ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОВРЕХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ СУБМИЛЛИСЕКУНДНЫМ МОДУЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ, ГЕНЕРИРУЕМЫМ В ИСТОЧНИКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

Т.В. Коваль, М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, Д.А. Шпанов
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия, tvkoval@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru, koval@hcei.tsc.ru, pavelmoskvin@mail.ru, das138@tpu.ru

В работе представлены экспериментальные и теоретические данные, демонстрирующие возможность управления температурой поверхности образца при облучении субмиллисекундным электронным пучком, создаваемым источником электронов с плазменным катодом. Температура поверхности образца, достигающая тысяч градусов Цельсия, регулируется путем модуляции тока пучка за счет соответствующих кратковременных изменений параметров эмиссионной плазмы. При воздействии на мишень модулированным пучком достигался коэффициент пульсаций температуры на поверхности менее 5%. Эффективность метода контроля температуры подтверждена численным моделированием. Предлагаемый метод открывает путь к новым применениям плазменно-катодных источников электронов в науке и технике.

Ключевые слова: дуговой разряд; модуляция пучка; электронная эмиссия; плазменный катод; модификация поверхности; температурное поле.

FORMATION OF A TEMPERATURE FIELD IN THE SURFACE OF MATERIALS BY A SUBMILLISECOND MODULATED ELECTRON BEAM GENERATED IN A SOURCE WITH A PLASMA CATHODE

Tamara Koval, Maxim Vorobyov, Pavel Moskvin, Dmitry Shpanov
Institute of High Current Electronics SB RAS,
2/3 Academichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia, tvkoval@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru, koval@hcei.tsc.ru, pavelmoskvin@mail.ru, das138@tpu.ru

In this article, the experimental and theoretical data are presented which demonstrate the possibility of controlling the specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source. The specimen surface temperature reaching thousands of degrees Celsius is controlled by modulating the beam current via appropriate short-time variations in the emission plasma parameters. When the target was exposed to a modulated beam, the temperature fluctuation coefficient on the surface was less than 5%. The efficiency of the method of temperature control is confirmed by numerical simulations. The proposed method opens the way to new applications of plasma-cathode electron sources in science and technology.

Keywords: arc discharge; beam modulation; electron emission; plasma cathode; surface modification; temperature field.

Введение

Электронные источники широко используются в науке и технике и одно из интенсивно развивающихся направлений исследований касается взаимодействия электронных пучков с металлами [1-3]. Источники электронов с плазменным катодом позволяют независимо управлять параметрами электронного пучка, в том числе энергией электронов, током пучка, длительностью и частотой повторения импульсов [4-6]. При этом управление током субмиллисекундного электронного пучка мегаваттной мощности путем изменения плотности эмиссионной плазмы возможно только в источнике с плазменным катодом.

Целью данной работы является теоретическая и экспериментальная демонстрация возможности управление формированием температурного поля в/на поверхности мишени в миллисекундном диапазоне

времен при воздействии на металлическую мишень модулированным электронным пучком переменной мощности.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в источнике электронов «СОЛО» (рис. 1). Источник состоял из плазменного катода с эмиссионной границей, стабилизированной сеткой, и плазменного анода с открытой границей [2, 7-8], способный формировать пучок электронов диаметром до 40 мм с энергией до 25 кэВ, током до 400 А и длительностью до 1000 мкс. Температуру поверхности металлов, облученных субмиллисекундным мегаваттным электронным пучком, измеряли, как описано в [9, 10]. Материалом для испытаний был сплав силумина AlSi18. Его образцы размерами 15×10×5 мм закреплялись на столе манипулятора тонкой нержавеющей сталью.

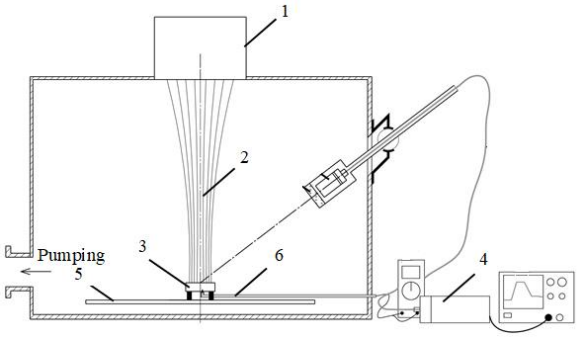

Рис. 1. Схема измерения температуры поверхности образца при электронно-лучевом облучении: 1 – источник электронов; 2 – модулированный электронный пучок; 3 – облучаемая мишень; 4 – пирометр; 5 – стол; 6 – термопара

Эксперимент и расчеты

Возможность источника электронов была продемонстрирована в режиме облучения с удержанием температуры поверхности образца выше температуры плавления силумина. Удержание температуры возможно как за счет амплитудной, так и за счет частотно- или широтно- импульсной модуляции электронного пучка, каждая из которых была использована в рамках проведенных экспериментов, используя имеющуюся систему электропитания плазменного катода [10, 11].

Математическое моделирование динамики температурного поля при высокоэнергетическом воздействии электронного пучка на образец включает в себя решение уравнения переноса тепла с учетом принимаемых предположений модели, граничных, начальных условий и фазовых переходов [12-14]. Численное решение тепловой задачи для экспериментальной мощности электронного пучка и измерения температуры поверхности представлены на рис. 2. Временная зависимость температуры поверхности $T(t)$ отражает изменение мощности пучка. Колебания $T(t)$ при постоянной температуре поверхности обусловлены колебаниями тока пучка.

