

СТИМУЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКАХ ЭЛЕКТРОНОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА В ОБЛУЧАЕМЫХ МИШЕНЯХ

В.В. Арсенюк, Н.И. Базалеев¹, С.Е. Донец¹, В.Ф. Клепиков¹, В.В. Литвиненко¹

Ю.Б. Полторацкий¹, А.Г. Пономарев², В.В. Уваров², В.Т. Уваров²

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев;

¹⁾ Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, г. Харьков;

²⁾ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина

Рассмотрен способ формирования поля сильноточных импульсных пучков электронов и зон их воздействия на твердотельные мишени. Изучены эффекты радиационного воздействия релятивистских импульсных пучков электронов на мишень в условиях размещения фокусирующей коллекторной вставки. Исследованы зоны радиационного воздействия на поверхностях металлических мишеней, структура и элементный состав мишеней до и после облучения.

ВВЕДЕНИЕ

Использование импульсных сильноточных пучков электронов (ИСПЭ) в радиационных технологиях является одним из перспективных направлений развития электрофизики и материаловедения [1]. Среди интенсивно развивающихся современных направлений следует отметить синтез наноматериалов, а также материалов из несмешивающихся компонентов [2], получение которых методами традиционной металлургии затруднительно. В основе существующих способов получения указанных материалов лежат принципы и приемы быстрого подвода энергии к технологическому объекту, сочетающемуся с быстрым охлаждением (скорости изменения температуры опережают процессы нуклеитизации, кристаллизации, фазообразования), а также комплексом внешних воздействий (наложение электромагнитных полей, механическое перемешивание, ультразвуковое воздействие и др.). Известно, что обработка поверхностей металлов и сплавов сильноточными пучками электронов со значащими выделяемой мощностью, достаточными для расплава поверхностного слоя, приводит к инициированию процессов гидродинамического перемешивания расплава. При этом распределение поля скоростей расплавленного вещества мишени зависит от неоднородностей пучка. Учитывая, что в настоящее время получают распространение способы модификации поверхностных свойств, основанные на двухстадийной обработке (предварительное осаждение вещества на поверхности с ее последующей обработкой электронным пучком [3]), возникает задача разработки способов управления траекторией пучка. Эффективное управление внешним магнитным полем связано с трудностями синхронизации момента поступления пучка электронов на мишень и управляющего воздействия полем, обеспечения заданной конфигурации поля и др. Одним из подходов к решению этой задачи

может служить формирование зоны радиационного воздействия ИСПЭ путем установки коллекторной вставки определенной конфигурации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе ставилась задача оценки процессов массопереноса вещества облучаемых мишеней на макро- и микроуровнях. Интерес к решению такого класса задач обусловлен перспективами практических приложений ИСПЭ, подтверждаемых результатами проведенных ранее исследований. Так, например, в работе [4] высказывалось предположение о роли выделения легирующих элементов на границах зерен в повышении сверхпластичных свойств дюралюмина, модифицированного действием ИСПЭ. В работах [5-7] отмечалась роль неоднородностей тока пучка в инициировании процесса абляции и их влияния на динамику выброса газоплазменного факела. В работе [8] отмечалась необходимость учета сил поверхностного натяжения, действующих в материале, выбрасываемом из мишени, которые способны приводить к разрыву жидкого слоя на капли и нарушению сплошности осаждаемого покрытия. Известно также [1], что обработка мощными импульсными пучками приводит к изменению микроструктуры, в частности, к измельчению зерна и может быть использована для повышения эрозионной и коррозионной стойкости нержавеющей стали.

В этой связи поставлены следующие задачи:

- 1) установить влияние перепада поверхности ранее изученных сверхпластично деформируемых сплавов на перераспределение примесных и легирующих элементов;
- 2) провести фрактографические исследования нержавеющей стали, облученной ИСПЭ;
- 3) изучить структуру конденсата, образовавшегося в результате осаждения материала

газоплазменного факела и действия упругоупругих волн.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы сплава Д16 облучались на ускорителе МИГ-1 сплошным пучком электронов со следующими параметрами: фронт импульса 0,3 мкс; длительность импульса 6 мкс; ток пучка 2 кА; энергия частиц 300 кэВ.

Мишени из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титана ВТ8 облучались трубчатым пучком электронов с теми же параметрами в режиме, когда на пути пучка размещалась коллекторная вставка в виде усеченного конуса (изготовленная из меди) (рис. 1), а также без коллекторной вставки. Коллекторная вставка размещалась по оси движения пучка. Диаметры вставки равнялись 30 и 36 мм соответственно, что составляло порядка 0,9...1,1 внутреннего диаметра пучка. Длина конуса 40 мм.

