

ПОЛУЧЕНИЕ И РЕГУЛИРОВКА ТОКА МОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОГО ИСТОЧНИКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

*Н. И. Айзацкий, А. Н. Довбня, В. В. Закутин, Н. Г. Решетняк,
В. П. Ромасько, И. А. Чертищев, В. Н. Борискин, Н. А. Довбня*

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

В работе дано описание ускорителя электронов, в котором в качестве источника частиц используются магнетронные пушки с вторично-эмиссионными катодами двух типов. Исследованы параметры электронного пучка в диапазоне энергий 20–150 кэВ при длительности импульса 10–50 мкс. Приведены результаты по облучению мишеней электронным пучком. Изучена структура поверхности металлографическим методом, измерены: микротвердость, прочность циркониевых материалов. Показана возможность регулировки тока пучка в 2,5–3,5 раза различными способами.

The paper describes the electron accelerator, where magnetron guns with secondary-emission cathodes of two types are used as particle sources. Electron beam parameters were investigated in the electron energy range between 20 and 150 keV at a pulse length of 10 to 50 μ s. Results of target irradiation with an electron beam are reported. The target surface structure was subject to metallographic examination; microhardness and strength of zirconium materials were measured.

The possibility of controlling the beam current value by factors of 2.5 to 3.5 by different methods is shown.

PACS: 07.77.Ka; 41.75.Fr

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы изучения электронных пучков различной конфигурации и интенсивности связаны с их применением в высоковольтной импульсной СВЧ-электронике, электронно-лучевых технологиях, ускорительной технике и т.д. [1]. Для генерации электронных пучков используются различные виды электронной эмиссии.

В ННЦ ХФТИ в последние несколько лет ведутся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. На основе полученных результатов был создан ускоритель электронов, который используется для облучения металлических мишеней с плотностью энергии ~ 20 Дж/см² [2]. Однако для расширения области металлофизических исследований необходимо увеличить плотность энергии на мишенях до 30–40 Дж/см². В данной работе приведены результаты по получению и регулировке тока мощного электронного пучка различными способами в двух типах магнетронных пушек.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по получению и регулировке тока мощного электронного пучка проводились на ускорителе электронов (рис. 1) при напряжении 20–150 кВ.

Для питания вторично-эмиссионной системы использовался импульсный генератор (1), который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине до 200 кВ, амплитуда плоской части импульса 10–150 кВ, длительность импульса 50–10 мкс. Источник электронов (6 — катод, 7 — анод) размещается в вакуумном объеме (3). Для получения электронного пучка использовались два типа магнетронных пушек. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом (4), состоящим из четырех секций. Обработка результатов измерений параметров импульса напряжения, тока пучка на цилиндре Фарадея (8) проводилась с помощью компьютерной измерительной системы (9).

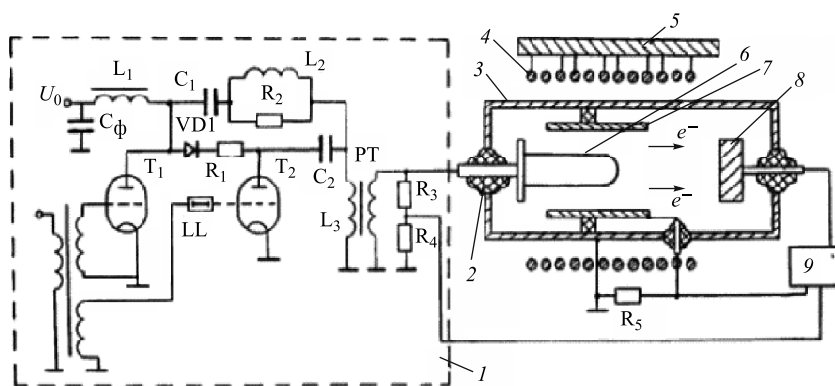


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — импульсный генератор; 2 — изолятор; 3 — вакуумная камера; 4 — соленоид; 5 — источник питания соленоида; 6 — катод; 7 — анод; 8 — цилиндр Фарадея; 9 — компьютерная измерительная система

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены экспериментальные исследования по формированию и регулировке тока пучка в ускорителе на основе вторично-эмиссионного источника. Изучена зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от распределения магнитного поля вдоль оси пушки (диаметр катода ~ 38 мм, диаметр анода ~ 78 мм). Как показали эксперименты, в однородном магнитном поле (рис. 2, кривая 2) магнетронная пушка формирует трубчатый электронный пучок с током 140 А при энергии частиц ~ 125 кэВ и плотностью энергии на мишени ~ 40 Дж/см² при длительности импульса ~ 10 мкс. Коэффициент азимутальной однородности пучка $\sim 1,2$. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде, тока пучка и анодного тока показаны на рис. 3.

