Экспериментальное и численное исследование импульсного воздействия электронного пучка на металлические мишени

Т.В. Коваль¹, А.Д. Тересов², Чан Ми Ким Ан¹, П.В. Москвин²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050 Томск, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, Россия
634055 Томск, Россия
e-mail: tad514@sibmail.com

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-76-81

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 определенным образом зависит от основных характеристик электронного пучка, а кристаллизация поверхности титанового сплава ВТ1-0 происходит при температуре ниже температуры плавления на $\cong 280$ °С.

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 изучение процессов нагрева, плавления, испарения материалов, так и управления технологическими параметрами модификации с целью получения заранее заданных свойств материалов после электронно-пучковой модификации.

Импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО», разработанная и изготовленная в Институте сильноточной электроники СО РАН, используется для модификации поверхности различных материалов и изделий [2]. В её основе лежит электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления [3], способный генерировать импульсный электронный пучок с длительностью импульса 20 – 200 мкс, током 20 – 300 А, энергией электронов 5 – 25 keV, плотностью энергии в импульсе до 100 Дж/см², частотой следования

импульсов 0.3 – 20 с⁻¹. Диапазон рабочих давлений электронного источника 0.01 – 0.05 Па, который поддерживается путём постоянного напуска рабочего газа (аргон) через источник. Воздействие импульсного электронного пучка на поверхность металлического материала позволяет достигать скоростей нагрева поверхностного слоя – 10⁸ К/с, охлаждения – 10⁶ – 10⁷ К/с, что ведет к выглаживанию 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 приводятся результаты измерений температуры поверхности алюминия и титана в импульсе высокоскоростного воздействия электронного пучка и численного моделирования этого процесса.

Методика эксперимента

В качестве материала для импульсных температурных измерений использовались образцы из технически чистого титана ВТ1-0 и алюминия А7 размерами $12 \times 12 \times 4$ мм с температурой плавления 1668°C и 650°C соответственно. Образцы фиксировались на поверхности стола-манипулятора с помощью тонких полосок из нержавеющей фольги для уменьшения тепловых потерь в процессе измерений и помещались в вакуумную камеру импульсной электронно-пучковой установки «СОЛЮ». Для перемещения образцов внутри камеры и позиционирования под пучком использовался двухкоординатный программируемый манипулятор.

Для импульсного измерения температуры на поверхности титановых образцов применялся высокоскоростной инфракрасный пирометр Kleiber KGA 740-LO, соединённый 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. Диапазон измерения температур пирометром составлял $300 - 2300^\circ\text{C}$ в спектральном диапазоне $2 - 2.2\text{ }\mu\text{m}$.

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

Объектив пирометра с помощью специально изготовленного манипулятора помещался внутрь вакуумной камеры, но при этом находился под атмосферным давлением. Для герметизации объектива и обеспечения возможности регистрации температуры внутри вакуумной камеры использовалось кварцевое стекло марки КВ толщиной 1.5 см, прозрачное для заданного спектрального диапазона. Пирометр имеет аналоговый выход $0 - 10\text{ V}$, сигнал с которого регистрировался с помощью осциллографа Tektronix TDS 1001B. Для калибровки показаний пирометра использовалась хромель-алюмелевая термопара, закреплённая с помощью точечной сварки на обратной поверхности тонкого ($100\text{ }\mu\text{m}$) образца, чтобы не допустить прямого попадания электронного пучка на термопару. Показания напряжения с термопары снимались с помощью мультиметра Fluke 175. Точность наведения объектива и площадь излучаемой поверхности контролировалась с помощью обратного светового луча. Так как объектив располагался под углом к поверхности образца, то излучаемая поверхность представляла собой эллипс $4 \times 8\text{ mm}$, размер образца соответственно выбирался больше 8 mm (в нашем случае $12 \times 12 \times 4\text{ mm}$). У пирометра есть возможность задавать коэффициент излучения ϵ путём установки на потенциометре требуемого значения. Калибровка показаний пирометра и определение коэффициента излучения поверхности материала осуществлялась следующим образом: с помощью импульсного электронного пучка в частотно-импульсном режиме (частота импульсов 8 s^{-1} , плотность энергии в импульсе 0.5 J/cm^2 , длительность импульсов $50\text{ }\mu\text{s}$, энергия электронов 10 keV) теплоизолированный образец с приваренной к нему термопарой равномерно разогревался до температуры 500°C . Путём изменения значения потенциометра на пирометре добивались соответствия значения 500°C по термопаре – 1 V на осциллографе. По этому значению потенциометра определяли коэффициент излучения для данного материала, а именно титана, и состояния его поверхности. По