При соответствующем источнике питания, обеспечивающем монотонное, а не дискретное изменение формы импульса тока пучка, температура поверхности T(t) не имеет колебаний.

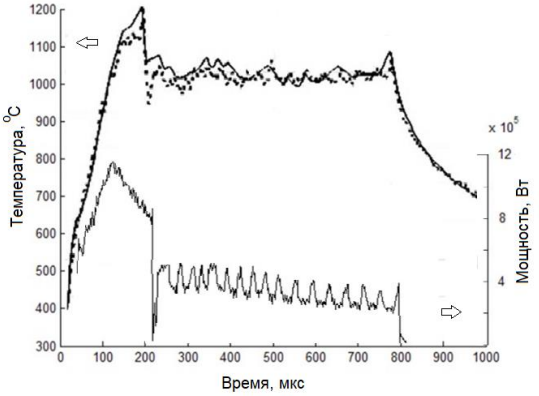

Рис. 2. Экспериментальная мощность пучка и температура поверхности (точки) - расчет, (сплошная) – эксперимент

На рис. 3 показано распределение температуры по глубине образца в разные моменты времени. Расчеты показывают, что наибольшая скорость расплава достигается в первые 200 мкс, а при изменении времени от 200 до 950 мкс глубина расплава увеличивается с 40 до 75 мкм.

Следует отметить, что рассчитанный и экспериментально реализованный процесс удержания температуры поверхности осуществляется за счет изменения характеристик электронного пучка (конфигурация и длительность импульса плотности

мощности, степени дискретизации тока пучка) и применим для различных материалов. За счет изменения характеристик электронного пучка возможен контроль за формированием температурного поля в заранее определенных пространственных границах, что перспективно для целенаправленной модификации поверхности материалов и изделий с целью получения прогнозируемых структурно-фазовых состояний, а соответственно, нужных их физико-механических и эксплуатационных свойств.

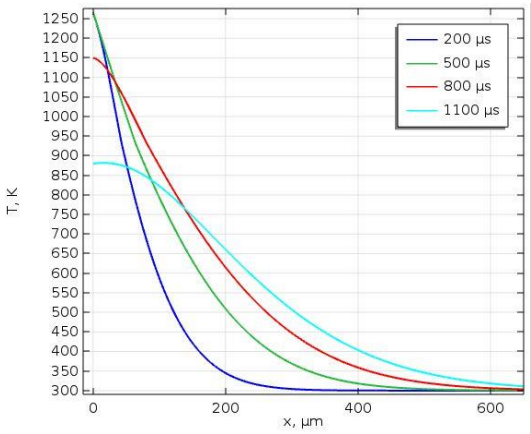

Рис. 3. Распределение температуры в образце в разные моменты времени

Заключение

В работе численно продемонстрирована возможность управления температурным полем различных металлических материалов, что было экспериментально подтверждено на примере алюминиевого сплава марки AlSi18. Показано, что в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса для поддержания температуры может использоваться любой вид модуляции электронного пучка (амплитудная, широтная, частотная модуляция), что сравнительно просто реализуется с использованием источников электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, позволяющих генерировать пучки мегаваттного уровня мощности при сравнительно невысоких (десятки киловольт) ускоряющих напряжениях. Полученные результаты перспективны для упрочнения поверхности материалов и изделий с целью повышения их срока службы, за счет прогнозируемого формирования требуемой фазы в приповерхностном объеме обрабатываемого материала.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

Библиографические ссылки

1. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. Новосибирск: СО РАН: Наука; 2019. 348 с.
2. Ахмадеев Ю.Х., Денисов В.В., Иванов Ю.Ф., Иванова О.В., Иконникова И.А., Коваль Н.Н. и др. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов (под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова) Томск: НТЛ; 2016. 312 с.
3. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Белорусская наука; 2013. 287 с.
4. Жаринов А.В. и др. *Журнал технической физики* 1986; 56 (1): 66–71.
5. Жаринов А.В. и др. *Журнал технической физики* 1986; 56(4): 687–693.
6. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Изд-во научно-технической литературы; 2005. 212 с.
7. Коваль Н.Н., Щанин П.М., Девятков В.Н. и др. *ПТЭ* 2005; (1): 135-140.
8. Девятков В.Н., Коваль Н.Н. *Известия ВУЗов. Физика* 2017; 60(9): 44-48.
9. Крысина О.В. и др. Материалы ВИТТ-2019, Минск: БГУ, 2019: 457-460.
10. Vorobyov M. et al. IEEE Transactions on Plasma Science 2021; 49(9): 2550-2553.
11. Воробьев М.С. и др. *Письма в ЖТФ* 2021; 47(10): 38-41.
12. Ashurova K.T. et al. Proc. GDP-2021: Ekaterinburg: IEP UB RAS 2021; p. 100.
13. Chan S.H. et al. *Inter. Journal of Heat and Mass Transfer* 1983; 26 (4): 621-633.
14. Vorob'ev A.Y., Petrov V.A., Titov V.E. Fast heating and melting of alumina under the effect of concentrated laser radiation. *High Temperature* 2007; (45): 478-487.