



УДК 621.791.72.03

О НАГРЕВЕ И УСКОРЕНИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМОЙ

Чл.-кор. НАН Украины **М. Л. ЖАДКЕВИЧ**, **Ю. Н. ТЮРИН**, д-р техн. наук, **О. В. КОЛИСНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, **В. М. МАЗУНИН**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован теплообмен между ударно-сжатым слоем импульсной плазмы и частицей никеля размером 60 мкм. Проведен численный анализ характеристик импульсной плазмы, формируемой в плазменно-детонационном ускорителе. Определено влияние различных составляющих теплообмена при нагреве частицы в импульсной плазме. Показано влияние радиационного теплообмена на нагрев дискретных частиц и напыляемой поверхности.

Ключевые слова: плазменно-детонационное напыление, импульсная плазма, дисперсная частица, теплообмен, тепловой поток, излучение

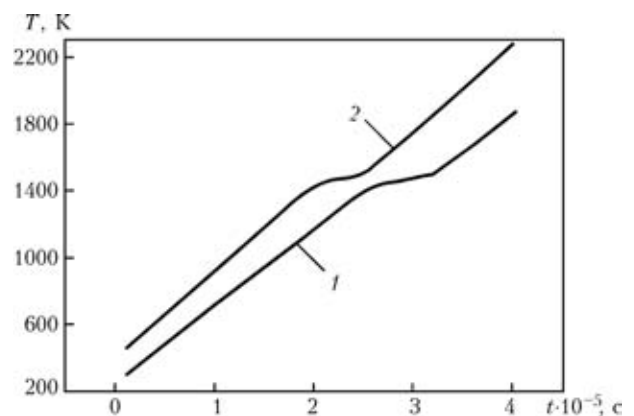
Разнообразие технических решений плазменных ускорителей, большой энергетический диапазон режимов их работы, регулирование состава рабочей смеси создают широкие возможности для применения подобных устройств в технологических процессах обработки поверхности и нанесения покрытий. Одним из примеров их реализации являются плазменно-детонационные генераторы [1], преимущества которых перед дуговыми плазмотронами постоянного тока и детонационно-газовыми установками заключаются в возможности ускорения частиц до значительно больших скоростей, при этом плотность и температура импульсной плазмы достаточно высоки для быстрого нагрева дискретных частиц тугоплавких сплавов и оксидов.

Для определения температуры частиц необходимо оценить вклад различных составляющих теплообмена при их нагреве импульсным потоком плазмы, генерируемой при разряде емкостных накопителей энергии по продуктам детонации горючей смеси (C_3H_8 , O_2 , N_2). Такая оценка невозможна без комплексного решения задачи об определении тепловых и газодинамических характеристик сверхзвукового потока плазмы, а также эффективности передачи энергии поверхности напыляемой частицы.

С помощью математической модели, описанной в работе [2], проведены расчеты характеристик импульсной плазмы, генерируемой плазменно-детонационным ускорителем, со следующими параметрами электроразрядного контура: индуктивность цепи $L = 15$ мкГн, емкость конденсаторной батареи $C = 800$ мкФ, напряжение на обкладках конденсатора $U = 3,2$ кВ. При этом длина ускорителя составляла 0,3 м, а зазор между коаксиальными электродами 8 мм.

В ходе расчетов плазменно-детонационного ускорителя получены следующие параметры ударно-сжатого слоя плазмы: скорость 4,6 км/с, плотность $8,5$ кг/м³, давление 23 МПа и температура плазмы непосредственно за детонационной волной 14400 К. Эти результаты коррелируют с экспериментальными данными по исследованию энергетических параметров импульсной плазмы, формируемой плазменно-детонационным ускорителем [3].

Предполагается, что передача энергии от импульсной плазмы к дисперсным частицам в основном осуществляется их ускорением и нагревом в области ударно-сжатой плазмы, следующей за ударной волной [4]. Для оценки эффективности воздействия ударно-сжатой плазмы на дисперсную частицу принимаем следующие допущения: дистанция изменения параметров течения плазмы значительно выше диаметра частиц и расстояний между ними; частицы сферические; материал частиц не вступает в химические реакции с плазмой; отсутствует диспергирование и столкновение частиц. Ударно-сжатая плазма рассматривается как сплошная среда, характеризующаяся определенными значениями теплофизических параметров. Температура, плотность, давление в ударно-сжатом слое плазмы постоянны. Длину ударно-сжа-



Изменение температуры частиц, движущихся в ударно-сжатом слое импульсной плазмы: 1 — Q_k ; 2 — $Q_k + Q_l$



того слоя плазмы оценивают по методике, приведенной в работе [5].