мере остывания образца после импульса электронного воздействия снималось ещё несколько точек «температура-напряжение» и строилась калибровочная прямая, из которой определялись значения показаний пирометра в °С.

Кроме значений импульсной температуры с помощью поясов Роговского одновременно фиксировались осциллограммы токов в разрядной ячейке и ускоряющем промежутке, а также ускоряющее напряжение с помощью высоковольтного щупа Актаком АСА-6039 (1:1000).

Для измерения распределения плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца для разных режимов облучения использовался секционированный калориметр, состоящий из 9 линейно расположенных медных датчиков – цилиндров Фарадея, закрытых плоской диафрагмой с диаметром отверстий 3 мм и расстоянием между центрами соседних датчиков 8 мм, соединенных с терморезисторами и системой автоматического считывания показаний с них непосредственно после импульса электронного воздействия.

Характерные импульсы тока имеют форму трапеции с фронтами 25 мс, длительностью 100 мс на полувысоте, при ускоряющем напряжении 13 кВ. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы токов разряда и электронного пучка и температуры поверхности образца, которая после калибровки для титанового сплава BT1-0 вычисляется, как $298+199 \cdot U$, где U – величина напряжения (2 В/дел.).

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.).

Распределение плотности энергии на коллекторе, снятое с помощью секционированного калориметра для тока пучка 40, 75 и 105 А, показано на рис. 3.

Рис. 3. Распределение плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца; 1 – $E=8$ Дж/см²; 2 – $E=15$ Дж/см²; 3 – $E=20$ Дж/см².

Численные расчеты

Тепловые процессы в металле, обрабатываемом интенсивным низкоэнергетическим электронным пучком, описываются уравнением теплопроводности, с учетом фазового перехода, температурной зависимости теплофизических коэффициентов и граничных условий на поверхности образца Γ :

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\text{grad}(T)),$$

$$-\lambda(\nabla T)_{\Gamma} + [\alpha_c(T - T_c) + \sigma\varepsilon_0(T^4 - T_w^4)]_{\Gamma} =$$

$$= p(r, z, t)|_{\Gamma},$$

где $c(T)$, $\rho(T)$ и $\lambda(T)$ – теплоемкость, плотность и теплопроводность, зависящие в общем случае от температуры и координат, $K(T)=\{c(T), \rho(T), \lambda(T)\}$; α_c – коэффициент внешнего теплообмена; T_c – температура окружающей среды; T_w – температура стенок камеры (для вакуума); σ – постоянные Стефана-Больцмана; ε_0 – коэффициент черноты; $p(r, z, t)$ – функция, характеризующая внешний источник нагрева, которая определяется в соответствии с экспериментальной мощностью $U(t)I(t)$ (рис. 2) в ускоряющем промежутке (на расстоянии 40 см от мишени) и суммарного радиального

распределения плотности энергии пучка на мишени (рис. 3): $p(r, z, t) = U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$, r_0 – средний радиус пучка. При энергии электронов 13 keV, длительности импульса 100 μ s и радиусе пучка 2 см можно считать источник энергетического воздействия поверхностным, а тепловые процессы рассматривать в одномерном приближении.

