

УДК 537.533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА МИШЕНИ ИЗ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

© 2019 г. А. Д. Тересов¹, *, Т. В. Коваль², Чан Ми Ким Ан², П. В. Москвин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, Томск, Россия

*E-mail: tad514@sibmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

С помощью высокоскоростного инфракрасного пирометра проведены измерения температуры поверхности образцов из алюминиевого сплава А7 и титанового сплава ВТ1-0 в процессе импульсного электронно-пучкового воздействия с разной плотностью энергии в импульсе. Численное моделирование тепловых полей для тех же условий показало хорошее сходство с экспериментальными данными и подтвердило, что скорость нагрева поверхности образцов зависит от основных характеристик электронного пучка.

DOI: 10.1134/S0367676519110267

ВВЕДЕНИЕ

Механические и эксплуатационные свойства материалов во многом определяются режимом электронно-пучкового воздействия, а также такими характеристиками материала, как величина максимальной температуры нагрева, термический цикл, скорости плавления и кристаллизации [1]. Поэтому измерение температуры поверхности при высокоскоростном воздействии электронного пучка открывает возможности, как для изучения процессов нагрева, плавления, испарения материалов, так и для управления технологическими параметрами модификации с целью получения заранее заданных свойств материалов после электронно-пучкового воздействия.

Вакуумная электронно-пучковая установка “СОЛО”, разработанная и изготовленная в Институте сильноточной электроники СО РАН, используется для модификации поверхности различных материалов и изделий [2]. В ее основе лежит электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления [3, 4], способный генерировать импульсный электронный пучок с длительностью импульса 20–200 мкс, током 20–300 А, энергией электронов 5–25 кэВ, плотностью энергии в импульсе до 100 Дж · см⁻², частотой следования импульсов 0.3–20 с⁻¹. Диапазон рабочих давлений электронного

источника 0.01–0.05 Па, который поддерживается путем постоянного напуска рабочего газа (аргон) через источник. Воздействие импульсного электронного пучка на поверхность металлического материала позволяет достигать скоростей нагрева поверхностного слоя – 10⁸ К · с⁻¹, охлаждения – 10⁵–10⁷ К · с⁻¹, что ведет к выполаживанию поверхности, импульсной закалке из расплавленного состояния и, как следствие, к существенному улучшению физико-химических и эксплуатационных свойств материалов и изделий в целом.

Математическое моделирование тепловых процессов включает в себя построение физико-математической модели, адекватной условиям эксперимента. Совместная работа экспериментаторов и теоретиков позволяет осуществить предварительный анализ технологического процесса и исследовать отдельные его стадии. Численное моделирование позволяет провести детальный анализ процессов теплового воздействия, использующего энергию электронного пучка, определить температуру фазового перехода.

В работе приведены результаты измерений температуры поверхности алюминиевого и титанового сплавов в импульсе высокоскоростного воздействия электронного пучка, и численного моделирования этого процесса.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материалов для измерения температуры на поверхности при импульсном тепловом воздействии использовались образцы из титанового ВТ1-0 (99.3% Ti) и алюминиевого А7 (99.7% Al) сплавов размерами 12 × 12 × 4 мм с температурой плавления 1668 и 658°С соответственно. Образцы фиксировали на поверхности стола-манипулятора с помощью тонких полосок из нержавеющей фольги для уменьшения тепловых потерь в процессе измерений и помещали в вакуумную камеру импульсной электронно-пучковой установки “СОЛО”. Для перемещения образцов внутри камеры и позиционирования под пучком использовали двухкоординатный программируемый манипулятор.

Для измерения температуры на поверхности образцов в течение импульсов электронно-пучкового воздействия использовали высокоскоростной инфракрасный пирометр “Kleiber KGA 740-LO”, соединенный гибким волноводом с объективом “LVO 25” с возможностью настройки фокусировки и расстояния до поверхности излучения. На рис. 1 показана схема измерения: 1 – электронный источник; 2 – импульсный электронный пучок; 3 – объектив “LVO 25”; 4 – кварцевое стекло марки КВ; 5 – оптический волновод; 6 – облучаемый образец; 7 – хромель-алюмелевая термопара; 8 – стол двухкоординатного манипулятора; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный пирометр “Kleiber KGA 740-LO”; 11 – осциллограф “Tektronix TDS 1001B”. Рабочий диапазон измеряемых пирометром температур составляет 300–2300°С, спектральный диапазон 2–2.2 мкм.