Рассмотрим газодинамическое воздействие потока плазмы на сферическую частицу. Уравнение движения частицы под действием силы аэродинамического сопротивления может быть записано следующим образом:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \rho_0 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{(u_g - u_p)^2}{2} C_d \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (1)$$

где m_p , u_p — соответственно масса и скорость частицы; ρ_0 — начальная плотность газа; d_p — диаметр частицы; C_d — коэффициент лобового сопротивления частицы. Для его определения используем следующую критериальную зависимость [6]:

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{3}{20} \sqrt{\text{Re}} + \frac{11}{600} \text{Re} \right), \quad (2)$$

где Re — число Рейнольдса.

Расчеты с помощью приведенной модели показывают, что при указанных выше параметрах ускорителя сферическая частица никеля диаметром 60 мкм за время $4 \cdot 10^{-5}$ с ускоряется ударно-сжатой плазмой до скорости 780 м/с и взаимодействует с ударно-сжатым слоем на длине 25...35 мм.

Оценим тепловое воздействие ударно-сжатой плазмы на дисперсную частицу никеля. Для расчета температурного поля в сферической частице, движущейся в сверхзвуковом потоке плазмы, можно использовать нестационарное уравнение теплопроводности:

$$c_p(T) \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r_p^2} \frac{\partial}{\partial r_p} \left(r_p^2 \lambda_p(T) \frac{\partial T_p}{\partial r_p} \right), \quad (3)$$

где $T_p(\rho_p, t)$ — пространственно-временное распределение температуры; r_p — расстояние до центра частицы; $c_p(T)$, ρ_p , $\lambda(T)$ — эффективная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала частицы.

Начальные и граничные условия для уравнения (3) задаются в виде:

$$\frac{\partial T_p}{\partial r_p} \Big|_{r_p=0} = 0; \quad T_p(r_p, 0) = T_p^0; \quad \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r_p} \right) \Big|_{r_p=d_p/2} = Q,$$

где T_p^0 — начальная температура частицы; Q — тепловой поток в частицу.

Интегрируя уравнение (3) в пределах от 0 до r_p , получаем

$$m_p c_p \frac{dT}{dt} = 4\pi r^2 Q. \quad (4)$$

Для расчета теплового потока в частицу в условиях газотермического напыления покрытий,

как правило, используют только конвективную составляющую теплового потока [7, 8], что допускается при температуре газа ниже 4000 К.

Плазменно-детонационный ускоритель генерирует ударно-сжатую плазму, где температура превышает 8000 К, следовательно, совместно с конвективной необходимо учитывать и радиационную составляющую теплообмена. Представим тепловой поток в частицу как сумму двух составляющих:

$$Q = Q_k + Q_l, \quad (5)$$

где Q_k — конвективная составляющая теплового потока в дисперсную частицу, определяется следующим соотношением:

$$Q_k = \alpha(T_g - T_p), \quad (6)$$

Q_l — радиационная составляющая, рассчитывается по следующей зависимости:

$$Q_l = \xi \sigma_0 (T_g^4 - T_p^4). \quad (7)$$

В уравнениях (6), (7) α — коэффициент теплообмена; T_g , T_p — температура соответственно плазмы и частицы; ξ — усредненная по спектру теплового излучения приведенная степень черноты материала частицы; σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплообмена рассчитывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{\lambda_g(T) \text{Nu}}{d_p}, \quad (8)$$

где $\lambda_g(T)$ — теплопроводность плазмы; Nu — число Нуссельта [9]. Коэффициент теплообмена (8) может быть рассчитан на основе критериальной зависимости [10]:

$$\text{Nu} = 2 \exp(-M) + 0,459 \text{Re}^{0,55} \text{Pr}^{0,33}, \quad (9)$$

где M — число Маха; Pr — число Прандтля [6].

На рисунке приведено изменение температуры частицы, нагреваемой ударно-сжатой импульсной плазмой, с учетом радиационной и конвективной составляющей теплообмена. Расчетные данные получены в результате численного решения уравнения (4) с учетом (5)–(9). Анализ полученных данных показывает, что при температуре плазмы выше 8000 К необходимо учитывать радиационную составляющую теплообмена. Температура частицы при учете нагрева от конвективного и радиационного нагрева выше на 10 %. Необходимо отметить, что влияние радиационного теплообмена на нагрев частицы начинается на этапе формирования плазмы в ускорителе, тогда как конвективный теплообмен действует только при прохождении ударно-сжатого слоя через облако частиц.



