

## О НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОВЕРХНОСТЯМИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*И.М. Неклюдов, В.Б. Юферов, Л.Г. Сороковой, О.С. Друй, Н.А. Косик, Е.В. Муфель,  
И.В. Буравилов, В.И. Ткачев, А.Н. Пономарев*

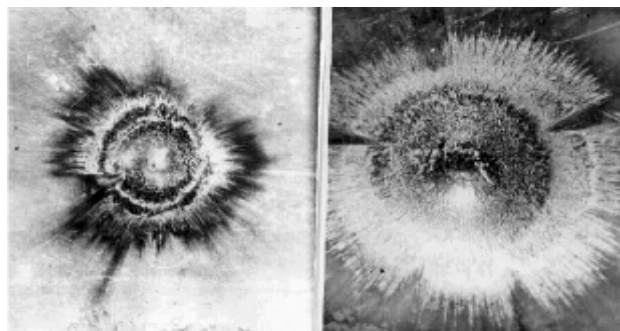
*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"  
Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая 1,  
v.yuferov@kipt.kharkov.ua*

Рассмотрены процессы определяющие механизм абляции. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния мощных импульсных электронных пучков на структуру поверхности и твердость нержавеющей стали X18H10T. Установлено, существенное влияние плотности мощности излучения на структуру стали. Импульсное воздействие мощными пучками электронов приводит к оплавлению поверхности, повышению твердости приповерхностных слоев.

При облучении твердых тел мощными потоками ионов, электронов, фотонов, в них одновременно протекает комплекс процессов. Это высокоскоростной нагрев, оплавление, испарение, выброс плазмы и нейтральных паров с поверхности, благодаря чему появляется давление отдачи -  $p$ , возникающее при испарении вещества при импульсном воздействии излучения на мишень, которое оказывается в  $10^4 \dots 10^5$  раз больше давления самого светового луча или пучка частиц и может достигать величин в  $10^4$  и более атмосфер. Величина давления может быть выражена соотношением  $p \approx \alpha \cdot W \cdot v_{||} / \Lambda$ , где  $W$  – плотность энергии луча,  $v_{||}$  – скорость истечения паров,  $\alpha$  – доля энергии луча, переходящая в испарение,  $\Lambda = \Lambda_0 + \frac{1}{2} v_{||}^2$  – удельная энергия испарения, ионизации, разгона паров и ускорения плазмы. При больших  $W$ ,  $\alpha \rightarrow 1$ . Этот процесс позволяет эффективно переводить энергию пучка в направленное движение тела и таким образом управлять его движением. Далее это генерация динамических напряжений в твердом теле, распространение ударных волн, радиационно и термоградиентно стимулированный перенос вакансий, примесей и др. Быстрый нагрев и охлаждение приводят к существенному изменению структурно-фазового состояния в приповерхностных слоях и, соответственно, к модификации структурно-зависимых свойств материалов. Многообразие этих процессов, объединяемых единым названием абляционных процессов, определяется, в основном, сортом бомбардирующих частиц, величинами удельных мощностей и энергий пучков, поскольку длина пробега частиц в твердом теле, в существенной мере, определяет величину удельного энерговыделения. В этом плане и ионы и фотоны имеют преимущества перед электронами, однако, сложность установок в случае ионов и сравнительно малый КПД, в случае фотонов, оставляют электронные пучки достаточно привлекательным инструментом не только для исследований, но и для практических применений.

Настоящая работа является кратким обзором работ, проводившихся по этой проблеме [1-4].

Эксперименты проводились на импульсных электронных ускорителях с уровнем мощностей  $10^8 \dots 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> и плотностей энергий до 100 Дж/см<sup>2</sup>. Энергий пучков лежали в диапазоне 20÷300 кэВ, длительность: 40 нс и 1 мкс, без ведущего магнитного поля. При чем, если в первом случае, при больших плотностях мощности, площадь взаимодействия составляла несколько квадратных сантиметров, и в этих условиях проводились эксперименты по определению передаваемых импульсов, то во втором случае, площадь воздействия составляла около 100 см<sup>2</sup> и при необходимости могла быть увеличена на несколько раз. По величине деформации мишени, убыли ее массы определялись величины передаваемых импульсов. На рис. 1 представлены фотографии мест воздействия пучков на поверхности. При мощностях более  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в местах взаимодействия образуются кратеры, с выбросом материала подложки в виде ионов, нейтральных атомов и кластеров.



