

*Брожек Р.Н.,
к.т.н. Сергиенко С.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ПЛАЗМОТРОН НА ПУЛЬСАЦИИ ТОКА И НАГРЕВ ПОРОШКА

У даній статті приведені результати обчислювального експерименту, що показує залежність значень великомасштабних пульсацій струму в плазмотронах вихрової схеми, призначених для напилення і наплавлення, від параметрів ланцюга живлення і їх вплив на нагрів напилюваного або наплавляемого матеріалу.

Ключові слова: *плазмотрон, напил, розрядний канал, катодний вузол, анод.*

В данной статье приведены результаты вычислительного эксперимента, показывающего зависимость значений крупномасштабных пульсаций тока в плазмотронах вихревой схемы, предназначенных для напыления и наплавки, от параметров цепи питания и их влияние на нагрев напыляемого или наплавляемого материала.

Ключевые слова: *плазмотрон, напыление, разрядный канал, катодный узел, анод.*

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. В промышленности наибольшее применение в качестве напыляемых и наплавляемых материалов нашли порошки, которые могут быть приготовлены практически из любых материалов [1, 2]. Для этих целей используют как стандартные порошки с частицами размером 40 – 300 мкм, так и специальные сфероидизированные, с выдержанной в узких пределах грануляцией и с хорошей сыпучестью. Время пребывания частиц в плазме составляет $\sim 10^{-3}$ с и часто оказывается недостаточным для полного плавления на всю глубину частиц материалов с низкой теплопроводностью. Кроме того, немногие из применяемых плазмообразующих газов эффективно передают теплоту нагреваемому порошку [1, 2].

Порошок вместе с транспортирующим газом подают непосредственно или в дугу, или в плазменную струю (в зависимости от конструкции плазмотрона). Под действием сил инерции и газодинамических сил частицы порошка проникают в поток плазмы, нагреваются и ускоряются струей плазмообразующих газов. Образующийся при этом двухфаз-

ный поток, состоящий из плазмы и частиц порошка, распределяемых в плазме, определяет не только их нагрев и ускорение, но и условия формирования покрытия и его толщину.

Особенности нагрева порошка в плазме с учетом [3-10] были учтены при разработке плазмотронов для напыления и наплавки. При этом усовершенствования конструкций плазмотронов в основном направлены на улучшение равномерности распределения порошка в плазменной струе, на увеличение скорости движения частиц порошка, на повышение КПД нагрева порошка и ресурса работы плазмотрона.

Анализ исследований и публикаций. Известно, что серийная аппаратура и плазмотроны для напыления и наплавки имеют следующие недостатки: колебания параметров плазменной струи (дуги), нестабильность положения дуги и её горения, быстрый эрозионный износ электродов [5]. Все это отражается на качестве нагрева порошка и, как следствие, на качестве обрабатываемых изделий (продукции).

Изменения параметров плазменной струи могут быть периодическими и непериодическими. Пульсации, связанные с изменением периодических параметров, происходят с низкой и высокой частотой. Низкочастотные пульсации вредны для процессов порошкового напыления и наплавки, так как они вызывают нестабильность свойств покрытий. Эти пульсации в основном обусловлены источником питания плазмотрона и эрозией электродов. Повышение стойкости электродов и применение источников питания со стабилизацией выходных параметров может существенно повысить качество и стабильность свойств плазменных покрытий.

Установлено, что свойства покрытий можно оценить по трем параметрам – коэффициенту использования порошка β , производительности и пористости полученного покрытия [1, 2, 5]. Эксперименты показали, что процессы напыления и наплавки и свойства их покрытий (показатели качества) зависят от положения дуги и анодного пятна в плазмотроне.

Горение дуги постоянного тока в разрядном канале плазмотрона представляет собой нестационарный процесс. Одна из основных причин этого – нерегулярное изменение длины дуги, возникающее за счет сноса ее радиального участка потоком газа и последующего пробоя между дугой и стенкой канала (шунтирование). Это приводит к возникновению крупномасштабных пульсаций напряжения и тока дуги, частота которых составляет 1...10 кГц, а размах переменной составляющей напряжения может достигать до 50 % его среднего значения.

Постановка задачи. В разработанных плазмотронах для напыления и наплавки горение дуги происходит в потоке с развитой турбулентностью, особенно в той области, где слой газа, прогретого электрической

дугой, смыкается с турбулентным пограничным слоем, нарастающим на стенках канала. При этом возникают большие поперечные пульсации дуги, приводящие к снижению пробивного напряжения, и процесс шунтирования принимает явно выраженный случайный характер.

