

*О.С. ДРУЙ*, руководитель группы, ННЦ "ХФТИ", Харьков  
*С.В. ШАРЫЙ*, м.н.с., ННЦ "ХФТИ", Харьков  
*В.Б. ЮФЕРОВ*, д-р техн. наук, проф., нач. отдела, ННЦ "ХФТИ", Харьков  
*М.О. ШВЕЦ*, инженер-исследователь ННЦ "ХФТИ", Харьков  
*В.Ф. ТИХОНОВ*, канд. техн. наук, науч. сотрудник ННЦ "ХФТИ", Харьков

### **О ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ВЫСОКИМ ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЕМ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ**

Проведені дослідження дії електронних пучків з високим енерговмістом на поверхню металів. Розглядаються особливості автографів пучків на металах з різною температурою плавлення. Відмічається роль поверхневого натягу у формуванні та здобутті атомно-гладких металевих поверхонь.

Проведены исследования воздействия электронных пучков с высоким энергосодержанием на поверхность металлов. Рассматриваются особенности автографов пучков на металлах с различной температурой плавления. Отмечается роль поверхностного натяжения в формировании и получении атомно-гладких металлических поверхностей.

**Постановка проблемы.** Модификация материалов сильноточными электронными и ионными пучками находит широкое применение в высоких технологиях. Однако, несмотря на обилие экспериментального материала, механизм взаимодействия интенсивных пучков с поверхностью твердого тела еще не до конца изучен. Понимание процесса изменения морфологии поверхности облучаемых образцов может дать ключ к построению физической модели, которая, с одной стороны, может объяснить наблюдаемые результаты, а с другой – позволит контролировать процесс формирования поверхностного слоя. В работах [1,2] исследовалась модификация структуры металлов при их облучении электронами с удельным энергосодержанием до  $\sim 10^2$  Дж/см<sup>2</sup> при мощности  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. При повышении мощности или энерговклада преимущественно наблюдаются уже другие процессы, относящиеся к процессам абляции и т.п. [4] и получаемые результаты могут быть использованы в некоторых технологиях по модификации структуры мишеней.

**Исследования и обсуждение результатов.** Эксперименты про-

водились на ускорителе ДИН-2КМ [5], схема которого дана на рис. 1,а. Обозначения на рис. 1,а: 1 – катод выполненный из латуни в виде иглы, острое которого помещено в диэлектрический канал диаметром 2-5 мм (оргстеклянный кожух с отверстием, для прохождения электронного пучка); 2 – система плазменных пушек, создающих плазменную переемычку в вакуумном коаксиале; 3 – анод-мишени из пластинок стали, меди, никеля и свинца, генератора импульсов тока (ГИТ); 4 – разрядники ГИТ; 5 – разрядник плазменных пушек; 6 – конденсаторная батарея плазменных пушек; 7 – пояс Роговского; 8 – осциллограф.

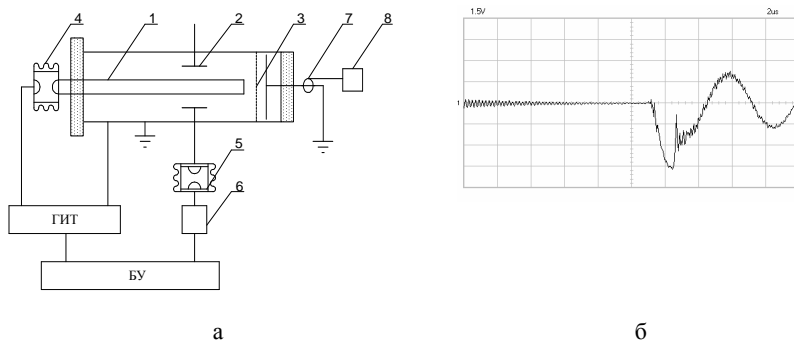


Рис. 1.

Вакуумная система ускорителя включает в себя форвакуумный и диффузионный насосы, позволяющие поддерживать давление в системе до  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр.

