{0,22 \frac{2}{5}} \times \\ \times (p \cdot d)^{0,23} \left(\frac{l_2}{d_2} \right)^{0,95}; \quad (5)$$

$$U = \varepsilon_U \cdot 1290 \left(\frac{I^2}{G \cdot d_2} \right)^{-0,15} \times \\ \times \left(\frac{G}{d_2} \right)^{0,3} (p \cdot d_2)^{0,25}; \quad (6)$$

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I^2}{G \cdot d_2} \right)^{0,27} \left(\frac{G}{d_2} \right)^{-0,27} \times \\ \times (p \cdot d_2)^{0,3} \left(\frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3} \right)^{0,5}; \quad (7)$$

$$U \cdot I \cdot \eta = G(h - h_n), \quad (8)$$

где d_2, l_2 — диаметр и длина разрядного канала до уступа соответственно; d_3, l_3 — диаметр и длина разрядного канала после уступа соответственно; ε_U — коэффициент занижения напряжения; он учитывает, что длина дуги в плазмотроне с уступом меньше длины самоустанавливающейся дуги.

Тепловой КПД процесса оценивался по полезной мощности процесса:

$$\eta_{эф} = 1 - \frac{P_{изл} + P_{конв}}{P_{пл}}, \quad (9)$$

где $P_{изл}$ и $P_{конв}$ — мощности, затрачиваемые на излучательные и конвективные потери соответственно; $P_{пл}$ — полезная мощность плазмотрона.

Мощность потерь на излучение определяется согласно закону Стефана-Больцмана:

$$P_{изл} = \sigma T^4 S. \quad (10)$$

Мощность потерь на конвекцию оценивается согласно закону Фурье:

$$P_{конв} = \alpha(T) \cdot gradT \cdot S', \quad (11)$$

где $\alpha(T)$ — коэффициент теплопроводности среды, зависящий от температуры; $gradT$ — температурный градиент в среде; S' — характерная площадь, через которую происходит конвекция.

В случае с плазмотроном с жидким катодом необходимо учесть потери на нагрев и испарения воды:

$$P_{в} = \frac{\rho V}{\tau} (c_{уд} (T_{кип} - T) + r_{уд}), \quad (12)$$

где ρ и V — соответственно плотность и объем воды; τ — время, за которое нагревается и закипает данный объем воды; $c_{уд}$ и $r_{уд}$ — удельная теплоёмкость и теплота парообразования воды.

При расчёте проводилось усреднение температуры в требуемой области обработки. Считается, что большая часть частиц среды отдаёт тепло обрабатываемой детали; в частности, для плазмотрона с жидким катодом предполагается, что из-за интенсивного вскипания поверхности электролита в зоне теплового воздействия и нагрева анода в конвективных потерях участвует незначительная часть (не более 10 %) всех молекул воды.

Для плазмотрона с жидким катодом использовано предположение о том, что основные конвективные потери идут в раствор электролита, а не в окружающую деталь газовую атмосферу. При этом конвекция происходит в основном через сечение распределённого искрового разряда; данное сечение меньше площади активной области.

При упрощённой оценке качества термообработки достаточно знать температурное распределение на поверхности стальной детали. Для нахождения аналитического выражения распределения температурного поля в зоне обработки было решено уравнение (13) в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \left[\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right] + a^2 \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right], \quad (13)$$

где $U(r, \phi, z, t)$ — температура (как функция координат и времени); a — коэффициент температуропроводности, зависящий от свойств среды.

Согласно [5] коэффициент a равен:

$$a = \sqrt{\frac{\alpha}{c\rho}}, \quad (14)$$

где α и c — теплопроводность и удельная теплоёмкость среды соответственно; ρ — плотность тела (среды).

