УДК 621.793.74

УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОГО КПД ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов, Е. В Снятков
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия
E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

К прогрессивным методам получения защитных и функциональных покрытий относится широко используемое плазменное напыление, являющееся одним из наиболее универсальных относительно простых методов и позволяющее с высокой производительностью наносить наиболее широкую номенклатуру материалов при незначительном термическом воздействии на различные детали.

Объем мирового рынка технологии плазменного напыления непрерывно растет [1]. Однако существенными недостатками данной технологии являются низкие тепловой и общий КПД процесса. Общий КПД процесса плазменного напыления до сих пор составляет всего лишь 3-8 %, что является его главной практической и научной проблемой, определяющей актуальность её разрешения. Составляющие тепловой эффективности плазменного напыления представлены на рисунке 1.

Решение данной проблемы лежит в изучении процессов энергообмена внутри плазмотрона и в гетерогенной плазменной струе для различных конструктивных параметров плазмотронов при установившихся и динамических процессах плазменного напыления. Динамизация процессов рассматривается одним из эффективных методов их совершенствования. Она может быть осуществлена с помощью мощного акустического или ударно-волнового воздействия на дугу и струю плазмотрона с помощью импульсной модуляции мощности дуги плазмотрона [2]. Однако её использование в процессах плазменного нанесения покрытий сдерживается недостаточной изученностью гидродинамических и тепловых процессов в импульсно-возмущаемой системе "дуга – плазменная струя – напыляемые частицы". Это определяется трудностями экспериментального их исследования и несовершенством применяемых математических моделей.

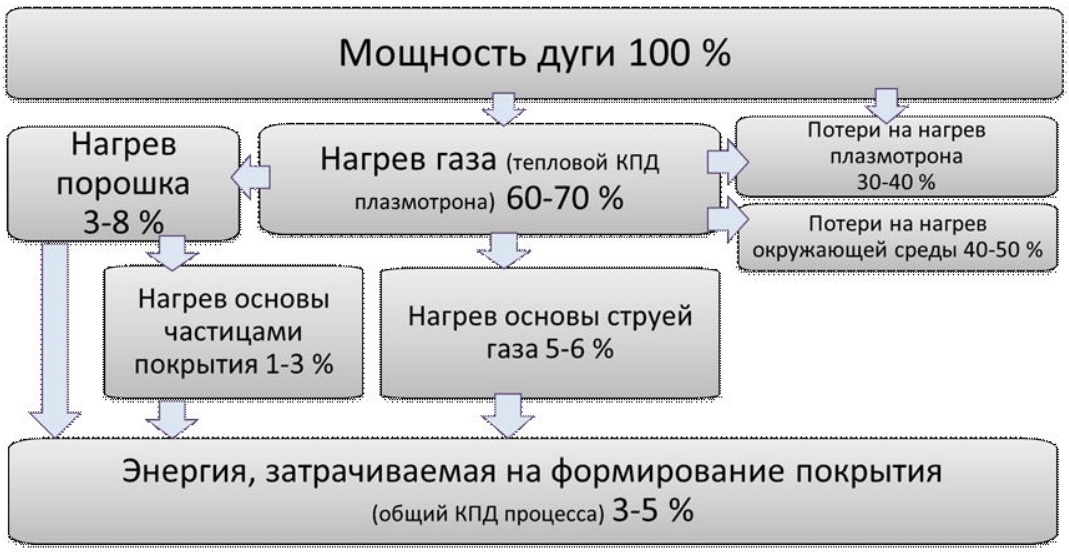


Рисунок 1 – Составляющие тепловой эффективности плазменного напыления

В связи с этим актуальным является исследование закономерностей изменения параметров электрической дуги, плазменной струи и напыляемых частиц при модуляции мощности дуги плазмотрона и их влияние на тепловой и общий КПД плазменного напыления.

Условия повышения теплового КПД электродугового плазмотрона

Энергетическая эффективность плазменного напыления определяется множеством факторов, которые, при прочих равных условиях, в конечном итоге сводятся к конструктивным факторам плазмотрона и энергетическим факторам напыляемых частиц (температурам и скоростям) в момент удара их о подложку [2]. Общая схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий, иллюстрирующая это, представлена на рисунке 2.

Главным требованием к плазмотрону с точки зрения его тепловой эффективности является необходимость нагрева газа до высокой температуры с низкими тепловыми потерями, или, другими словами, с высоким тепловым КПД плазмотрона.