Схема управления ускорителя регулирует напряжение на ГИТ, конденсаторах плазменных пушек и задержку запуска ГИТ относительно импульса тока на плазменных пушках. Плазменные пушки инжектируют плазму в коаксиал системы, создавая плазменный ключ, через который, спустя 3-20 мкс, пропускается ток ГИТа. При достижении максимальной величины тока ГИТ плазменный ключ открывается, происходит разрыв тока в цепи, на катоде возникает ЭДС  $U = Ldi / dt$ , которая в несколько раз превышает первичное напряжение на ГИТ. Благодаря взрывной эмиссии возникает ток пучка электронов порядка 100 кА

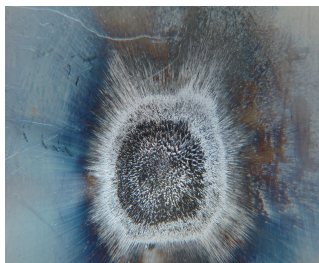
При прохождении электронного пучка по диэлектрическому каналу происходит компенсация его объемного заряда плазмой и снижается его расфокусировка. В результате происходит повышение мощности пучка до  $\sim 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Токовая характеристика приведена на рис. 1,б. Как известно, в ускорителях с индуктивными накопителями элек-

тронный пучок получается из-за разрыва плазменного мостика, первоначально созданного в коаксиальной системе ускорителя. После этого ток быстро изменяется и появившееся на торце коаксиала напряжение  $U = L di / dt$  приводит к взрывной эмиссии и появлению импульса электронного пучка, составляющего  $\sim 2/3$  от тока разряда через коаксиальную систему. В данном случае это  $U \approx 230$  кВ,  $\Delta t \approx 30$  нс,  $I \approx 15$  кА. Поскольку передача энергии разряда в пучок не 100%, после прохождения электронного пучка продолжается ток разряда. Как видно из осциллограммы, рис. 1,б этот ток длится еще несколько микросекунд. Этот разряд также воздействует на мишень, но со значительно меньшими мощностями.

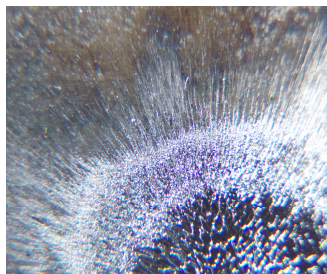
Отпечаток пучка на нержавеющей стали представлен на рис. 2,а,б. Явно видны три зоны. Внутренняя (рис. 2,а), где собственно происходит выделение энергии пучка, импульсный нагрев мишени, ее испарение, место откуда вылетает плазма, заряженные и нейтральные частицы. Вторая – место осаждения капельной компоненты. Третья – радиальные отпечатки треков жидких капель, являющиеся автографами капельной фазы, вылетающей из кратера под большими углами к направлению движения электронного пучка (рис. 2,б).

Капельная фаза, касаясь горизонтальной поверхности металла, оставляет на ней часть своего содержимого. Эти следы быстро остывают и затвердевают в виде микроскопических валиков, видных на фото. Среди этих отпечатков есть и следы катодных пятен униполярных дуг которые продолжают воздействовать на мишень в области автографа после прохождения электронного пучка. Суммарный ток вакуумных дуг находится на уровне  $\sim 10$  кА (ток разряда). Однако их существование кратковременно, несколько микросекунд, и эрозия оказывается сравнительно небольшой, значительно меньшей, чем абляционный выброс из кратера, созданного пучком.

Такая же картина наблюдалась и на других металлах, кроме свинца, автографы которого приведены на рис. 3. Отсутствуют радиальные треки, но имеются следы типа блистеров, определяющиеся газовыделением из объема мишени. Существенное различие этих фото объясняется длительным существованием жидкой фазы, определяемой температурой плавления. У металлов с высокой температурой плавления мало время сохранения жидкой фазы – это десятки микросекунд, у металлов с низкой температурой плавления эти времена на  $\sim 2-3$  порядка выше. За это время силы поверхностного натяжения устраняют все шероховатости в виде радиальных штрихов, возникшие из-за автографов капельной фазы и действия вакуумных дуг рис. 2.

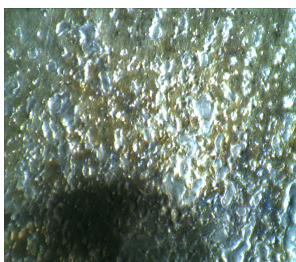


а

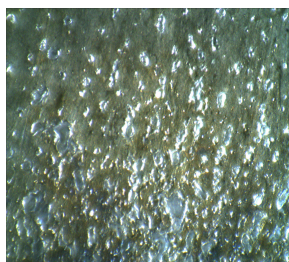


б

Рис. 2.



а



б

Рис. 3.