Рассмотрим стационарное температурное поле с известными краевыми условиями. При этом получим уравнение Лапласа, в котором левая часть равна нулю. В силу осевой симметрии теплового потока из сопла плазмотрона (или через парогазовую оболочку) уравнение (13) также не будет зависеть от координаты ϕ . Тогда получим:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (15)$$

Предположим, что на исследуемое тело за чрезвычайно короткое время воздействуют мощным тепловым источником. При стационарном распределении температуры получена упрощенная качественная картина температурного поля. Граничные условия для этого случая примут вид:

$$U(0,0) = T_{\text{пл}}; U(D,z) = T_{\text{к}}; U(0,L) = T_{\text{м}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{пл}}$ — температура генерируемой плазмы; $T_{\text{к}}$ — температура воздушной среды (комнатная); $T_{\text{м}}$ — температура плавления металла на поверхности детали; D, L — характерный радиус и высота зоны обработки соответственно.

ГУ (16) для решения уравнения (15) достаточно, если считать, что характер распределения вдоль оси z не меняется: максимум

в центре и комнатная температура по краю. Уравнение (13) является однородным (не содержит функций тепловых источников) и решается в данном виде только для однородных граничных условий:

$$\left. \frac{\partial R}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; R(D) = T_{\text{к}} - T_{\text{к}} = 0. \quad (17)$$

Уравнение (15) было решено методом Фурье:

$$\begin{aligned} U(r,z) &= R(r)Z(z) \Rightarrow \\ &\Rightarrow Z \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + Z \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + R \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0; \\ &\Rightarrow \frac{1}{R} \left(\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + \lambda^2 Z = 0 \Rightarrow Z = C_1 e^{-kz} + C_2 e^{kz} \Rightarrow \\ &\Rightarrow k^2 + \lambda^2 = 0 \Rightarrow k = \pm i\lambda \Rightarrow \\ &\Rightarrow Z(z) = C_1 \cos \lambda z + C_2 \sin \lambda z; \\ &\frac{\partial^2 R}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \lambda^2 R = 0 \Rightarrow R(r) = J_0(\lambda r), \end{aligned}$$

где λ — собственные числа соответствующей функции; $J_0(\lambda r)$ — функция Бесселя нулевого порядка первого рода [5].

В ходе вывода оказалось, что λ должны быть одинаковыми и для $Z(z)$ и для $R(r)$. Учитывая их разную периодичность, для правильного решения определим λ через ГУ для $J_0(\lambda r)$.

Используя ГУ (17), выразим функцию R , а через неё — λ :

$$R(r) = J_0 \left(\frac{\mu_n}{D} r \right) \Rightarrow \lambda = \frac{\mu_n}{D}, \quad (18)$$

где μ_n — «ноль» функции Бесселя J_0 .

Неизвестные коэффициенты можно будет найти, подставив ГУ для $r=0$. Тогда распределение температуры для нашей задачи примет вид:

$$U(r, z) = \left[C_1 \cos\left(\frac{\mu_1 z}{D}\right) + C_2 \sin\left(\frac{\mu_1 z}{D}\right) \right] \times J_0\left(\frac{\mu_1 r}{D}\right) + T_k. \quad (19)$$

На основании решения уравнения (19) были получены распределения теплового поля для различных плазмотронов (рис. 4–5).