Тепловой КПД плазмотрона η_m представляет собой отношение тепла, уносимого газом из плазмотрона в единицу времени, к мощности дуги $N_д$:

$$\eta_т = 1 - \frac{Q_п}{N_д},$$

$$Q_п = Q_л + Q_к + Q_т,$$

где $Q_п$ – суммарные тепловые потери в элементы плазмотрона; $N_д$ – мощность дуги; $Q_л$, $Q_к$, $Q_т$ – тепловые потери в элементы плазмотрона излучением дуги и нагретого газа, конвективным теплообменом между нагреваемым газом и поверхностями разрядной камеры и теплопроводностью в опорных пятнах дуги соответственно.

Влияние конструктивных факторов плазмотрона на тепловой КПД плазмотрона

Результаты известных исследований показывают следующее. При небольших давлениях в камере горения дуги ($p < 5 \cdot 10^5$ Па) доля лучистого переноса энергии в общем энергетическом балансе дуги пренебрежимо мала. Относительные значения излучаемой мощности заметно зависят от рода газа и диаметра канала. Исключение составляет потери от лучистого излучения в плазмотронах с межэлектродной вставкой, в которых эти потери не превышают 2 %. Роль кондуктивного теплообмена также невелика [4].

Относительные потери тепла в приэлектродных пятнах зависят от напряжения дуги. В большинстве случаев для плазмотронов линейной схемы характерно высокое напряжение дуги, которое значительно превосходит сумму катодного и анодного напряжений. Для низковольтных плазмотронов ($U < 200$ В) пренебрегать этими потерями уже нельзя и они должны учитываться в общем балансе потерь.

С учетом вышеизложенного тепловой КПД плазмотронов линейной схемы в значительной мере определяется конвективным теплопереносом в разрядной камере. Поэтому основным резервом повышения КПД для плазмотронов с самоустанавливающейся и фиксированной уступом длиной дуги – это оптимизация длины выходного электрода.

Эффективным методом снижения тепловых потерь в стенку канала плазмотрона с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) является заградительное охлаждение, т. е. организованный вдув части рабочего газа в пограничный слой через межсекционные щели МЭВ вдоль поверхности стенки (или под углом) с целью ее изоляции от высокотемпературного газового потока. В длинных каналах необходимо применять многощелевую завесу.