Тепловой расчет, проведенный по методике [5] и представленный на рис. 4, подтверждает сказанное выше. Время охлаждения мишеней из нержавеющей стали ~20 мкс рис. 4 и свинца ~1,5 мс рис. 5.

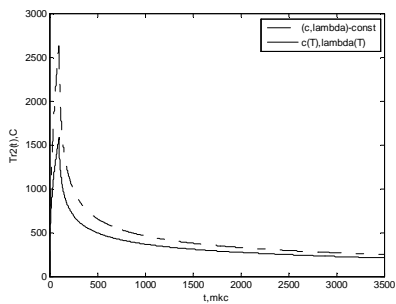


Рис. 4.

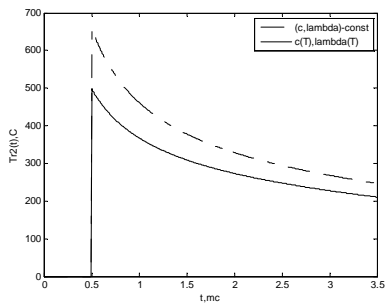


Рис. 5.

**Выводы.** Воздействие электронного пучка приводит к модификации поверхности металла. Наблюдается существенная зависимость структуры и свойств автографа от теплофизических свойств поверхности обрабатываемого материала. Отмечается возможность получения атомно-гладких поверхностей для металлов с низкой температурой плавления. Полученные экспериментальные данные согласуются с расчетом.

**Список литературы:** 1. Неклюдов И.М., Рыбальченко Н.Д., Сороковой Л.Г., Артюх В.Г., Друй О.С., Скибенко Е.И., Холод Ю.В., Малец В.Ф., Камышанченко Н.В., Беленко В.А. Влияние воздействия мощных импульсных пучков электронов на структуру и твердость поверхности стали X18H10T // Науч. ведомости. Сер Физика, №1(10). – Белгород, Россия. – 2000. – С. 45-49.. 2. Неклюдов И.М., Рыбальченко Н.Д., Сороковой Л.Г., Артюх В.Г., Друй О.С., Скибенко Е.И., Холод Ю.В., Малец В.Ф., Камышанченко Н.В., Беленко В.А. Модификация свойств металлов под действием электронного пучка // 3-я Международная научно-техническая конференция "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов". – Харьков, Украина, 9-13 сентября 2002. – С. 205-208. 3. Сороковой Л.Г., Косик Н.А., Друй О.С., Муфель Е.В., Буравилов И.В., Пономарев А.Н., Рыбалко А.Н., Ткачев В.И. О передаче импульса с помощью импульсного электронного пучка // 3-я Международная научно-техническая конференция "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов". – Харьков, Украина, 9-13 сентября 2002. – С. 212–219. 4. Неклюдов И.М., Сороковой Л.Г., Друй О.С., Косик Н.А., Муфель Е.В., Буравилов И.В., Ткачев В.И., Пономарев А.Н. О некоторых процессах при взаимодействии мощного импульсного электронного пучка с поверхностями твердых тел // ВАНТ Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3), № 4, 2003. – С. 326–328. 5. Юферов В.Б., Косик Н.А., Муфель Е.В., Ткачев В.И., Тихонов В.Ф., Сероштанов В.А. Исследование тепловых характеристик внутреннего электрода коаксиального плазменного ускорителя с продольным магнитным полем // ВАНТ. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения". – 2006. – № 5.



**Друй Олег Самойлович**, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ в 1964 г.  
Научные интересы: физика плазмы, ускорительная техника, воздействие высокоэнергетичных пучков на поверхность твердых тел.



**Шарый Сергей Владимирович**, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности защитные покрытия и материалы реакторостроения на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г.  
Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопах из плазменного состояния.



**Юферов Владимир Борисович**, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", [yufarov@kipt.kharkov.ua](mailto:yufarov@kipt.kharkov.ua). Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967, 1977 гг.  
Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, научные исследования в области атомной науки и техники.



**Швец Михаил Олегович**, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности экспериментальная ядерная физика на физико-техническом факультете ХГУ в 1988г.  
Научные интересы связаны с методами сепарации вещества по изотопам из плазменного состояния.



**Тихонов Владимир Федорович**, научный сотрудник ННЦ "ХФТИ", кандидат технических наук. Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ в 1961г.  
Научные интересы моделирование физических процессов в области физики плазмы.

*Поступила в редколлегию 20.10.2009*