Это обстоятельство делает затруднительным аналитическое рассмотрение процесса шунтирования, и работы, посвященные его изучению, имеют в основном экспериментальный характер. В то же время очевидна практическая важность задачи уменьшения влияния процесса шунтирования на ток дуги, его стабилизацию и максимального использования энергии плазмы при нагреве порошка. В связи с этим нами предпринята попытка с помощью вычислительного эксперимента исследовать динамику развития крупномасштабных возмущений тока дуги, получить количественные характеристики возмущений тока и рассмотреть возможность оптимального выбора параметров схемы питания с целью уменьшения этих возмущений.

Изложение материала и его результаты. В качестве математической модели принимаем уравнение для пульсаций тока дуги. Рассмотрим математическую модель возмущений тока дуги для типичной схемы питания плазмотрона, представленной на рисунке 1. Схема включает источник питания с напряжением E , балластное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , вклад в значения которых делают также элементы схемы запуска дуги. Наиболее применим способ запуска дуги с помощью осциллятора. Внутреннее сопротивление источника питания считаем равным нулю. Следует отметить, что неуправляемая схема выпрямления источника питания ИПН-160/600 имеет минимальный коэффициент пульсаций. У тиристорных выпрямителей (типа АПР-404, УПР-201) с изменением угла регулирования тиристоров частота пульсаций остается постоянной, амплитуда и коэффициент пульсаций сильно изменяются.

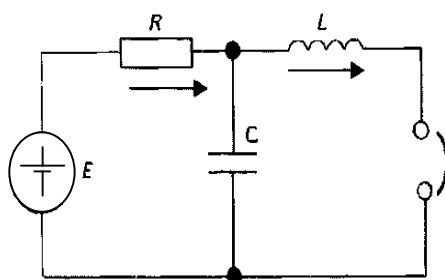


Рисунок 1 – Схема замещения электрической цепи системы источник питания-дуга

С помощью уравнения Кирхгофа определяем связь между током и напряжением на элементах цепи

$$I_e = CU'_c + I_a; U_c = LI'_a + U_a; E = I_e R + U_c,$$

где индексы e , a и C относятся соответственно к источнику питания, дуге и конденсатору. Штрихами обозначены производные по времени.

После преобразований получим

$$I_a'' + \frac{1}{RC} I_a' + \frac{1}{LC} I_a = \frac{E}{RCL} - \frac{U_a}{RCL} - \frac{U_a'}{L}. \quad (1)$$

Величины U_a и I_a связаны вольт-амперной характеристикой дуги. Введем величину:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}, \quad (2)$$

которая имеет смысл собственной частоты колебаний тока дуги в колебательном контуре.

При этом уравнение (1) преобразуем к виду:

$$I_a'' + \frac{\omega^2 L}{R} I_a' + \omega^2 I_a = \frac{\omega^2}{R} E - \frac{\omega^2}{R} U_a - \frac{U_a'}{L}. \quad (3)$$

В модели остаются два независимых параметра схемы питания – ω и L . Их выбор определяет и значение емкости C согласно (2).

Рассмотрим изменение тока i и напряжения u относительно их стационарных значений U_{a0} и I_{a0} , для чего в уравнении (3) сделаем замену:

$$I_a = I_{a0} + i; U_a = U_{a0} + u.$$

Тогда с учетом соотношения, определяющего рабочую точку дуги:

$$E = RI_{a0} + U_{a0},$$

уравнение (3) преобразуем к виду:

$$i'' + \frac{\omega^2 L}{R} i' + \omega^2 i = \frac{\omega^2}{R} u - \frac{u'}{L}, \quad (4)$$

а именно, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка, которое и является основным уравнением математической модели. Для известной зависимости пульсаций напряжения дуги от времени оно позволяет определить пульсации тока.

Отметим, что при выводе уравнения (4) никаких предположений о малости значений, входящих в него величин, не делалось.

Моделирование последовательности импульсов пульсаций напряжения. Из результатов эксперимента известно, что отдельный

импульс пульсаций напряжения, возникающий за счет шунтирования дуги, имеет форму положительного треугольного импульса, время нарастания которого значительно больше, чем спада. Такая форма объясняется тем, что в случае примерно постоянной напряженности электрического поля напряжение на дуге линейно увеличивается с ростом ее длины. Положим, что время нарастания и спада импульса относятся как 9:1.