Влияние импульсной модуляции мощности плазмотрона не его тепловой ПКД

Импульсная модуляция мощности дугового плазмотрона осуществляется

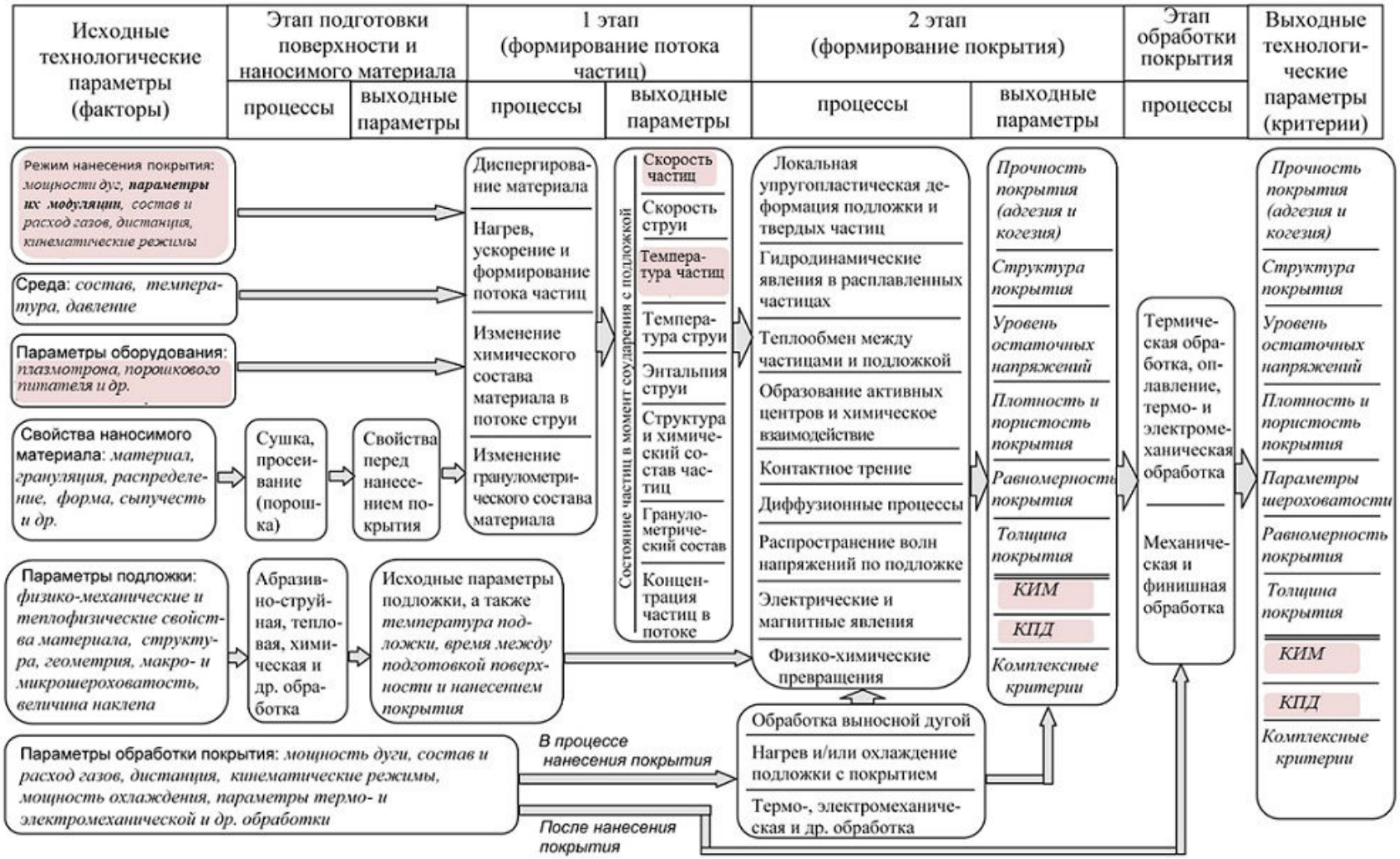
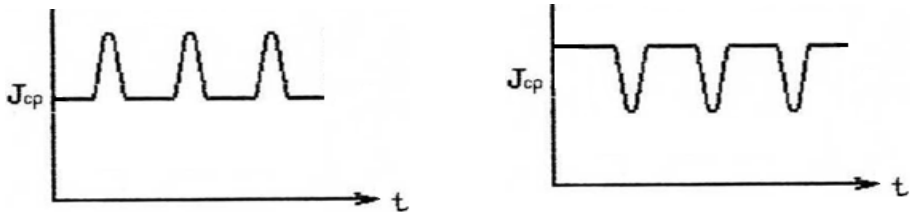


Рисунок 2 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий

с помощью устройств инверторного типа с использованием емкостного накопителя заряда, содержащих тиристорные вентили, балластные сопротивления, дроссели и блоки управления. Формирование каждого импульса (рис. 3) осуществляется открытием тиристоров одной из линий модулятора, после чего заряд, накопленный в емкостях от источника питания постоянного тока, разряжается либо на дугу (импульс прямой полярности), либо на параллельную дуге линию (импульс обратной полярности) [5]. Известные результаты исследований показывают эффективность использования импульсной модуляции мощности дуги на повышение теплового КПД плазмотрона, что подтверждается следующим.



а *б*

t – время, $J_{ср}$ – стационарное значение силы тока

Рисунок 3 – Схемы модуляции тока дуги плазмотрона J импульсами прямой (*а*) и обратной полярности (*б*)

С помощью модуляции параметров плазмотрона можно турбулизовать в нем течение. Это позволит повысить напряженность в дуге на 60-70 % и, благодаря лучшему перемешиванию, среднемассовую энтальпию газа на 20-30 % несмотря на некоторое повышение теплоотвода на охлаждение [6]. Искусственная турбулизация потока увеличивает тепловой КПД плазмотрона вследствие повышения напряжения на дуге [7].

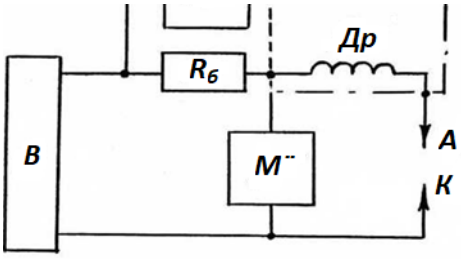
В случае наложения импульсов тока обратной полярности на средний ток дуги ее длина может вырасти в 1,6 раза, среднее напряжение – на 25 %, средняя сила тока – упасть до 40 %, тепловой КПД плазмотрона – увеличиться на 20 % [8].