*Рис. 1. Вид поверхности в зоне воздействия пучка электронов с энергией 300 кэВ и плотностью мощности  $5 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>*

Вылет последних наблюдается преимущественно в диапазоне малых углов к поверхности и вокруг кратера они, при осаждении образуют валик. В этих же условиях наблюдается вынос на поверхность большого количества рассеянных в объеме материала примесей, что может объясняться высокими величинами коэффициентов диффузии,

как радиационно стимулированной, так и термоградиентной. Так например, при бомбардировке меди на поверхности появляется значительное количество цинка. Величина удельного импульса, передаваемая твердому телу снижается при увеличении количества многозарядных ионов в плазменном факеле, что объясняется увеличением доли энергии, идущей на увеличение зарядности ионов, а не на ускорение частиц плазменного факела. Давление в области взаимодействия может быть выражено как

$$p = \frac{4 \cdot W \cdot t \cdot (\gamma - 1)}{\pi \cdot L \cdot D^2},$$

где  $L$  – длина пробега электронов в материале анода.

Изменение массы мишени  $\Delta M = \Delta \bar{M}_z + \Delta \bar{M}_k + \Delta \bar{M}_p$ , где индексы  $z, k, p$  – относятся к газовой, капельной и плазменной фазам.

Энергозатраты пучка,  $Q$  равные его энергосодержанию

$$Q_s = \Delta M \int_0^{T_\phi} c dT + Q_{\text{плав}}^{\Delta M} + Q_{\text{исп}}^{\Delta M} + \Delta M_p \phi_i' + \Delta M_p kT + Q_s^{\text{omp}} + h\nu$$

$\Delta M_p \phi_i'$  – потери на ионизацию. Как видно из уравнения, удельные энергозатраты, идущие на ускорение мишени снижаются при повышении удельной мощности пучка, поскольку увеличиваются энергозатраты на повышение плазменных параметров, в частности, на повышение многозарядности ионов, другими словами увеличиваются ионизационные потери. Следующим важным параметром является энергия пучка. На рис. 2 представлена зависимость энергозатрат  $Q_s$ , при полном испарении мишени на глубине пробега пучка,  $\frac{1}{3} l_c$ , в зависимости от энергии пучка (КэВ) для площади пучка  $S = 1 \text{ см}^2$ .

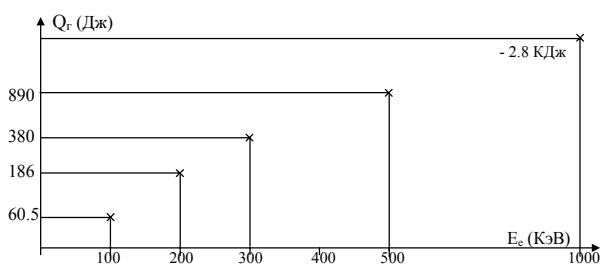


Рис. 2. Энергозатраты на испарение Al в зависимости от энергии пучка

Эти данные служат ориентиром для прогноза необходимых параметров электронных пучков. Таким образом, абляция с помощью РЭП будет существенно отличаться от лазерной именно меньшей величиной объемного тепловыделения и большей долей газокапельной фазы, выходящей в тангенциальном направлении. Кроме того, должны отмечаться интенсивные колебания абляционного давления, определяющиеся плазма-пучковым взаимодействием, что может быть зарегистрировано

как в плазме, так и в твердом теле. Поэтому для передачи максимальных удельных импульсов целесообразно использовать умеренные величины плотностей мощности пучков и минимально возможные энергии.