Объектив пирометра с помощью специально изготовленного манипулятора помещали внутрь вакуумной камеры, сам он при этом находился при атмосферном давлении. Для вывода инфракрасного излучения из вакуумной камеры использовали кварцевое стекло марки КВ толщиной 1.5 см, прозрачное для заданного спектрального диапазона. Пирометр имеет аналоговый выход 0–10 В, сигнал с которого регистрировался с помощью осциллографа. Для калибровки показаний пирометра использовали хромель-алюмелевую термопару, спай которой фиксировали с помощью точечной сварки на обратной стороне образца, чтобы не допустить прямого попадания электронного пучка на термопару. Показания напряжения с термопары снимали с помощью мультиметра. Точность наведения объектива на участок поверхности и размер области измерения температуры контролировали с помощью обратного светового луча, исходящего из объектива. Так как объектив располагался под углом ≈30° к поверхности образца, то излучаемая поверхность представляла собой эллипс ≈4 × 8 мм. У пирометра есть возможность задавать коэффициент излу-

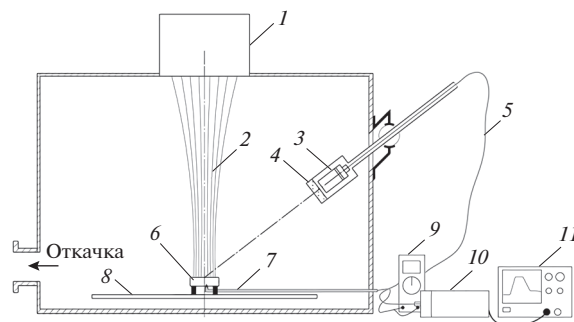


Рис. 1. Схема измерения температуры поверхности образца в процессе импульсного электронно-пучкового воздействия.

чения ϵ путем установки на потенциометре требуемого значения 0.1–1. Калибровку показаний пирометра и определение ϵ поверхности материала осуществляли следующим образом: с помощью импульсного электронного пучка в частотно-импульсном режиме (частота импульсов 8 с⁻¹, плотность энергии в импульсе 0.5 Дж · см⁻², длительность импульсов 50 мкс, энергия электронов 10 кэВ) теплоизолированный образец с закрепленной термопарой равномерно разогревали до температуры 500°С. Путем изменения значения потенциометра на пирометре устанавливали соответствие температуры 500°С по термопаре – 1 В на осциллографе. Конечное положение потенциометра указывало на значение ϵ для данного материала и текущего состояния его поверхности. По мере объемного остывания образца после частотно-импульсного электронно-пучкового нагрева регистрировали еще несколько пар значений “температура (термопара)–напряжение (осциллограф)” и строили калибровочную прямую, с помощью которой из регистрируемых с пирометра осциллограмм определяли зависимости температуры от времени.

Кроме регистрации значений температуры поверхности во время импульса, одновременно с этим, с помощью поясов Роговского фиксировали осциллограммы токов в разрядной ячейке и ускоряющем промежутке электронного источника, а также ускоряющее напряжение (с помощью высоковольтного щупа “Актаком АСА-6039” (1 : 1000)).

Измерение распределения плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца для разных режимов облучения осуществляли с помощью секционированного калориметра, состоящего из 9 линейно расположенных с шагом 8 мм медных датчиков – цилиндров Фарадея, закрытых плоской диафрагмой с диаметром отверстий 3 мм. К каждому датчику с обратной стороны было припаяно по терморезистору, откалиброванному по температуре, соединенному с системой автоматического считывания и обработки

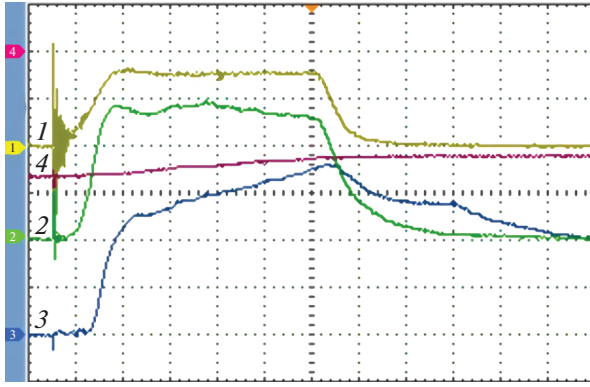


Рис. 2. Осциллограммы токов разряда (1) и электронного пучка (2) (40 А/дел.), ускоряющего напряжения (4) (5 кВ/дел.) и температуры поверхности образца (3) (2 В/дел.). Масштаб: 50 мкс/дел.