Модуляция параметров плазмотрона приводит: к генерированию внутри его канала слабых и сильных ударных волн при скоростях нарастания тока в модулирующих импульсах соответственно $\leq 10^8$ А/с и $\sim 10^{10}$ А/с [9]; к повышению среднемассовой энтальпии плазмы (на 20 ... 30 %) и теплового КПД плазмотрона (на величину до 20 %).

Результаты экспериментальных исследований электрических пара-

метров плазмотрона при импульсной модуляции его мощности

При подключении модулятора M^+ параллельно балластному сопротивлению $R_б$ непосредственно к аноду миную дроссель по схеме № 2 (рис. 4) динамические характеристики системы "модулятор M^+ – дуга" не зависят от дросселя $Д_р$. В этом случае после импульсов происходит быстро затухающий апериодический переходной процесс, модуляторы прямой M^+ и обратной полярности M^- работают устойчиво. Данная схема подключения модуляторов позволяет получать импульсы тока прямой полярности с максимально возможной амплитудой для данного источника питания, равной по силе тока ~ 1,2 кА, и по напряжению ~ 0,5 кВ. Для импульсов обратной полярности амплитуда импульсов составляет (0,8 ... 1,0)·$J_{ср}$ и размах импульсов напряжения – до 120 В при длительностях импульсов тока $\tau^- = 50 ... 70$ мкс.

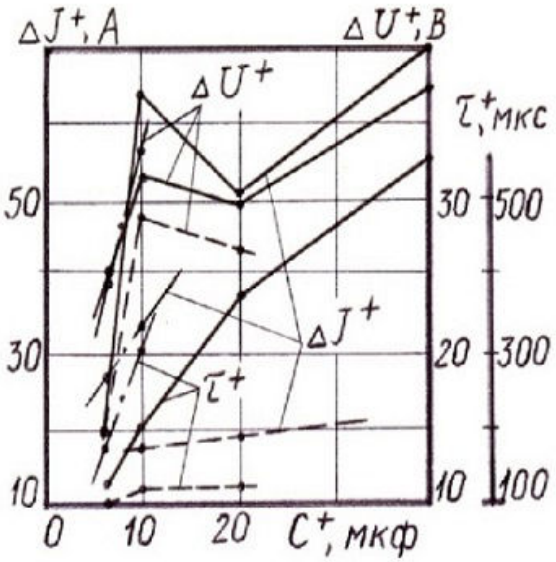


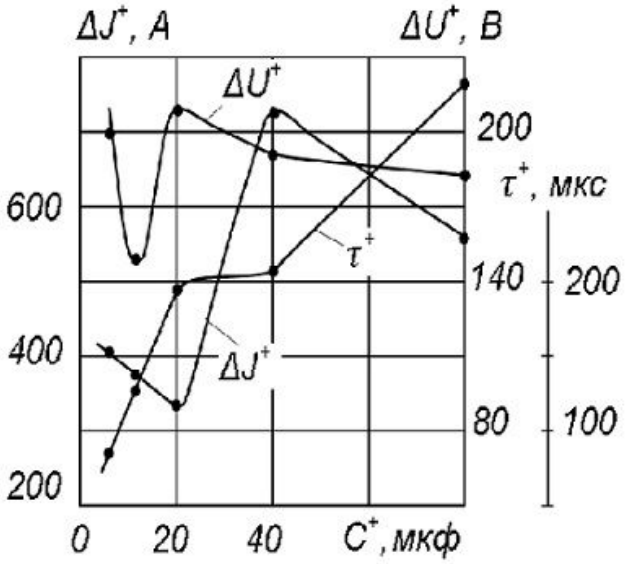
$R_б$ – балластное сопротивление; $Д_р$ – дроссель; $В$ – выпрямитель; $А$ – анод; $К$ – катод;
---- – соединение № 1; – · – · – · – соединение № 2