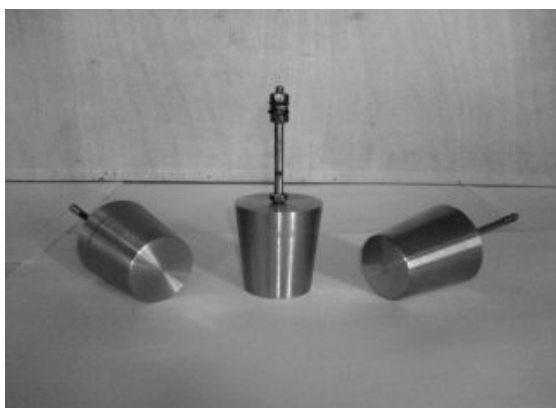


Рис. 1. Коллекторные вставки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для повышения плотности тока ИСПЭ, падающего на мишень, и генерирования мощного импульса давления была использована коллекторная вставка. В основе многих технологических приложений сильноточных импульсных пучков лежат эффекты генерирования импульса давления p в облучаемом объекте [9]:

$$p = \frac{4Wt(\gamma - 1)}{\pi l S^2}, \quad (1)$$

где W – энергия, выделяемая в расплавленном объеме облучаемой мишени; l – глубина проникновения пучка; S – облучаемая площадь мишени;

t – время существования расплавленной полости; γ – соотношения теплоемкостей вещества в расплавленном и твердом состоянии. Очевидно, что с уменьшением площади взаимодействия пучка с мишенью увеличивается давление в мишени. Следует также обратить внимание на время существования расплавленной полости, так как наличие микрокапельных включений (возникновение которых обусловлено разрывом нерасплавившихся поверхностных слоев) в разлетающемся веществе зависит как от энергии

частиц, так и от массовой тормозной способности облучаемого вещества.

Электронный пучок в камере дрейфа ускорителя имеет заданную форму благодаря действию внешнего приложенного магнитного поля, величина которого определяется из условия [8]:

$$\Omega = \frac{eB}{mc} \leq \frac{2}{\gamma_0} \cdot \omega_e, \quad (2)$$

где Ω – электронная циклотронная частота, рад/с; ω_e – электронная плазменная частота в промежутке слой-подложка, рад/с; γ_0 – релятивистский фактор; B – индукция магнитного поля, Тл; m – масса электрона, кг; e – заряд электрона, Кл; c – скорость света, м/с. В процессе прохождения через коллекторную вставку силы электростатического отталкивания экранируются при сохраняющемся действии магнитного поля. Дополнительно на стенки пучка действуют силы взаимодействия с токами изображения, возникающими в приповерхностном слое вставки. Таким образом, происходит уплотнение пучка, что приводит к более интенсивному уносу вещества с поверхности мишени (рис. 2).

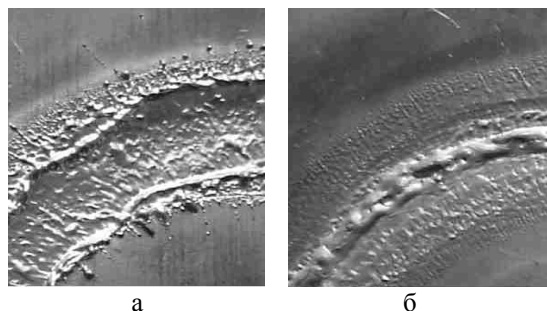


Рис. 2. Поверхности мишеней: а – облучение с коллекторной вставкой; б – облучение без коллекторной вставки

Такое различие в кратерообразовании может объясняться не только повышением плотности тока пучка, но и генерированием упругоупругих ударных волн, возникающих в результате взрывного выброса вещества.

Рассматривая же вопрос возможного использования механизма выброса вещества для его последующей конденсации и получения покрытий либо порошков требуемого размера и структуры частиц, следует отметить, что в ряде случаев необходимо решать задачу деструкции пучка с целью снижения капельной фракции.

Обращаясь к выражению (2), мы видим, что условие деструкции выполняется при ослаблении поля либо при его экранировании. Последнее также может быть достигнуто при определенной конструкции вставки.

