УДК 537.533:621.384

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ

Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко
Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Показана возможность попеременного комбинированного ионно-электронного модифицирующего воздействия на материалы с использование одного плазменного источника. Установлены оптимальные параметры ионного и электронного пучков, необходимые для такого воздействия.

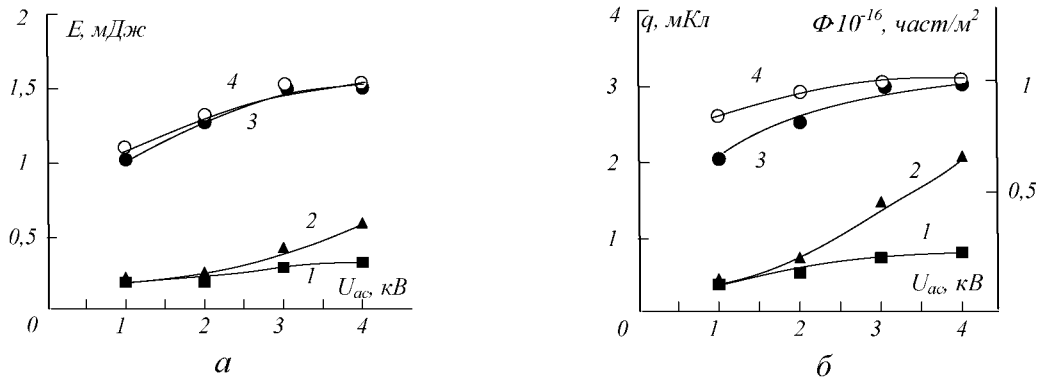
Ионно-плазменные технологии являются перспективными для управляемой модификации свойств поверхностей материалов [1]. При этом для модификации механических и коррозионных свойств поверхностей применяются ионные потоки с энергией ионов обычно ниже 1 кэВ и плотностью потока порядка 1 мА/см^2. Поскольку эффективность ионного воздействия зависит от температуры модифицируемого материала, поддерживать которую во всем изделии не целесообразно, перспективным направлением представляется электронно-лучевое ассистирование ионного воздействия, которое реализуется электронными пучками с плотностью мощности до 10^7 Вт/м^2. В данной работе показана возможность реализации комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материала с использованием источника электронов плазменного (ИЭП), способного эмитировать как электроны, так и ионы при изменении полярности ускоряющего напряжения.

В экспериментах использовалась структура ИЭП, описанная в [2]. На основе полученных осциллограмм ионного тока проводились расчёты суммарного заряда q, флюенса (суммарного потока) Ф и полной энергии E, вкладываемой в изделие за один импульс:

$$q = \int_0^{\tau_{имп}} I_i(t)dt, \qquad E = \int_0^{\tau_{имп}} I_i^2(t)Rdt, \qquad \Phi = \frac{q}{eS},$$

где $I_i(t)$ – импульс ионного тока, $\tau_{имп}$ – длительность импульса, S – площадь воздействия, R – сопротивление в цепи измерения тока эмиссии (1 Ом).

Зависимости расчётных величин представлены на рис. 1. Видно, что эффективность использования энергии импульса ускоряющего напряжения (рис. 1, *а*) оказывается выше в случае больших давлений, а сама эффективность использования этой энергии растёт с увеличением ускоряющего напряжения. На рис. 1, *б* показаны зависимости заряда и флюенса на поверхности изделия (площадь порядка 10^{-4} м^2) за один импульс. Для достижения



ток разряда: 1, 3, 4 – 200 мА, 2 – 350 мА, давление газа: 1, 2, 3 – 1 Па, 4 – 10 Па