Эксперименты и расчеты проведены для четырех случаев плотности энергии и длительности импульса пучка: 8, 15, 20 J/cm² ($\tau = 100 \mu$ s) и 20 J/cm² ($\tau = 200 \mu$ s). Анализ экспериментов для алюминиевой мишени показал (в отличие от титана) существенную нелинейность температуры поверхности в конце переднего фронта тока пучка от мощности пучка $T(P)$ при $P < 1.5$ kW, что в первую очередь, связано с большой теплопроводностью $\lambda(T)$ для алюминия, влияющей на энерговклад пучка на границе мишени.

Численное решение уравнения теплопроводности проведены с учетом зависимостей теплофизических коэффициентов $K(T)$ от температуры, экстраполированных в соответствии с данными [4]. Расчеты показали, что в рассматриваемом диапазоне плотности энергий 8 – 20 J/cm² расчетные плотности энергии пучка на мишени превышают экспериментальные (при соответствии максимальных значений температуры): для алюминия на 16 – 36 J/cm² ($r_0 = 1.33 – 1.35$ см), а для титана на 9 – 18 J/cm² ($r_0 = 1.6 – 1.75$ см).

При решении уравнения теплопроводности при электронно-пучковом воздействии на мишень авторами [5, 6] используются постоянные теплофизические коэффициенты и прямоугольные импульсы мощности пучка. Вычисления, проведенные при постоянных теплофизических коэффициентах $K = \text{const}$ [$c = 1000$ J/(kg·K), $\rho = 2600$ kg/m³, $\lambda = 93$ W/(m·K)] показали, что соответствие экспериментальной и расчетной температуры алюминия для плотности энергии (8, 15, 20 J/cm² ($\tau = 100 \mu$ s) и 20 J/cm² ($\tau = 200 \mu$ s)) имеет место при

средних радиусах $r_0 = 1.7, 1.65, 1.47$ и 1.5 см, соответственно. На рис. 4 для случая плотности энергии $E = 8$ J/cm² показана экспериментальная и расчетная температура на поверхности в точке $r = 0$ для модельного прямоугольного ($p = E/t_{\text{имп}}$, $\tau = 100 \mu$ s) и экспериментального импульса мощности пучка $U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$; вычисления температуры проведены при постоянных теплофизических коэффициентах $K = \text{const}$ (сплошные линии) и с учетом их зависимости от температуры $K = K(T)$ (пунктирные линии). Из рис. 4 видно, что температура для прямоугольных импульсов при $E = 8$ J/cm² и $\tau = 100 \mu$ s значительно отличается от экспериментальной. Расчетная температура для экспериментального импульса мощности пучка получена для средних радиусов пучка 1.65 см ($K = \text{const}$) и 1.35 см ($K = K(T)$). Как видно из рис. 4, расчетная скорость роста температуры на фронте тока пучка ниже экспериментальной, как для прямоугольного импульса плотности мощности ($p = E/t_{\text{имп}}$), так и для импульса с плотностью мощности $p(t) = U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$.

Рис. 4. Расчетные и экспериментальная (красная линия) температура поверхности алюминия при $E = 8$ J/cm²; $p = E/t_{\text{имп}}$ ($\tau = 100 \mu$ s) (---); $p(t) = U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$ (—); $r_0 = 1.65$ см, $K = \text{const}$ (синие линии); $r_0 = 1.35$ см, $K = K(T)$ (зеленые линии).

Более высокая скорость роста температуры поверхности $(4 – 6) \cdot 10^7$ deg/s в эксперименте, чем в расчетах может быть связана с изменением во время импульса распределения плотности пучка (среднего радиуса пучка $r_0 = r_0(t)$), что обусловлено процессами формирования плазменного канала и транспортировки пучка в

неоднородном магнитном поле. Экспериментальные и расчетные зависимости температуры поверхности ($r=0$) с учетом изменения среднего радиуса пучка $r_0(t)$ приведены на рис. 5 для алюминия и на рис. 6 для титана, теплофизические параметры титана K : $c = 680 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\rho = 4505 \text{ kg/m}^3$ и $\lambda = 22.3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Здесь зависимость $r_0(t)$ включает в себя как ошибки измерения, так и некорректность решения при $K = \text{const}$ и динамику радиального распределения плотности мощности пучка.