У плазмотрона с диаметром канала 0.005 м и скоростью расхода газа 0,003 кг/с при токе $I = 110$ А и напряжении $U = 410$ В среднеквадратичное напряжение пульсаций составляет приблизительно 6 %, т.е. около 25 В. Длительность отдельного импульса близка 1 мс.

Импульсы пульсаций образуют непрерывную случайную последовательность, амплитуды в которой распределены по нормальному закону относительно среднего значения напряжения на дуге.

Считаем, что пробой между дугой и стенками канала, шунтирующего дугу, происходит каждый раз в одной и той же точке. Это значит, что напряжение на дуге после каждого скачка возвращается к исходному значению. Относительно него и будем отсчитывать пульсации напряжения.

В этом случае амплитуды импульсов распределяются по нормальному закону со средним значением пульсаций напряжения $\bar{u} = 2\sigma$ и стандартным отклонением σ .

Такое предположение не ограничивает существенно общность модели, сохраняя случайный характер процесса, но приводит к появлению у пульсаций напряжения постоянной составляющей, равной:

$$U_0 = \frac{1}{t} \int_0^t u(t) dt. \quad (5)$$

Для получения переменной составляющей пульсаций напряжения нулевой уровень последовательности импульсов должен быть увеличен на это значение.

Для простейшего варианта моделирования такой последовательности импульсов предположим, что скорость нарастания импульсов остается постоянной (она определяется скоростью сноса дуги потоком газа в канале плазмотрона), а длительность импульсов распределяется по нормальному закону со средним значением $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с и стандартным отклонением σ_τ . При этом амплитуды импульсов также распределяются по нормальному закону со средним значением пульсаций напряжения $\bar{u} = \sigma_\tau$ и стандартным отклонением $\sigma_u = \alpha \sigma_\tau$, где α – скорость нарастания импульса.

Положим среднее значение амплитуды импульса равным удвоенному среднеквадратичному значению пульсаций напряжения $\bar{u} = 50$ В. Тогда скорость нарастания импульса равна:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{0.9\tau} \quad (6)$$

и стандартное отклонение длительности импульсов составит:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_u}{\alpha} = 0.9 \frac{\sigma_u}{u} \tau = 0.45\tau. \quad (7)$$

На рисунке 2, *а* приведен пример полученной таким образом переменной составляющей последовательности из 20 импульсов. Генерация последовательности случайных чисел, распределенных по нормальному закону $N(\tau, 0.54\tau)$, определяющих длительности импульсов в последовательности, и последующие вычисления выполнялись в системе Mathematica 4.

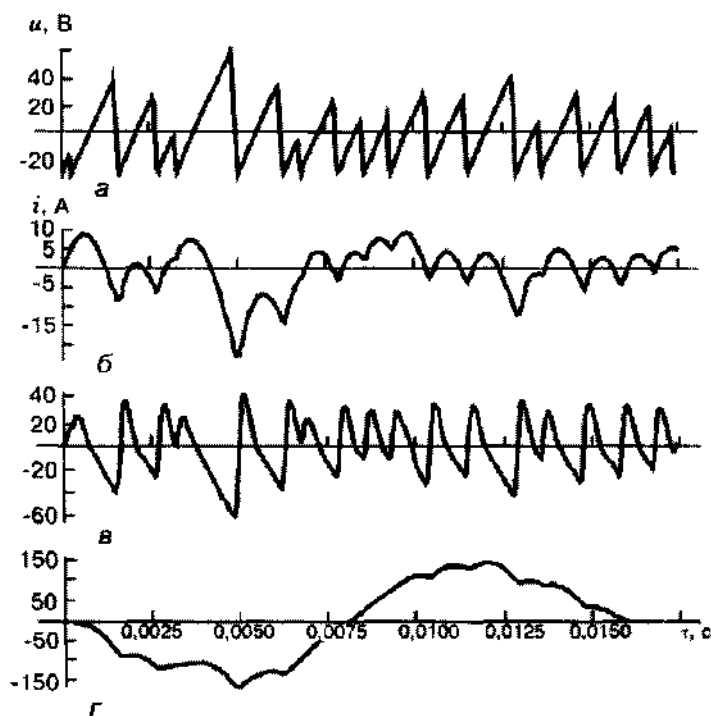


Рисунок 2 – Переменная составляющая случайной последовательности импульсов пульсаций напряжения (*а*) и вызванные ею пульсации тока дуги (*б-г*): *б* – $L = 1.0$ мГн, $\omega\tau = 10.0$; *в* – 0.1 мГн, $\omega\tau = 10.0$; *г* – 0.5 мГн, $\omega\tau = 0,4$

Вычислительный эксперимент. Определение пульсаций тока дуги. Подстановка полученной последовательности импульсов пульса-

ций напряжения в правую часть уравнения (4) и его последующее численное решение позволяет получить зависимости пульсаций тока дуги от времени, подобные тем, которые измеряются в реальном эксперименте.