В заключение можно отметить, что существенную роль в теплообмене импульсной плазмы с напыляемой частицей играет радиационный теплообмен. В частности, при напылении никелевых частиц диаметром 60 мкм радиационная составляющая теплообмена увеличивает температуру частицы более чем на 10 %. При этом время нахождения частицы в ударно-сжатой плазме составляет $4 \cdot 10^{-5}$ с, а ее ускорение до скорости 780 м/с происходит на пути длиной 25...35 мм.

1. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Тюрин Ю. Н. Плазменно-детонационные процессы формирования потоков энергии и их взаимодействие с металлической поверхностью // Физика и техника плазмы: Сб. науч. тр. — Минск, 1994. — Т. 2. — С. 284–287.
2. Погребняк А. Д., Тюрин Ю. Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физ. наук. — 2005. — 175. — С. 520–522.
3. Tyurin Y. N., Pogrebnyak A. D. Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposi-

- tion // Surface and Coatings Technol. — 2000. — 111. — С. 269–275.
4. Ускорение микрочастиц в электротермическом ускорителе с мультиразрядной схемой разрядного узла / Э. Я. Школьников, М. Ю. Гузев, С. П. Масленников, А. В. Чеботарев // Приборы и техника эксперимента. — 2000. — № 6. — С. 130–135.
 5. Особенности движения токовой оболочки и ударной волны в импульсном ускорителе высокого давления / В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков, В. Л. Спекторов и др. // Докл. АН СССР. — 1987. — № 5. — С. 1102–1105.
 6. Лебедев А. Д., Урюков Б. А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления: Ин-т теплофизики. — Новосибирск, 1990. — 290 с.
 7. Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. Детонационное напыление покрытий. — Л.: Судостроение, 1979. — С. 56–59.
 8. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
 9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: В 10 т. — М.: Наука, 1986. — Т. 6. — 736 с.
 10. Кутушев А. Г., Татосов А. В. Математическое моделирование выброса газовой смеси из канала ударной трубы под действием сжатого газа // Физика горения и взрыва. — 1998. — № 3. — С. 107–116.

Heat exchange between the shock-compressed layer of pulse plasma and nickel particle of 60 μm size was studied. Numerical analysis of the characteristics of pulsed plasma formed in the plasma-detonation accelerator has been performed. Influence of various components of heat exchange at particle heating in pulse plasma has been determined. The influence is shown of radiation heat exchange on heating of discrete particles and sprayed surface.

Поступила в редакцию 22.05.2006

УДК 621.791.75.03-58

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, Ю. А. МАСАЛОВ, канд. техн. наук, Е. Н. БАЙШТРУК, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана простая схема системы управления двигателями D25...D90 приводов сварочных установок. Описаны ее статические характеристики и приведены осциллограммы разгона торможения привода.

Ключевые слова: дуговая сварка, электрошлаковая сварка, сварочные установки, привод, регулирование, скорость подачи проволоки

В регулируемых электроприводах сварочных установок широкое распространение получили двигатели постоянного тока. Как правило, это неререверсивные приводы с диапазоном регулирования $1:10^*$. Развитие современной элементной базы позволяет создавать простые схемы управления такими приводами с достаточно высокими техническими характеристиками. Одна из таких схем приведена на рис. 1.

Для управления скоростью двигателя применен широтно-импульсный преобразователь (ШИП), вы-

полненный на основе полевого силового транзистора VT1 и контроллера DA1 (TL494). Частота включения транзистора VT1 (10 кГц) задается резис-

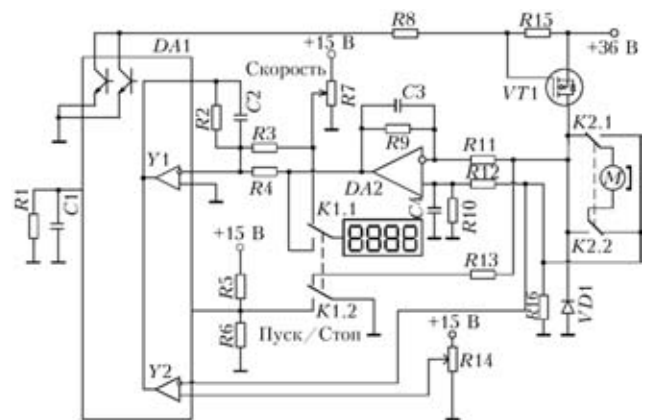


Рис. 1. Принципиальная схема привода: VD1 — защитный диод; C2–C4 — фильтрующие емкости; остальные обозначения см. в тексте

* Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Выща шк., 1986. — 296 с.