Рассматриваемый нами способ обработки обеспечивает скорости остывания расплавленного материала порядка $10^8 \dots 10^9$ К/с. Известно, что быстрозатвердевающие расплавы используются при разработке новых конструкционных материалов с меньшими значениями плотности,

теплопроводности, электросопротивления. Одним из механизмов достижения указанных эффектов является возникновение пористой структуры. С целью установления возможности регулирования степени пористости путем выбора режима облучения изломы участков переплавленных поверхностей обеих образцов были исследованы на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-840.

На фрактограмме скола облученных образцов видны лунки и трубчатые поры (рис. 3). Считается, что они представляют собой углубления, образовавшиеся в результате перколяции (просачивания) расплава в области тройного стыка по межкристаллитным границам. На некоторых участках видна коалесценция пор. Очевидно, в режиме облучения без применения вставок часть переплавленного и выброшенного слоя конденсировалась на поверхности мишени, о чем свидетельствует повышенная неупорядоченная пористость, как правило, не имеющая перспектив технологического применения, тогда как участок с переплавом, уплотненным пучком, характеризуется большей однородностью структуры и равномерным распределением пор.

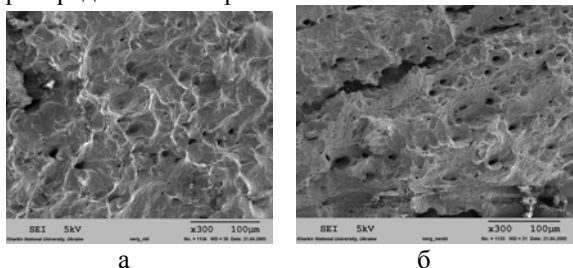


Рис. 3. Фрактограмма низкотемпературного ударного излома облученного участка нержавеющей стали: а – переплав со вставкой; б – переплав без вставки

Обращаясь к анализу эффектов массопереноса элементов расплавленного слоя на микроуровне, например, выпадения из раствора, выделения на границах зерен, следует заметить, что в ряде работ [4, 10] отмечалась неравномерность распределения легирующих добавок в приповерхностных слоях быстрозатвердевших расплавов. Среди трактовок механизмов, объясняющих указанный эффект, в случае обработки поверхности импульсным пучком, в условиях высоких скоростей плавления и кристаллизации заслуживает внимания версия, изложенная в работе [11]. Автором отмечается, что поскольку на границах зерен концентрация дефектов выше, они характеризуются большей степенью разупорядочения, следовательно, процесс плавления начинается именно на границах. Вполне возможен процесс вытеснения на поверхность жидкой фазы, возникающей в зоне термического влияния пучка, где значение температуры не достаточно для плавления матрицы. Следует заметить, что пониженная температура плавления на границах зерен алюминия была установлена в работе [11]. Основанием для подтверждения указанных механизмов может служить определение

профиля распределения легирующих элементов в поверхностном слое сплава.

Исследования состава поверхности образцов сплава Д16 проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на спектрометре XPS-800 Kratos. Вакуум в камере прибора составлял 5×10^8 Торр. Фотоэлектроны возбуждались MgK_{α} -излучением (1253,6 эВ). Параметры активирующего рентгеновского излучения: $U=15$ кВ, $J=20$ мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра — 1 эВ; точность определения энергии связи — 0,3 эВ. Спектры обрабатывались на компьютере: проводилось сглаживание, вычитание постоянного фона и фона неупругих потерь по методу Shirley, удаления уширяющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты.

Состав поверхности образца определялся по отношению площадей линий $C1s$, $O1s$, $Al2p$, $Mg2p$, $Fe3p$, $K2p$, $Ti2p$ – основных облучек и $ZnLMM$ -ожелинии с учетом коэффициентов чувствительности. Анализ содержания меди, марганца и натрия затруднен из-за перекрывания их линий с линиями основных элементов (Al, Mg, O соответственно). Анализ соединений проводился по разложению линии $Al2p$ на составляющие. Толщина анализируемого слоя составляла до 250 нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеводородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме (Ar^+ , $E=2,5$ кэВ, скорость распыления 100 А/мин). Соотношения атомарных концентраций элементов на поверхности образцов приведены в таблице.