На рисунке 2, б-г приведены расчеты осциллограмм пульсаций тока дуги при различных значениях индуктивности L и произведения $\omega\tau$ при $R = 1$ Ом (значение $\omega\tau$, равное отношению средней длительности импульса пульсаций τ к обратной собственной частоте системы $\frac{1}{\omega}$, является характерным масштабом временных процессов в системе источник питания-дуга). Из этого примера видна зависимость режима работы этой системы от значений параметров цепи. Значения пульсаций тока увеличиваются с уменьшением индуктивности и $\omega\tau$. В частности, изменение тока, показанное на осциллограмме (рисунок 2, г), приведет к гашению дуги (ток в рабочей точке равен 110 А). В качестве количественной меры значений пульсаций тока было выбрано среднеквадратичное значение его переменной составляющей

$$\Delta i = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i^2(t) dt}, \quad (8)$$

которое, обычно, измеряется в эксперименте.

Для определения зависимости Δi от параметров системы был проведен вычислительный эксперимент. В нем измерялась зависимость среднеквадратичного отклонения тока дуги от $\omega\tau$ при различных значениях индуктивности цепи. Индуктивность изменялась от 0.1 до 1.0 мГн, что соответствует диапазону ее значений в схемах питания плазмотронов, предназначенных для обработки порошков и резки металлов. Длительность последовательности импульсов пульсаций равнялась 30 импульсам. Каждую точку определяли как среднее по результатам двадцати независимых измерений с различными случайными последовательностями импульсов пульсаций напряжения. Стандартное отклонение выборки составляло около 10...20 % его среднего значения.

Кривые на рисунке 3 получены аппроксимацией экспериментальных точек линейной комбинацией экспоненциальной и линейной функций. Диапазон изменения $\omega\tau$ для каждой кривой ограничен снизу условием устойчивости системы по отношению к малым возмущениям:

$$L = RCR^* > 0, \quad (9)$$

где R^* – дифференциальное сопротивление дуги.

Определив значение ω , получим условие для $\omega\tau$:

$$\omega\tau \geq \frac{\tau}{L} \sqrt{RR^*}. \quad (10)$$

Для расчетов были взяты типичные значения $R = 1.0$ Ом и $R^* = 0.8$ Ом.

Обсуждение результатов. Из данных, представленных на рисунке 3, видно, что зависимость Δi от $\omega\tau$ во всех случаях имеет одинаковый характер – с увеличением значения $\omega\tau$ среднее квадратичное отклонение тока уменьшается и выходит примерно на постоянный уровень при фиксированном значении индуктивности.

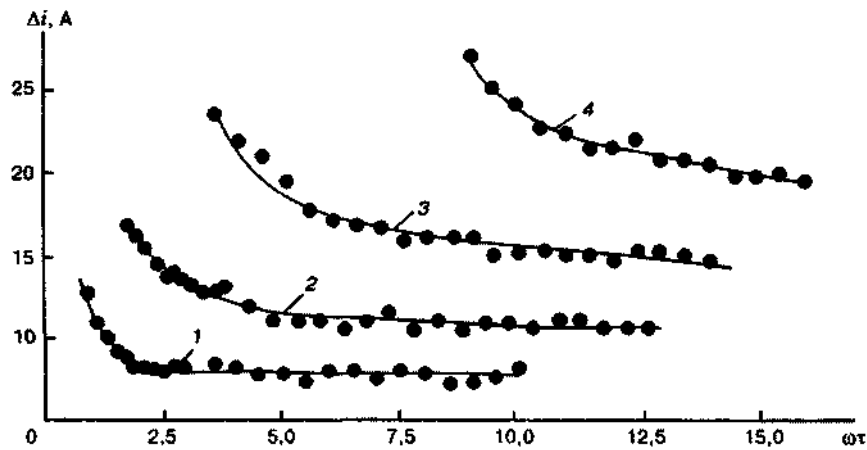


Рисунок 3 – Зависимость среднее квадратичного отклонения тока Δi от $\omega\tau$ для различных значений индуктивности цепи, полученная по результатам вычислительного эксперимента: 1 – $L = 1.00$; 2 – 0.50 ; 3 – 0.25 ; 4 – 0.10 мГн

Система находится в колебательном режиме при выполнении условия:

$$\omega\tau \leq 2\tau \frac{R}{L}. \quad (11)$$

В случае $L = 0.10, 0.25, 0.50$ и 1.00 мГн это дает максимальные значения $\omega\tau$, равные соответственно 20, 8, 4 и 2. Как следует из рисунка 3, значения Δi уменьшаются с ростом $\omega\tau$ при колебательном режиме цепи и достигают своего минимума уже при апериодическом режиме.