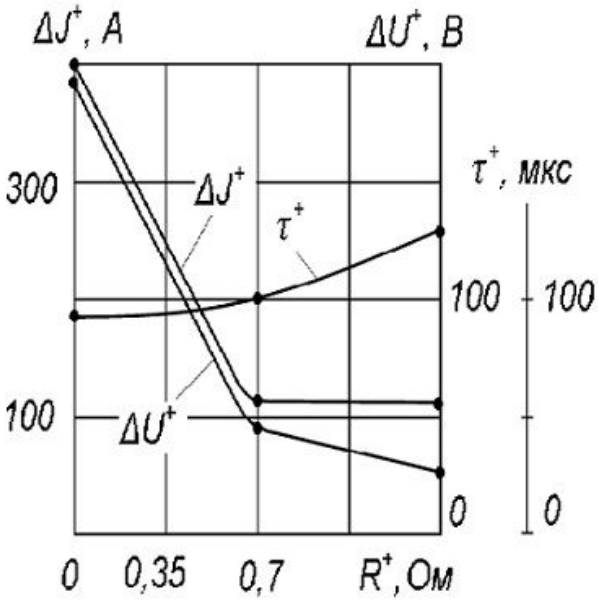
Рисунок 4 – Схемы подключения модуляторов прямой M^+ и обратной M^- полярности к источнику питания дуги

Максимально возможная мощность в импульсе прямой полярности достигает значения 600 кВА при длительностях импульса 200 ... 300 мкс, что соответствует энергии импульса 100 ... 150 Дж (рис. 5). Это не удовлетворяет условию получения сильных ударных волн с числом Маха $M > 1,6$ [9].

Расход плазмообразующего воздуха $O_{возд}$ наибольшее влияние оказывает на длительность τ^+ и амплитуду импульсов прямой полярности ΔJ^+ при $O_{возд} = 70$ л/мин, при этом ΔJ^+ имеет максимум, а амплитуда ΔU^+ – минимум (рис. 6). Влияние расхода воздуха $O_{возд}$ на параметры импульсов вычитания при емкости $C^- = 4$ мкФ, сопротивлении $R^- = 1,308$ Ом модулятора M^- и балластном сопротивлении источника питания дуги $R_б = 3,64$ Ом показывает, что увеличение расхода воздуха $O_{возд}$ в 2,2 раза приводит к росту амплитуд импульсов обратной полярности ΔJ^- в 2,8 раза и к росту размаха пульсаций напряжения δU в 1,6 раза.



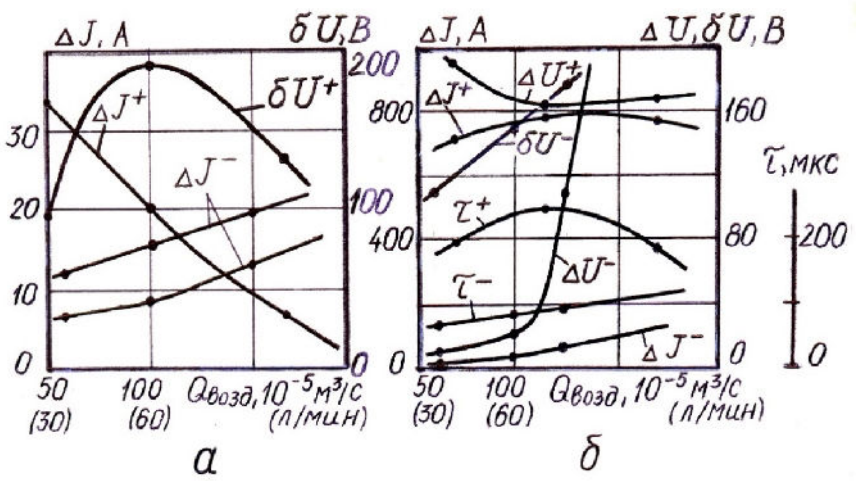




$R_б$ = 3,62 Ом, $L_{дрос}$ = 0,72 мГн; ——, – – – – , – · – · – – соответственно R^+ = 0,175; 0,117; 0, 05 Ом; – · · – · · – – C^+ = 4,71 мкф; *а* – схема соединения № 1 согласно рисунку 4.19 ($Q_{возд}$ = 58·10^{-5} м^3/с); *б, в* – схема соединения № 2 вывода модулятора M^+ от R^+ к аноду ($Q_{возд}$ = 67·10^{-5} м^3/с)

Рисунок 5 – Зависимости амплитуд импульсов силы тока ΔJ^+, напряжения ΔU^+ и длительности импульсов τ^+ прямой полярности от емкости *C*+ и сопротивления R^+ модулятора M^+

