

**ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ ТИТАНОМ ПОСРЕДСТВОМ
ОБЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ Ti (ПЛЕНКА) / Al (ПОДЛОЖКА), ИНТЕНСИВНЫМ
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ – АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

М.Е. Рыгина, О.В. Иванова, И.А. Иконникова

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: 1-7755me@mail.ru

**ALUMINIUM SURFACE ALLOYING THE TITAN BY MEANS OF RADIATION OF Ti SYSTEM
(FILM) / Al (SUBSTRATE), THE INTENSIVE PULSE ELECTRON BEAM - ANALYSIS OF
THERMAL PROCESSES**

M.E. Rygina, O.V. Ivanova, I.A. Ikonnikova

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: 1-7755me@mail.ru

Computer simulation of temperature fields formed in the radiation of system film/substrate intense electron beam irradiation. Essential distinctions in formation of a temperature field in films of the titan located on aluminum and in a massive sample of the titan are revealed.

Титан является одним из элементов, добавка которого в сплавы на основе алюминия приводит к измельчению зерна в отливках и слитках, что существенно повышает прочность и равномерность свойств материала [1]. С другой стороны, формирование интерметаллидных фаз, имеющее место при сплавлении титана с алюминием, может привести к охрупчиванию материала [2, 3]. Вероятность образования интерметаллидов и их количество определяются скоростями диффузионного обмена и химической реакции, которые зависят от температурно-временных условий взаимодействия металлов в процессе плавления.

Цель настоящей работы – численное моделирование тепловых процессов, имеющих место при легировании поверхности алюминия титаном методом жидкофазного перемешивания системы пленка/подложка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Задача о нахождении температурного поля в определенном диапазоне плотности энергии электронов сводится к решению уравнения теплопроводности [4]. Рассматривается одномерный случай нагрева и охлаждения пластины толщиной d . При этом объектом физического воздействия является система из массивного образца (подложка) с тонким слоем (пленка) толщиной d_1 на нём. Система координат выбрана так, что ось x направлена вглубь образца. При $x = 0$ задан тепловой поток, а на тыльной стороне пластины теплообмен отсутствует. В месте стыковки материалов внутри пластины предполагается равенство температур и тепловых потоков по обе стороны от границы раздела [4]. Для численного

решения поставленной задачи использована разностная сетка с шагом τ по времени: $t_j = j\tau$ и с шагом h по пространству: $x_i = ih$, здесь j – номер слоя по времени, i – номер слоя по пространству. Значение температуры определяется в узлах сетки. Используется аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности с первым порядком по времени и со вторым по пространству, при этом была выбрана неявная схема [4]. На основе численного решения уравнения теплопроводности проведено моделирование температурных полей при электронно-пучковой обработке поверхности системы пленка (титан) / подложка (алюминий), образцов титана и алюминия. Расчеты выполнялись для интенсивного электронного пучка с плотностью энергии E_s , изменяющейся в диапазоне от 5 Дж/см² до 40 Дж/см² и длительностью импульса 50 мкс. Толщина пленки титана $d_1 = 5 \cdot 10^{-7}$ м, подложки алюминия, а также образцов алюминия и титана $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м, шаг по пространству $h = 5 \cdot 10^{-8}$ м, время наблюдения 600 мкс, шаг по времени $\tau = 3$ мкс. Учет плавления и испарения материала проводился из следующих физических соображений [5]. При достижении ячейкой температуры плавления T_m , ее температура фиксировалась и полагалась равной температуре плавления, а все подводимое тепло, предполагалось, идет на плавление образца до перехода вещества в жидкое состояние. Процессы кристаллизации, испарения и конденсации моделировались аналогичным образом.

Результаты расчетов температурных полей, формирующихся в системе пленка (титан) / подложка (алюминий) и в массивном образце титана, облученных интенсивным электронным пучком, представлены на рис. 1 – рис. 2. Отчетливо видно, что поведение титана, подвергнутого электронно-пучковой обработке, существенным образом зависит от его состояния (массивный образец или пленка на поверхности массивного образца алюминия). А именно, температура плавления поверхности массивного образца титана (рис. 1, кривая 1) достигается при значениях $E_s = 8$ Дж/см², тогда как у пленки титана, расположенной на алюминии, при существенно больших значениях E_s , равных 17 Дж/см² (рис. 1, кривая 2). Соответственно этому, время существования двухфазного (жидкая + твердая фазы) (рис. 2, а) и однофазного (жидкость) (рис. 2, б) слоев, а также толщины этих слоев (рис. 2, в, г) при одинаковых значениях E_s для пленки титана, расположенной на подложке алюминия, значительно меньше, по сравнению с массивным образцом титана.