Увеличение значения ω приводит к возрастанию коэффициента затухания $\omega^2 L / 2R$, уменьшению амплитуды отдельного импульса возмущения тока и увеличению его длительности. Последующие импульсы накладываются на предыдущие, что способствует увеличению среднего отклонения тока. При апериодическом режиме, по всей видимости, эти два фактора примерно компенсируют друг друга и среднее квадратичное отклонение остается постоянным.

Увеличение среднеквадратичного отклонения при уменьшении индуктивности системы источник питания – дуга можно объяснить, исходя из структуры основного уравнения модели (4). Понижение индуктивности приводит к уменьшению коэффициента затухания, поэтому те же значения коэффициента, что и ранее, будут достигаться при больших значениях ω . При этом значительно возрастет правая часть уравнения (примерно пропорционально ω^2), что и приведет к увеличению возмущения тока дуги.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Следовательно:

1. Значения пульсаций тока дуги в основном зависят от индуктивности системы источник питания-дуга. Увеличение индуктивности "сглаживает" пульсации тока дуги. Нижняя граница значения индуктивности в указанной системе определяется индуктивными элементами схемы запуска дуги. Дополнительно увеличивать индуктивность сложно из-за неизбежного возрастания при этом активного сопротивления схемы и нарушения режима работы запуска дуги.

2. Для уменьшения пульсаций тока дуги при фиксированном значении индуктивности значения емкости должны быть достаточно малыми для выхода зависимости среднеквадратичного отклонения тока Δi от $\omega\tau$ на пологий участок $\omega\tau = \tau/\sqrt{LC}$.

3. Количественная оценка влияния индуктивности на пульсации тока и необходимые для оценки емкости значения $\omega\tau$ можно получить с помощью кривых рисунок 3.

4. Изменение пульсаций тока дуги вызывают колебания энтальпии, скорости и температуры плазменной струи (дуги) с частотами от нескольких герц до килогерц, что способствует увеличению коэффициента теплопередачи плазмы и улучшает нагрев порошка.

Положительное влияние пульсаций на процесс нагрева порошка плазменной струей (дугой) подтверждается также зависимостью коэффициента использования энергии струи от тока дуги, приведенной в [2]. Дальнейшие исследования будут связаны с разработкой технологии плазменного напыления с учетом результатов проведенных исследований.

Библиографический список

1. Кудинов В.В. Плазменные покрытия / В.В. Кудинов – М.: Наука, 1977. – 184 с.
2. Кудинов В.В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В.В. Кудинов, В.М. Иванов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.

3. Дзюба В.Л. Лазерные и электронные пучки в материале обработки / В.Л. Дзюба, И.В. Волков. – Луганск: Ноулидж, 2010. – 332 с.
4. Кудинов В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшеев, В.А. Белащенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
5. Плазменная наплавка / Вайнерман А.Е., Шоршоров М.Х., Веселков В.Д., Новосадов В.С. – Л.: Машиностроение, 1969. – 192 с.
6. Достанко А.П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники в 3-х т. / [Достанко А.П., Кундас С.П., Босьяков М.В. и др.] Том 1. – Мн.: ФУ Аинформ, 2000. – 424 с.
7. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники в 3-х т. / [Достанко А.П., Кундас С.П., Бордусов С.В. и др.]; под общ. ред. Академиков НАН Беларуси Достанко А.П. и Витязя П.А. Том 3. – Мн.: ФУ Аинформ, 2001. – 292 с.
8. Самогугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самогугин, Л.К. Лещинский. – Донецк: Новый мир, 2002. – 338 с.
9. Петров С.В. Аппаратурно-технологические основы газотермического нанесения покрытий и обработки материалов в газовой плазме: дис. доктора техн. наук: 05.03.06 / С.В. Петров. – Киев, 1996. – 398 с.
10. Лясников В.Н. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / В.Н. Лясников, В.С. Украинский, Г.Ф. Богатырев. – Саратов, 1985. – 200 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.