В диапазоне частот модуляции $\nu_м$, равном 300 ... 5000 Гц, амплитуда ΔJ^- плавно меняется в пределах 25 %. Резких изменений амплитуды ΔJ^- на узких участках частоты модуляции $\nu_м$ не наблюдалось. Следовательно, резонансных явлений в условиях эксперимента не наблюдалось. Зависимости характеристик импульсов обратной полярности от параметров модулятора M^- показывают, что увеличение емкости C^- и уменьшение сопротивления R^- модулятора M^- ведет к увеличению амплитуды импульса силы тока обратной полярности ΔJ^-. Из этой зависимости следует, что длительность импульса обратной полярности τ^- возрастает при увеличении сопротивления R^- и емкости C^- модулятора M^-.



ΔJ^+, ΔJ^- – амплитуда импульсов силы тока прямой и обратной полярности соответственно; ΔU^+, ΔU^- – амплитуда импульсов напряжения прямой и обратной полярности соответственно, δU – размах пульсаций напряжения; τ^+, τ^- – длительность импульсов силы тока прямой и обратной полярности соответственно; *а* – случай присоединения модуляторов к дросселю № 1 (C^+ = 5,71 мкф, R^+ = 0,35 Ом, C^- = 4 мкф, R^- = 0,35 Ом); *б* – случай присоединения модуляторов непосредственно к аноду № 2 (C^+ = 40 мкф, R^+ = 0,05 Ом, C^- = 4 мкф, R^- = 1,308 Ом)

Рисунок 6 – Зависимость параметров импульсов от расхода воздуха $Q_{возд}$

Увеличение сопротивления R^- модулятора M^- ведет к уменьшению амплитуды импульса силы тока обратной полярности ΔJ^- и увеличению его длительности τ^- при постоянной емкости C^-. Увеличение же емкости C^- модулятора M^- при постоянном сопротивлении R^- приводит к увеличению амплитуды ΔJ^- и длительности τ^-. Анализ зависимостей показывает, что с увеличением сопротивления R^- модулятора M^- с 0,34 до 2,308 Ом амплитуда импульсов напряжения падает с 76 до 16 В при малой емкости C^- = 4 мкФ. При емкостях C^- более 16 мкФ влияние сопротивления становится незначительным – амплитуда ΔU^- находится в интервале 10 ... 16 В. Также незначительно меняется амплитуда ΔU^- при сопротивлениях R^- более ~1,5 Ом.

Результаты определения теплового КПД плазмотрона при импульсной модуляции его мощности

Зависимость теплового КПД плазмотрона от частоты модуляции определялась на основе метода калориметрирования охлаждающей плазмотрон воды. Она представлена на рисунке 7, на котором видно, что по сравнению с немодулированной струей величина теплового КПД плазмотрона может быть увеличена на 15-20 % в интервале частот 280-320 Гц и на 5-10 % – в интервале 1100-1200 Гц. В данном интервале частот наблюдается максимальная энтальпия плазменной струи *H* до 85 ккал/моль. При больших частотах до 4 кГц экстремумов теплового КПД плазмотрона не обнаружено. С повышением расхода плазмообразующего воздуха

от $4 \cdot 10^{-4}$ м^3/с до $7 \cdot 10^{-4}$ м^3/с пики теплового КПД исчезают.

С увеличением частоты модуляции уменьшаются потери на электродах (рис. 8). В частности, с ростом $\nu_м$ до 7 кГц средняя сила тока $J_{ср}$ падает на 40 А, при этом потери мощности на аноде $W_а$ составляют около 7 кВт ($\tau_{имп}$ = 70 мкс). При $\tau_{имп}$ = 20 мкс потери на аноде слабо зависят от частоты модуляции. Чем выше время импульса, тем интенсивнее падают потери на аноде с ростом $\nu_м$. Эти результаты объясняют повышение теплового КПД плазмотрона за счет уменьшения потерь на электродах. Кроме того, снижаются процессы крупномасштабного шунтирования дуги на анод на определенных частотах, что приводит к повышению теплового КПД плазмотрона.