При плотностях  $10^9 \div 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  перегрев поверхности вызывает местное оплавление поверхности. Как правило, в этих условиях происходит и модификация структуры, а также изменение прочностных и коррозионных свойств поверхности.

После воздействия пучка электронов с энергией до 300 кэВ и плотностью мощности до  $10^9 \text{ Вт/см}^2$  на ускорителе ВГИК [5] на поверхности облученной пластины можно выделить две зоны – центральная и периферийная (Рис. 3,а). В центральной зоне виден рельеф, напоминающий зёрненную структуру с чётким выявлением границ (Рис. 3,б). Внутри зёрен имеются кратеры, по-видимому, соответствующие местам большего локального плавления и испарения металла, а возможно мест выхода газов. В периферийной зоне наблюдаются полосы окисления поверхности металла. Микротвёрдость в центральной зоне составляет Нц 240 кг/мм<sup>2</sup>, в периферийной – Нц 210 кг/мм<sup>2</sup>, что примерно соответствует значению микротвёрдости стали в исходном состоянии.

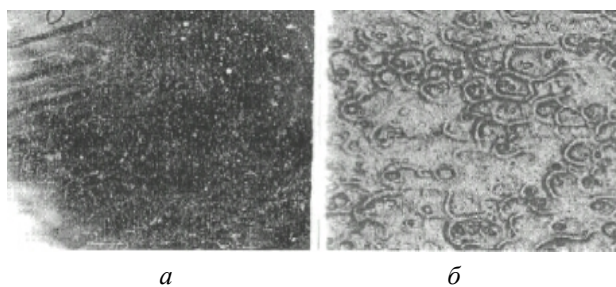


Рис. 3. Структура поверхности стали после импульсного воздействия пучка электронов с энергией до 30 кэВ. Увеличение  $\times 4$  (а) и  $\times 100$  (б)

Облученная область пластин подвержена сильной пластической деформации. Эпицентр облученной поверхности пластины выгибается на 2-3 мм от исходного положения. Области воздействия состоят из нескольких отличающихся по цвету и структуре концентрических зон, количество которых зависит от параметров воздействующего на поверхность пучка. В центре наблюдается структура, типичная для литого металла с сильной неоднородностью по химическому составу (рис. 4,а). К ней прилегающей зоне характерна структура со значительной степенью испарения с поверхности металла и большой плотностью кратеров (рис. 4,б). Подобная структура с кратерами наблюдалась в центральной зоне оплавления при лазерном воздействии на поверхность циркония [6]. В следующих зонах наблюдается высокая плотность кратеров с литой столбчато-дендритной структурой с радиальной направленностью (рис. 4,в). Далее следует исходная структура деформированной и отожженной нержавеющей стали.

Микротвёрдость облученной области поверхности в различных зонах различна. Так для

области взаимодействия, изображенной на рис. 3, а, микротвёрдость в центральной зоне составляет  $250 \text{ кг/мм}^2$ , в следующих двух зонах с мелкозернистой структурой и высокой плотностью кратеров Нц возрастает до  $312 \text{ кг/мм}^2$ , после чего с удалением от центра снижается до исходного значения. Таким образом, в радиальном направлении от центра области взаимодействия пучка электронов с поверхностью микротвёрдость вначале повышается, а затем снижается до исходного значения. При этом отмечается осциллирующий характер зависимости микротвёрдости в радиальном направлении.

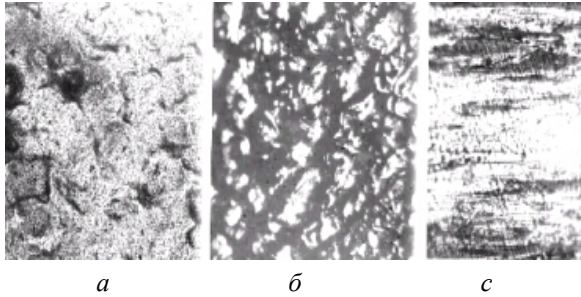


Рис. 4. Микроструктура поверхности облучённой пучками электронов с энергией 300 кэВ  
а - центральная зона; б - прилегающая к центральной зона; в - периферийная зона ( $\times 200$ )

На образце с областью взаимодействия, изображенной на рис. 3 б, исследовалась структура и распределение микротвёрдости по глубине (толщине) облученной пластины. Для этой цели образец был разрезан на электроискровом станке по центру на две половины, из которых изготовлены поперечные шлифы по толщине пластины. Исследовалась микроструктура и производились замеры микротвёрдости по толщине пластины по центру действующего пучка, и по толщине, соответствующей удалённым от центральной зонам. На рис. 5 представлена микроструктура поперечного разреза центральной зоны.