	Mg/Al	Zn/Al	Al/Al ₂ O ₃
исходн. -50 нм (Ar^+)	0,031	0,0019	2,6
исходн. -150 нм (Ar^+)	0,027	0,0005	3,4
исходн. -250 нм (Ar^+)	0,018	0,0018	4,0
облуч. -50 нм (Ar^+)	0,0395	0,0085	2
облуч. -150 нм (Ar^+)	0,0359	0,0022	2,4
облуч. -250 нм (Ar^+)	0,0324	0,0023	2,9

Ранее нами при исследовании сверхпластичных свойств облученного сплава Д16 было установлено сокращение в 5 раз (по сравнению с необлученным) длительности неустойчивой ползучести в режиме сверхпластической деформации [4]. Как видно из таблицы, в облученном слое концентрация

магния выше, чем в необлученном, хотя в обоих образцах наблюдается убывание по глубине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке технологий получения покрытий путем испарения вещества трубчатыми сильноточными импульсными пучками электронов в качестве средства фокусирования энергии, выделяемой в мишени, целесообразно использовать эффекты электродинамического взаимодействия тока пучка с токами наведения в коллекторных вставках. Возникающие при разлете испарившегося вещества гидродинамические неустойчивости приводят к несплошности конденсируемых пленок.

Переплавление поверхности мишени мощным пучком электронов приводит к преимущественному выделению на поверхности легирующих добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.M. Neklyudov, V.V. Yuferov, L.G. Sorokovoy et al. The powerful pulsed electron beam effect on the metallic surfaces // *Problems of atomic science and technology*. 2001, №5(39), p. 191–193
2. О.А. Троицкий и др. *Физические основы и технологии обработки современных материалов*. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 468 с.
3. К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк и др. *Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов*. М.: Изд-во МГУ, 2005, 640 с.
4. В.В. Брюховецкий, В.В. Литвиненко, В.Ф. Клепиков, Р.И. Кузнецова и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина // *Физика и химия обработки материалов*. 2002, №4, с. 33–38.
5. Н.И. Базалеев, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков и др. Формирование аморфизированного наплава при воздействии импульсного трубчатого пучка электронов на поверхность металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (88). 2005, №5, с. 146–149.
6. В.В. Уваров, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко и др. Модификация свойств поверхностных слоев сталей и сплавов сильноточным РЭП микросекундной длительности // *Там же*. (84). 2003, №6, с. 86–88
7. В.П. Ротштейн. Модификация структуры и свойств материалов электронными пучками: Автореф. докт. дис., 1995, 37 с.
8. В.Ф. Клепиков, А.В. Пашенко, А.Г. Пономарев и др. Дистанционное нанесение покрытий сильноточным релятивистским электронным пучком // *Физика и химия обработки материалов*. 2006, №3, с. 24–28.
9. Б.А. Демидов, М.В. Ивкин, В.В. Обухов, Ю.Ф. Томашук. Динамические характеристики взаимодействия мощных РЭП с толстыми анодами // *Журнал технической физики*. 1980, т. 50, в. 10, с. 2209–2214.
10. И.И. Ташлыкова-Бушкевич, В.С. Кулинаускас, В. Веш и др. Послойный элементный анализ быстрозатвердевающих сплавов Al-Co // *Физика и химия обработки материалов*. 2004. №3, с. 75–80
11. А.Р. Уббеллоде. *Расплавленное состояние вещества*. М.: «Металлургия», 1982, 372 с.

СТИМУЛОВАННЯ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ В СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПУЧКАХ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОЦЕСИ МАСОПЕРЕНОСУ В ОПРОМІНЮВАНИХ МІШЕНЯХ

В.В. Арсенюк, М.І. Базалеев, С.Є. Донець, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Ю.Б. Полторацький, А.Г. Пономарьов, В.В. Уваров, В.Т. Уваров

Розглянуто спосіб формування полів сильнострумових імпульсних пучків електронів та зон їх впливу на твердотільні мішені. Вивчено ефекти радіаційного впливу релятивістських імпульсних пучків електронів на мішень в умовах застосування фокуруючої колекторної вставки. Досліджено зони радіаційного впливу на поверхнях металічних мішеней, структуру та елементний склад мішеней до і після опромінення.

STIMULATION OF HETEROGENEITY IN HIGH CURRENT ELECTRON BEAM AND ITS INFLUENCE ON MOLDEN PULP PROCESSES IN IRRADIATED TARGETS

V.V. Arsenyuk, M.I. Bazaleev, S.E. Donets, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, Yu.B. Poltoratskiy, A.G. Ponomarev, V.V. Uvarov, V.T. Uvarov

The method of formation of field of high current pulse electron beam and zones of their influence on the solid state targets is considered. The effects of radiation influence of relativistic pulse electron beams on the target under the focused interposition are studied. The zones of irradiation of surface of the metal targets, their structure and element composition before and after irradiation are investigated.