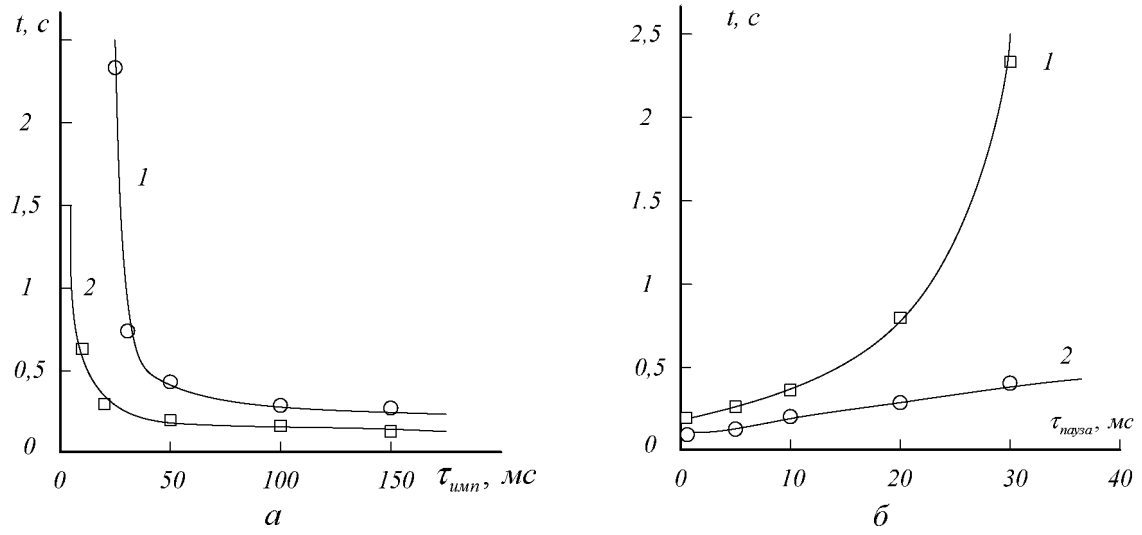
Рис. 1. Зависимость параметров ионного воздействия за один импульс от ускоряющего напряжения: *а* – энергия, *б* – заряд и флюенс

требуемого уровня воздействия в данном ИЭП необходимо или повышать плотность плазмы за счёт увеличения давления газа, или увеличивать число импульсов воздействия (более 10). В общем случае суммарное время воздействия оказывается не более десяти секунд, что позволяет считать перспективность разработки такого типа устройств, формирующих ионные потоки для обработки малогабаритных изделий. Увеличение же давления снижает электрическую прочность ускоряющего промежутка особенно в режиме эмиссии электронов, поэтому этот подход менее перспективен для формирования комбинированного воздействия, в сравнении с вариантом импульсного воздействия суммарной заданной длительности, достигаемой за счёт требуемого числа импульсов.

Для выбора оптимальных режимов термического электронно-лучевого воздействия использовалась прикладная программа [3], в которой численно решается уравнение теплопроводности с учётом температурной зависимости коэффициента теплопроводности для материалов типа сталь 45. В качестве критерия остановки расчета при заданных плотности мощности электронного пучка и параметрах непрерывного или импульсного воздействия использовалось условие достижения температуры 600 °С на глубине материала 0,5 мм. Мощность варьировалась током пучка и площадью воздействия при ускоряющем напряжении 5 кВ. При заданной плотности мощности определялись требуемые общее время воздействии, длительность и скважность импульсов.

В расчётах получено, что при указанных плотностях мощности общее время воздействия не превышает десяти секунд, что позволяет предполагать возможность эффективного комбинированного воздействия. Некоторые результаты расчётов приведены на рис. 2. На рис. 2, *а* представлены результаты расчётов по влиянию длительности воздействия в импульсе и время паузы (скважность) на общее время воздействия, а на рис. 2, *б* –

результаты расчетов по влиянию длительности паузы на общее время воздействия при различных плотностях мощности. На основании проведенных расчетов могут быть определены диапазоны параметров импульсов, необходимые для достижения требуемой температуры на заданной глубине. Так для представленных на рисунках расчетов оптимальными можно считать режим, когда при требуемой плотности мощности более $2 \cdot 10^7$ Вт/м^2 (ускоряющее напряжение 5 кВ, ток пучка 0,3 А) длительность импульса должна составлять величину порядка 50 мс при длительности паузы 20 мс. Указанные параметры электронного пучка достижимы в используемом источнике [2].



площадь воздействия – $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ м^2, длительность паузы – 20 мс,
плотность мощности: 1 – $1{,}6 \cdot 10^7$ Вт/м^2, 2 – 2,55 10^7 Вт/м^2

Рис. 2. Зависимость общего времени воздействия необходимого для достижения требуемой температуры (600 °С) на заданной глубине (0,5 мм): *а* – от длительности импульса, *б* – от длительности паузы между импульсами

Полученные результаты свидетельствуют о возможности реализации комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материалов с использованием одного ИЭП с параметрами, достаточными для реализации ряда технологий модификации поверхностей.

Литература

1. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.]; под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.

2. Груздев, В.А. Плазменный ионно-электронный источник / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63 – 68.

3. Груздев, В.А. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь // Инженерно физический журнал. – 2007 – № 2. – С. 134 – 142.