Рис. 5. Расчетная (---) и экспериментальная (—) температура поверхности алюминия; 1 – $E = 8 \text{ J/cm}^2$; 2 – $E = 15 \text{ J/cm}^2$; 3, 4 – $E = 20 \text{ J/cm}^2$; $\tau = 100 \text{ μs}$ (1, 2, 3), $\tau = 200 \text{ μs}$ (4).

Рис. 6. Расчетная (---) и экспериментальная (—) температура поверхности титана; 1 – $E = 8 \text{ J/cm}^2$; 2 – $E = 15 \text{ J/cm}^2$; 3 – $E = 20 \text{ J/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ μs}$.

На рис. 7 показаны зависимости среднего радиуса $r_0(t)$ и плотности

мощности $p(t)$ электронного пучка от времени в центре мишени.

Из рис. 5 и рис. 6 видно удовлетворительное согласие экспериментальной и расчетной температуры при соответствии расчетной и экспериментальной плотности мощности пучка на мишени. Расчетная температура алюминия несколько выше экспериментальной даже при расплаве поверхности, когда температурная зависимость $K = K(T)$ практически отсутствует. Это может быть связано с влиянием процессов рассеяния и эрозии поверхности алюминиевой мишени на радиальное распределение плотности тока и энергию электронов.

Рис. 7. Динамика среднего радиуса $r_0(t)$ и плотности мощности электронного пучка на алюминиевой мишени ($r=0$): $E = 8 \text{ J/cm}^2$ (синяя); $E = 15 \text{ J/cm}^2$ (красная); $E = 20 \text{ J/cm}^2$ (зеленая), $\tau = 100 \text{ μs}$; $E = 20 \text{ J/cm}^2$ (черная), $\tau = 200 \text{ μs}$.

Плавление и кристаллизация приводят к появлению особенностей в характере температурных кривых, связанных с фазовым переходом первого рода и наличием теплоты перехода. Чем выше скорость охлаждения, тем длиннее полочка на зависимости $T(t)$. Расхождение расчета и эксперимента (рис. 5 и рис. 6) связано с тем, что в расчетах не учитывалась низкоэнергетическая составляющая на заднем фронте тока пучка, обусловленная плазменными ионами. Как видно из рис. 5, в условиях эксперимента температура

кристаллизации алюминия составляет ≈ 639 °С, а титана ≈ 1387 °С. При обработке титана интенсивным импульсным низкоэнергетическим электронным пучком высокая степень переохлаждения и процесс кристаллизации может протекать при температурах значительно ниже температуры плавления. Это связано с переходом одной кристаллической модификации в другую, температурный порог этого процесса зависит от длительности нагрева, степени предварительной деформации, величины зерна до деформации и т. д. [7].

Заключение

Измерение температуры поверхности алюминия и титана в импульсе высокоскоростного воздействия на него энергии электронного пучка и сравнение с результатами численных расчетов показало, что скорость нагрева поверхности зависит от основных характеристик электронного пучка, а также от динамики распределения плотности мощности пучка на мишени.

Температура кристаллизации поверхности алюминия совпадает с температурой плавления, а кристаллизация поверхности титанового сплава ВТ1-0 протекает при температуре на ≈ 280 °С ниже температуры его плавления.

Методика измерения импульсной температуры и использование численного моделирования тепловых полей в образце открывает возможность управления основными технологическими параметрами электронно-пучкового воздействия с целью получения заранее заданных свойств поверхности материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00091).

Список литературы

- [1] Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Materials surface processing by directed energy techniques. Paris: Elsevier. 2006. 763 p.
- [2] Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Тересов А.Д. // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. №. 4. С. 23–31.
- [3] Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 10. P. 1890–1896.
- [4] Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
- [5] Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Иванова О.В., Иконникова И.А., Ткаченко А.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 4. С. 46–51.
- [6] Ivanov Y.F., Kry'sina O.V., Petrikova E.A., Ikonnikova I.A. // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 683. P. 569–575.
- [7] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение. 1990. 528 с.