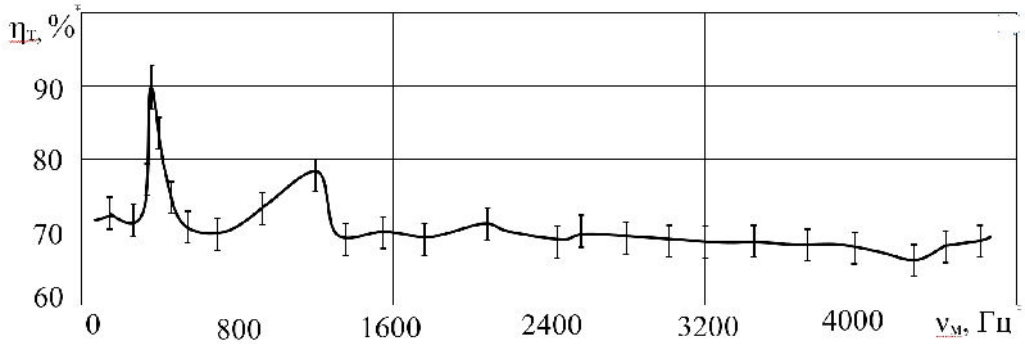
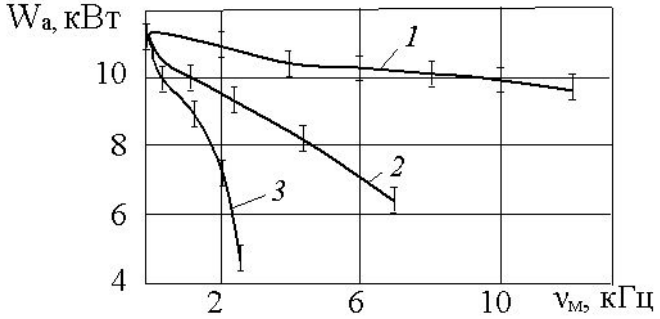


Рисунок 7 – Зависимость теплового КПД плазмотрона η_m от частоты модуляции $\nu_м$



1 – $\tau_{имп}$ = 20 мкс, J = 140 А; *2* – $\tau_{имп}$ = 70 мкс, J = 120 А; *3* – $\tau_{имп}$ = 180 мкс, J = 110 А; Q = 1,3·10-4 м^3/с; Nд = 30 кВт

Рисунок 8 – Зависимость потерь мощности на аноде *W*а от параметров модуляции

Таким образом, по сравнению с немодулированным вариантом дуги тепловой КПД плазмотрона может быть увеличен на 15-20 % (при $\nu_м$ = 280 … 320 Гц). В данном интервале частот наблюдается максимальная энтальпия плазменной струи *H* (85 ккал/моль). С увеличением частоты модуляции уменьшаются потери на электродах на ~ 20 % (на величину до 10 кВт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Коробов, Ю. С. Активированная дуговая металлизация – эффективный метод нанесения защитных покрытий [Электронный ресурс] / Ю. С. Коробов // Энциклопедия технологий ремонта, восстановления и упрочнения 2001-2008 гг. – Электрон. текстовые, граф. дан. и прикладная прогр. (290 МБ). – СПб : НПФ «Плазмацентр», 2008.

2 Кадырметов, А. М. Интенсификация энергообмена в гетерогенной плазменной струе при модуляции электрических параметров процесса плазменного напыления [Текст] / А. М. Кадырметов // Инженерно-физический журнал. – 2013 г. – Т. 86 – № 4. – С. 739-746.

3 Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.

4 Коротеев, А. С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт [Текст] / А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. – М. : Машиностроение, 1993. – 296 с.

5 Рыкалин, Н. Н. Энергетические характеристики дугового плазмотрона в импульсном режиме при модуляции тока [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, А. Н. Леонов // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы : Тр. IV Всесоюз. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1970. С. 500-504.

6 Алешин, Н. Ф. Двухрежимная модель течения в канале с электрической дугой : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Минск, 1987. – 18 с.

7 Амбразявичюс, А. Б. Влияние режима течения газа на пульсации электрических параметров дуги постоянного тока [Текст] / А. Б. Амбразявичюс, Ю. П. Григайтис // VIII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, июль 1980 г. : Тез. докл. : В 3 ч. – Новосибирск, 1980. – № 1. – С. 130-133.

8 Гутман, Б. Е. Влияние модуляции плазменной дуги на некоторые параметры технологии напыления [Текст] / Б. Е. Гутман // Сварочное производство. – 1984. – № 9. – С. 17-19.

9 Минько, Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков [Текст] / Л. Я. Минько. – Минск : Наука и техника, 1970. – 198 с.