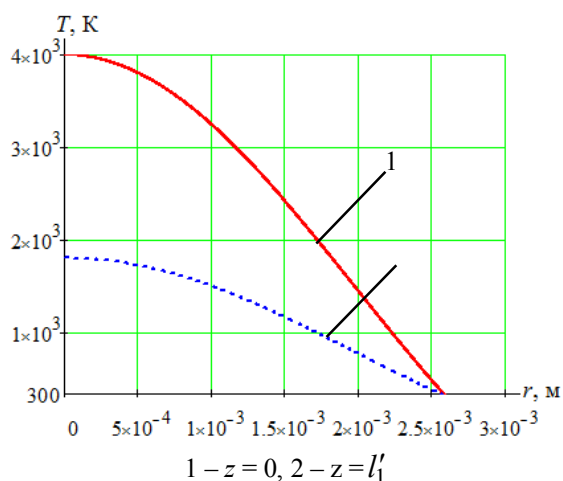


Рисунок 4 Температурное поле плазмотрона прямого действия

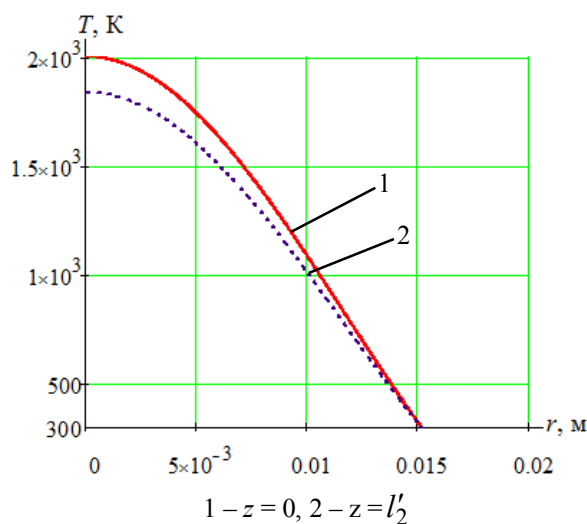


Рисунок 5 Температурное поле плазмотрона косвенного действия

Предполагая, что внутри парогазовой оболочки температура постоянна, получили распределение температурного поля, создаваемого в плазмотроне с жидким катодом (рис. 6).

Размер зоны, в которой будет наблюдаться изменение структуры стали при обработке, ограничена температурой 1000 К (727° С). Вычисленные параметры процесса нагрева для различных плазмотронов приведены в таблице 2. Как видно из таблицы 2, нагрев металла плазмотроном с жидким катодом и плазмотроном прямого действия имеет близкий КПД. Наибольший тепловой КПД отмечен у плазмотрона с жидким катодом. Другие показатели (температурный градиент, размеры зон нагрева) у данного плазмотрона имеют промежуточное значение.

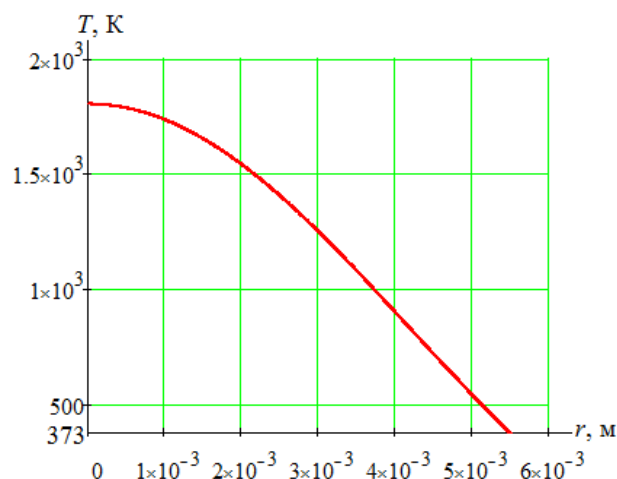


Рисунок 6 Температурное поле плазмотрона с жидким катодом

Нагрев в электролите обеспечивает малую протяжённость области нагрева (2 мм). За счёт этого температура на таком промежутке меняется не так значительно, как у электродуговых плазмотронов. Выгодным преимуществом плазмотрона с жидким катодом являются меньшие затраты мощности, почти на порядок (2 кВт).

Выводы. При использовании плазмотрона с жидким электродом имеет значение направление тока. Результаты эксперимента указывают, что процесс нагрева металла в электролите-катоде является более стабильным, чем нагрев в электролите-аноде. В первом случае разряд зажигается при меньшей силе тока и меньшем напряжении, наблюдается меньшее вскипание электролита.

Согласно результатам расчётов эффективного КПД нагрева, у плазмотрона с жидким электродом данный показатель

(0,41) находится между значениями КПД нагрева плазмотрона прямого (0,44) и косвенного (0,32) действия.