показаний до и непосредственно после импульса электронно-пучкового воздействия. Плотность энергии электронного пучка на мишени имеет Гауссовское радиальное распределение, со средним радиусом на полувысоте ~ 1.7 см для максимальных значений энергии (в центре мишени) 8, 15 и 20 Дж \cdot см $^{-2}$.

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы импульсов токов разряда (1) и электронного пучка (2), имеющих форму близкую к прямоугольной с фронтами 25–40 мкс, длительностью 100 мкс по амплитуде, напряжения в ускоряющем промежутке (4) и температуры поверхности образца (3), которая после калибровки определяется, как $300 + 200U$, где U – уровень сигнала с пирометра в вольтах.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

При энергии электронов 13 кэВ, длительности импульса 50–200 мкс и радиусе пучка 2 см можно считать источник энергетического воздействия поверхностным, а тепловые процессы рассматривать в одномерном приближении. Тепловые процессы в металле, при воздействии интенсивного низкоэнергетического электронного пучка, описываются уравнением теплопроводности, с учетом фазового перехода, температурной зависимости теплофизических коэффициентов и граничных условий на поверхности образца:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \\ -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = p(t), \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где c , ρ и λ – теплоемкость, плотность и теплопроводность, зависящие в общем случае от температуры и координат $K(T) = \{c(T), \rho(T), \lambda(T)\}$; $p(z, t) = U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$ – функция, характеризую-

щая внешний источник нагрева, которая определяется в соответствии с экспериментальной мощностью $U(t)I(t)$ пучка, r_0 – средний радиус пучка на мишени. При фазовых переходах объемная теплоемкость описывается с помощью дельтаобразной функции:

$$\rho c = Q_m \rho_s \delta(T - T_{ph}) + \begin{cases} (c\rho)_S, & T < T_{ph} \\ (c\rho)_L, & T \geq T_{ph} \end{cases}, \quad (2)$$

где T_{ph} и Q_m – температура и теплота плавления, индексы S и L относятся к твердому и жидкому состояниям вещества.

Критерием соответствия результатов расчета и экспериментальных измерений считается совпадение на мишени температуры и суммарного энергетического вклада, которые известны из эксперимента при отсутствии данных о динамике радиального распределения плотности мощности электронов на мишени в импульсе тока пучка и о влиянии высокоскоростного воздействия (вклада энергии) электронного пучка на теплофизические коэффициенты мишени.

Численное решение задачи теплопроводности осуществляли по неявной консервативной разностной схеме с использованием метода прогонки, с применением компьютерного программного пакета “MATLAB”. Эксперименты и расчеты были проведены для четырех вариантов соотношения плотности энергии и длительности импульса пучка: 8, 15, 20 Дж \cdot см $^{-2}$, $\tau = 100$ мкс (алюминий, титан) и 20 Дж \cdot см $^{-2}$, $\tau = 200$ мкс (алюминий). Анализ экспериментов для алюминиевой мишени показал существенную нелинейность (в отличие от титановой) температуры поверхности в конце переднего фронта тока пучка от мощности пучка $T(P)$ при $P < 1.5$ кВт, что в первую очередь, связано с большой теплопроводностью $\lambda(T)$ для алюминия, влияющей на энерговклад пучка на границе мишени.

Численное решение уравнения теплопроводности было проведено с учетом зависимостей теплофизических коэффициентов от температуры $K = K(T)$, экстраполированных в соответствии с данными [5]. Расчеты показали, что в рассматриваемом диапазоне плотности энергии $E = 8–20$ Дж \cdot см $^{-2}$ соответствие в конце импульса воздействия расчетной и экспериментальной температуры поверхности получено при средних радиусах пучка $r_0 = 1.33–1.35$ см для алюминия и $r_0 = 1.6–1.75$ см для титана, при этом расчетные плотности энергии пучка на мишени превышают экспериментальные: для алюминия на 16–36 Дж \cdot см $^{-2}$, а для титана на 9–18 Дж \cdot см $^{-2}$.