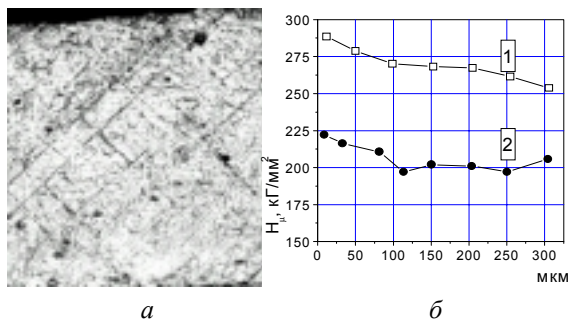


Рис. 5. а – структура поперечного разреза образца в центральной зоне пучка ( $\times 400$ ), б - изменение микротвёрдости по толщине образца по центру пучка (1) и в периферийной зоне (2)

Размер зёрен в середине пластины, примерно, вдвое больше, чем размер зёрен в приповерхностных слоях. Это указывает на различие температуры по толщине пластины при облучении и разных скоростях охлаждения

поверхности и объёма образца после воздействия пучка электронов. После травления шлифа внутри зёрен видны линии скольжения. Результаты измерений микротвёрдости по толщине облученной пластины свидетельствуют, что уровень микротвёрдости по всей толщине образца ( $\sim 300 \text{ мкм}$ ) в эпицентре воздействия пучка, примерно, на 30% выше по сравнению со средним значением микротвёрдости в периферийной зоне.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о существенном влиянии на структуру поверхности исследуемой стали импульсного воздействия мощных пучков электронов. Эффект влияния определяется величинами плотности мощности, энергии пучка и временем воздействия. Создание устройств с регулируемыми параметрами воздействия позволят направленно изменять поверхностно-объёмные свойства материалов и изделий из них.

### Литература

1. Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский., В.П. Ротштейн, Н.И. Лебедева. Низкоэнергетический импульсный электронный пучок большой плотности для поверхностного нагрева // *ДАН СССР*, т. 253, № 6, 1983, с. 1383-1386.
2. В.Б. Юферов., Е.И. Скибенко, Л.Г. Сороковой и др. О возможности использования комплекса импульсного электронного ускорителя для модификации поверхностно-объёмных свойств различных материалов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*, 1997, вып. 1(66), 2(66), с. 197-198.
3. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, В.Ф. Рыбалко, С.В. Шевченко и др. Влияние облучения импульсными потоками плазмы на механические свойства аустенитных нержавеющей сталей X16H15M3B и X18H10T // *Препринт ХФТИ 89-64*, Харьков, 1989. 12 с.
4. И.М. Неклюдов, Н.В. Камышанченко, С.В. Шевченко, В.Ф. Рыбалко и др. Исследование воздействия сгустков водородной плазмы на механические характеристики высокопроводной меди. // *Научные ведомости БГУ*. № 1(6), Белгород, 1998, с. 54-67.
5. В.Б. Юферов, Л.Г. Сороковой, Е.И. Скибенко, Ю.В. Холод, Е.В. Муфель. Некоторые применения высоковольтной мощной импульсной техники. // *ВАНТ. с. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. Вып. 2(10), НИЦ ХФТИ, Харьков, 1999, с. 21-25.
6. И.А. Трегубов, Л.Н. Евсеева, С.Б. Масленников и др. Влияние лазерного воздействия на структурное состояние и коррозионную стойкость циркониевых сплавов. // *ФиХОМ*, 1986, № 2, с. 30-33.