Таблица 2

Энергетические характеристики нагрева

металла	Электродуговой прямого действия	Электродуговой косвенного действия	С жидким катодом
Полезная мощность, кВт	22,16	9,9	2
Тепловой КПД плазмотрона	0,74	0,81	0,95
КПД теплопередачи	0,6	0,4	0,41
Эффективный КПД преобразования энергии	0,44	0,32	0,41
Горизонтальный температурный градиент, К/м	$5,77 \cdot 10^5$	$9,87 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^5$
Продольный размер зоны теплового воздействия, мм	5	10	2 (парогазовая оболочка)
Радиус зоны теплового действия (выше 300 К), мм	2,6	15,2	5,7
Радиус зоны термоупрочнения (выше 1000 К), мм	1,7	10,1	3,7

При этом плазмотрон косвенного действия обеспечивает температурное поле на поверхности металла с меньшими перепадами, имеет самый высокий тепловой КПД (0,95), средние размеры зоны теплового воздействия. Явным преимуществом плазмотрона с жидким электродом является практически неограниченный ресурс рабо-

ты и сравнительно малая электрическая мощность, вкладываемая в разряд.

В операции поверхностного термоупрочнения металла в электролите следует отдавать предпочтение анодному нагреву (анодом является деталь) из-за более стабильного протекания нагрева и меньшей затрачиваемой мощности.

Библиографический список

1. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учебное пособие [Текст] / Т. Ю. Степанова // Иван. гос. хим.-технол. ун-т. — Иваново, 2009. — 64 с.
2. Мурга, В. В. Изменения микроструктуры стали при обработке в плазмотроне с жидким катодом [Текст] / В. В. Мурга, И. И. Антропов, Д. К. Гамазин, А. Алкиб // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — № 1 (42). — С. 152–156.
3. Мурга, В. В. Обработка стальных изделий неравновесной плазмой в водной среде [Текст] / В. В. Мурга, И. И. Антропов, Д. К. Гамазин // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — № 43. — С. 118–121.
4. Мурга, В. В. Использование плазмотрона с жидким электролитным катодом для упрочнения поверхности материалов [Текст] / В. В. Мурга, Дж. Омеман, И. И. Антропов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — № 34. — С. 383–388.
5. Основы расчета плазмотронов линейной схемы [Текст] / Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск, 1979. — 146 с.

© Мурга В. В.

© Грищенко Е. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
д.т.н., проф., зав. каф. ФиХ ЛНУ им. В. Даля Корсуновым К. А.*

Статья поступила в редакцию 28.06.17.

к.т.н. Мурга В. В., Грищенко Є. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАЗМОТРОНІВ РІЗНИХ ТИПІВ

Наведено результати експериментальних досліджень ККД електродугових плазмотронів і плазмотрона з рідким електродом. Запропоновано методу оцінки теплового поля плазмотрона з рідким електродом на підставі диференціальних рівнянь. Отримано кількісні оцінки теплового ККД різних плазмотронів та запропоновано рекомендації щодо застосування плазмотронів з рідким електродом для промислового використання.

Ключові слова: електродугові плазмотрони, електролітний нагрів, плазмотрон з рідким електродом, тепловий ККД, енергетична ефективність.

PhD Murga V. V., Grishchenko Eu. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

COMPARATIVE POWER EFFICIENCY ANALYSIS OF VARIOUS TYPES OF PLASMO-TRONS

The experimental results of efficiency coefficient of electric arc plasmotrons and plasmotron with liquid electrode have been given. There has been proposed a method for thermal field assessment for plasmotron with liquid electrode basing on differential equations. The quantitative assessments of heat efficiency coefficient for various plasmotrons have been obtained and the recommendations on applying plasmotrons with liquid electrode for industrial use have been given.

Key words: electric arc plasmotrons, electrolytic heating, plasmotron with liquid electrode, heat efficiency coefficient, power efficiency.