При решении уравнения теплопроводности при электронно-пучковом воздействии на мишень использование постоянных теплофизических коэффициентов $K = \text{const}$ и прямоугольных

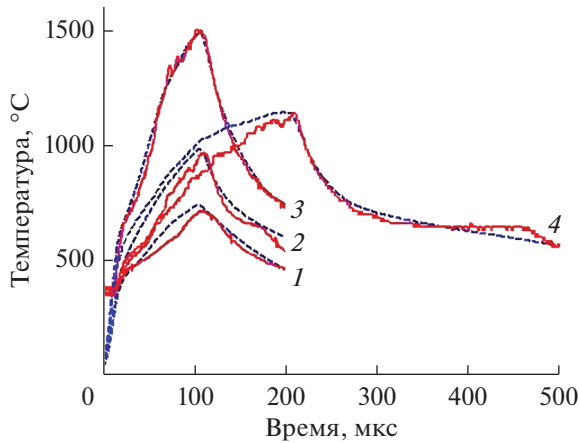


Рис. 3. Расчетная (пунктирная) и экспериментальная (сплошная) температура поверхности алюминиевой мишени; 1 – $E = 8$, 2 – $E = 15$, 3, 4 – $E = 20$ Дж · см⁻²; $\tau = 100$ мкс (1, 2, 3), $\tau = 200$ мкс (4).

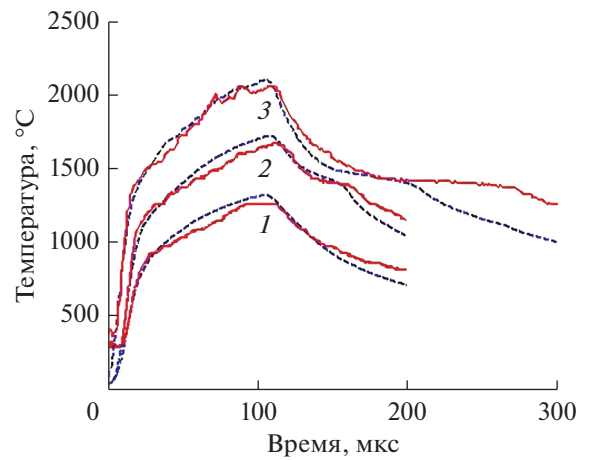


Рис. 4. Расчетная (пунктирная) и экспериментальная (сплошная) температура поверхности титановой мишени; 1 – $E = 8$, 2 – $E = 15$, 3 – $E = 20$ Дж · см⁻², $\tau = 100$ мкс.

импульсов мощности пучка [6, 7], не учитывает изменение скорости нагрева на фронте импульса воздействия и требует проверки соответствия расчетной и экспериментальной плотности энергии. Вычисления, проведенные для параметров эксперимента при постоянных теплофизических коэффициентах ($c_{Al} = 1000$ Дж · (кг · К)⁻¹, $\rho_{Al} = 2600$ кг · м⁻³, $\lambda_{Al} = 93$ Вт · (м · К)⁻¹, $c_{Ti} = 680$ Дж · (кг · К)⁻¹, $\rho_{Ti} = 4505$ кг · м⁻³, $\lambda_{Ti} = 22.3$ Вт · (м · К)⁻¹) показали, что соответствие экспериментальной и расчетной температуры поверхности в рассматриваемом диапазоне плотности энергии и длительности импульса ($E = 8\text{--}20$ Дж · см⁻², $\tau = 100$ мкс) получено при средних радиусах пучка на алюминиевой мишени $r_0 = 1.7\text{--}1.47$ см, для титановой мишени $r_0 = 1.5\text{--}1.75$ см.

Проведенные вычисления при $K = \text{const}$ и $K = K(T)$ показывают отсутствие соответствия расчетной и экспериментальной плотности энергии пучка. Кроме того, расчетная скорость роста температуры на фронте тока пучка ниже экспериментальной, как для алюминиевой, так и для титановой мишени, что указывает на присутствие общего механизма, отвечающего за энергетический вклад на фронте тока пучка.

Более высокая скорость роста экспериментальной температуры поверхности $(4\text{--}6) \cdot 10^7$ град/с, чем в расчете, может быть связана с динамикой радиального распределения плотности тока пучка (среднего радиуса пучка $r_0 = r_0(t)$) на фронте тока пучка. Особенностью электронного источника “СОЛО” с сеточным плазменным катодом является генерация электронного пучка в режиме усиления тока эмиссии (до двукратного) [1–3], который обусловлен ионно-электронной эмиссией с поверхности сеточного электрода. Расширение

радиального распределения плотности тока электронного пучка может осуществляться за счет вторичных электронов при расширении плазменного канала, которое связано с движением ионов плазмы поперек силовых линий неоднородного магнитного поля на фронте тока пучка. Оценки показывают, что на фронте тока пучка средний радиус $r(t)$ коррелирует с током (энергией при $U = \text{const}$) пучка и изменяется в интервале 1.1–1.8 см при плотности энергии пучка $E = 8$ Дж · см⁻² и в интервале 1.2–1.6 см при $E = 20$ Дж · см⁻².