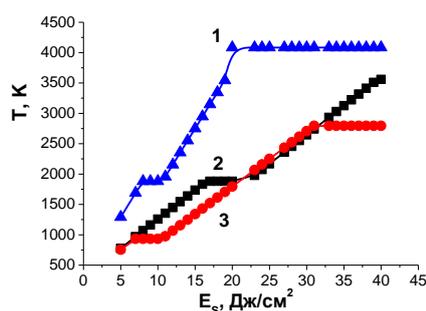


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры прогрева поверхности титана (кривая 1), пленки титана, лежащей на алюминии (кривая 2), и подложки алюминия (кривая 3), облученного электронным пучком, от плотности энергии пучка электронов ($t_0 = 50$ мкс).

Для системы пленка (титан)/подложка (алюминий) реализуется следующая ситуация. Алюминий начинает плавиться уже при облучении электронным пучком с $E_s = 7$ Дж/см², пленка титана – при облучении электронным пучком с $E_s = 17$ Дж/см² (рис. 1). Следовательно, к моменту начала плавления

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

пленки титана подложка алюминия находилась в двухфазном состоянии (жидкая + твердая фазы) 90 мкс (рис. 2, а), а в однофазном (жидкая фаза) состоянии 39 мкс (рис. 2, б). Толщина двухфазного (жидкая + твердая фазы) слоя на поверхности подложки алюминия 37 мкм (рис. 3, а), однофазного (жидкая фаза) слоя – 19 мкм (рис. 3, б).

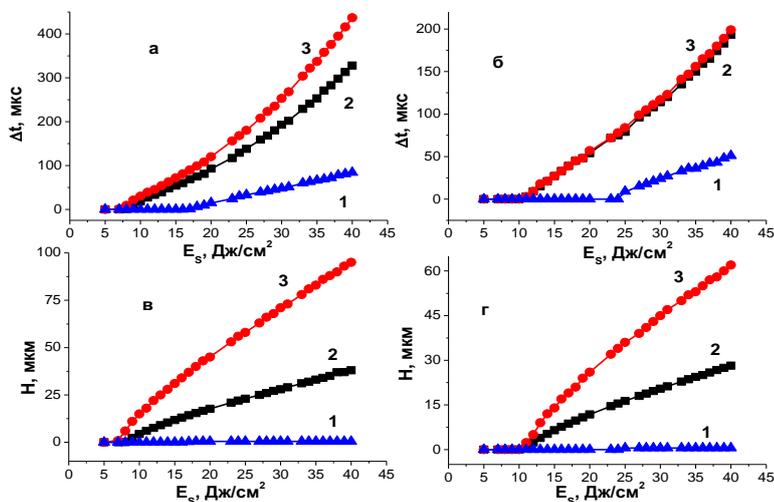


Рис. 2. Зависимость времени существования (а, б) и толщины (в, г) двухфазного (жидкая + твердая фазы) слоя (а, в) и слоя жидкой фазы (б, г) на поверхности алюминия (кривая 3), титана (кривая 2) и пленки титана, лежащей на алюминии (кривая 1), облученных электронным пучком ($t_0 = 50$ мкс), от плотности энергии пучка с учетом плавления и испарения материала.

Таким образом, результаты моделирования температурного поля позволили выявить пороговые значения параметров пучка электронов (плотность энергии и число импульсов), облучение при которых сопровождается преобразованием структуры поверхностного слоя системы пленка (титан)/подложка (алюминий) в двухфазном (твердая или жидкая фазы) или однофазном (жидкая фазы) состояниях.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-29-00091).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование свойств соединений титановых сплавов с алюминиевыми, медными сплавами, и со сталями / В. М. Годин, А. Ф. Якушин, Н. Д. Машков и др. / Промышленные металлы. М : ВИЛС, ОНТИ, 1996. С. 184-190.
2. Рябов В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. - Киев: Наук. думка, 1983. - 264 с.
3. Гуревич Л. М. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т.7, вып. №6 (109). – С.6-12.
4. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
5. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Charter 6 in Book “Materials surface processing by directed energy techniques”. - P. 205-240. Ed. by Y. Pauleau: Elsevier. – 2006. – 763 p.