Следует отметить, что при расчетах, проводимых при постоянных теплофизических коэффициентах, зависимость $r_0(t)$ будет включать в себя через граничное условие как динамику радиального распределения плотности мощности пучка, так и некорректность решения при $K = \text{const}$.

Экспериментальные и расчетные зависимости температуры поверхности ($r = 0$) с учетом изменения среднего радиуса пучка $r_0(t)$ приведены на рис. 3 для алюминия и на рис. 4 для титана.

Получено удовлетворительное согласие экспериментальной и расчетной температуры при соответствии расчетной и экспериментальной плотности мощности пучка на мишени. Расчетная температура алюминия несколько выше экспериментальной, это может быть связано с влиянием процессов рассеяния и эрозии поверхности алюминиевой мишени на радиальное распределение плотности тока и энергию электронов, а также с неоднородностью плотности тока пучка на мишени во время импульса воздействия.

Плавление и кристаллизация приводят к появлению особенностей в характере температурных кривых, связанных с фазовым переходом первого рода и наличием теплоты перехода. Из

литературы известно, что чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения ΔT поверхностного слоя [8], которая определяется по наличию горизонтального участка на экспериментальных зависимостях $T(t)$, соответствующего температуре кристаллизации материала. Как видно из рис. 3 и рис. 4, в условиях эксперимента температуры кристаллизации поверхностного слоя алюминиевого сплава А7 и титанового сплава ВТ1-0 составляли $639 \pm 5^\circ\text{C}$ и $1387 \pm 5^\circ\text{C}$ соответственно. При этом степень переохлаждения ΔT достигала $10 \pm 5^\circ\text{C}$ для А7 и $280 \pm 5^\circ\text{C}$ для ВТ1-0. Большая разница в значениях ΔT объясняется разной теплопроводностью материалов (у алюминия в ~ 10.7 раза больше) и скоростью охлаждения поверхности в интервале температур, близких к табличным значениям температур плавления (на один–два порядка выше для титана).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения температуры поверхности образцов алюминиевого сплава А7 и титанового сплава ВТ1-0 в импульсах высокоскоростного воздействия на них электронного пучка с плотностями энергии 8, 15, 20 Дж \cdot см $^{-2}$ и длительностями импульсов 100, 200 мкс и сравнения с результатами численных расчетов показали, что скорость нагрева поверхности зависит от основных характеристик электронного пучка, а также от динамики радиального распределения плотности мощности пучка на мишени.

Степень переохлаждения ΔT поверхности титанового сплава ВТ1-0 в условиях эксперимента достигала $280 \pm 5^\circ\text{C}$, что объясняется высокой температурой плавления материала (1668°C) и высокими скоростями охлаждения поверхностного слоя ($\sim 10^7$ К \cdot с $^{-1}$) при этих температурах. В случае с алюминиевым сплавом А7, обладающим относительно низкой температурой плавления

(658°C) и, соответственно, меньшей скоростью охлаждения при этих температурах (10^5 – 10^6 К \cdot с $^{-1}$), наблюдаемая в экспериментах температура кристаллизации поверхности близка к табличным значениям температуры плавления.

Методика измерения температуры в процессе импульсного электронно-пучкового воздействия и использование численного моделирования тепловых полей открывает возможность управления основными технологическими параметрами обработки импульсным электронным пучком с целью получения заранее заданных свойств поверхности материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A.* Materials surface processing by directed energy techniques. Paris: Elsevier, 2006. 763 p.
2. *Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Григорьев С.В. и др.* // Уч. зап. Петрозавод. гос. ун-та. 2010. № 2(107). С. 86.
3. *Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н. и др.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 4. С. 23; *Grigor'ev S.V., Devyatkov V.N., Koval N.N. et al.* // Techn. Phys. Lett. 2010. V. 36. № 2. P. 158.
4. *Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 10. P. 1890.
5. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
6. *Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Иванова О.В. и др.* // Изв. вузов. Физ. 2015. Т. 58. № 4. С. 46; *Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Ivanova O.V. et al.* // Rus. Phys. J. 2015. V. 58. № 4. P. 478.
7. *Ivanov Y.F., Krysina O.V., Petrikova E.A. et al.* // Key Engineer. Mat. 2016. V. 683. P. 569.
8. *Ляхтин Ю.М., Леонтьева В.П.* Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.