Исследования показали, что стабильность суммарного тока пучка в течение восьми импульсов напряжения, следующих друг за другом, составляла $\sim 2-3\%$. Показано, что

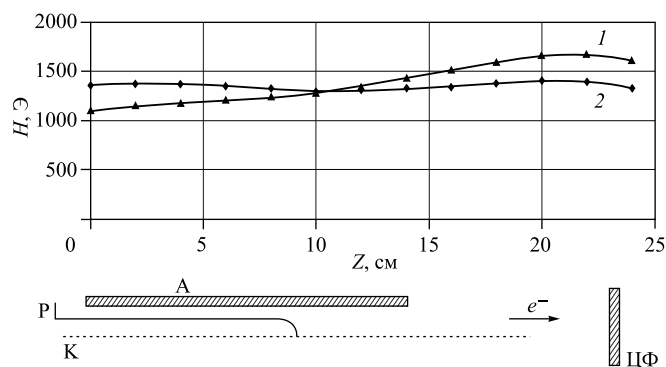


Рис. 2. Распределение магнитного поля (кривые 1, 2) и расположение элементов установки. А — анод; К — катод; Р — рефлексор; ЦФ — цилиндр Фарадея

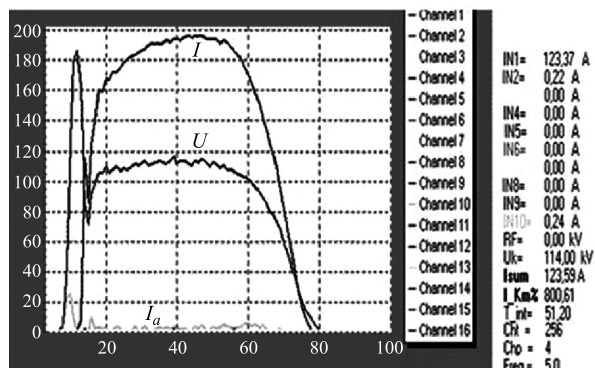


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на катоде (U), осевого тока на цилиндре Фарадея (I) и анодного тока (I_a)

при напряжении на катоде ~ 125 кВ формирование пучка начинается при магнитном поле ~ 1450 Э и сохраняется при увеличении амплитуды магнитного поля до 1750 Э, т. е. зона формирования пучка по магнитному полю составляет 300 Э. Исследован диапазон работы ускорителя при заданном значении магнитного поля в зависимости от амплитуды напряжения на катоде. Показано, что формирование электронного пучка сохраняется при изменении амплитуды напряжения на $\sim 25\%$. Проведенные исследования показали, что при постоянном напряжении на катоде изменение амплитуды и распределения магнитного поля приводит к изменению тока электронного пучка. С помощью этого способа могли регулировать ток пучка в $3\text{--}3,5$ раза при напряжении на катоде (138 ± 12) кВ с 40 А (магнитное поле нарастающее, рис. 2, кривая 1) до 140 А (магнитное поле однородное, рис. 2, кривая 2).

Проведено облучение мишеней из различных материалов электронным пучком. В качестве исследуемых материалов были взяты инструментальная сталь марок X18H10T, ХВГ, титан ВТ-1, Си. На рис. 4, а, б представлены микроструктуры поверхностей, облученных электронным пучком с энергией ~ 90 кэВ и плотностью энергии пучка

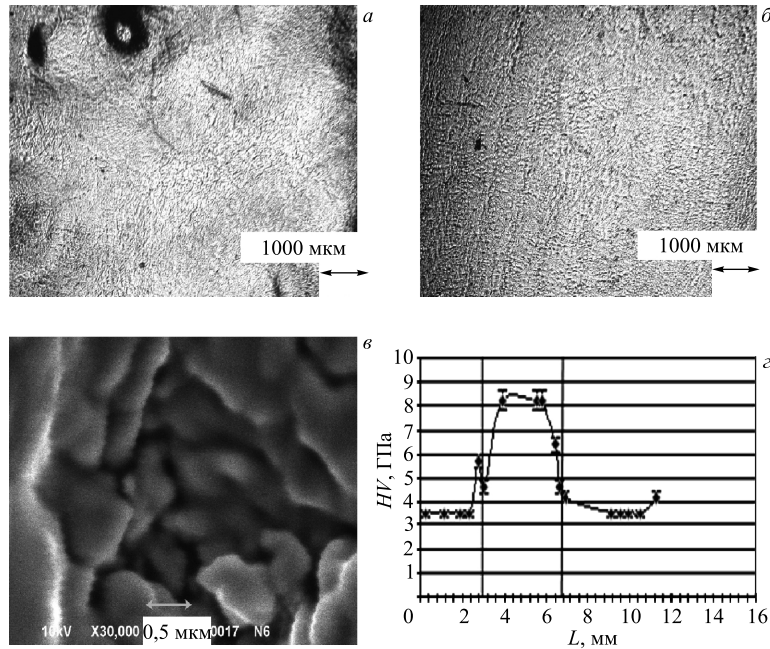


Рис. 4. Микроструктуры поверхностей (а–в) и изменение микротвердости поверхностей (выделена линиями) (г), облученных пучками электронов

~ 20 Дж/см² в импульсе стали ХВГ, титана ВТ-1 при воздействии пятнадцатью и тремя импульсами. Анализ изображений (рис. 4) показывает, что облучение электронами поверхностей сталей вызывает существенные изменения в структуре их приповерхностного слоя. Облучение даже тремя импульсами поверхности титана ВТ-1 приводит к ее существенному сглаживанию. В одном из режимов (энергия электронов ~ 100 кэВ, плотность тока ~ 50 А/см², плотность энергии ~ 30 Дж/см²) при облучении мишеней из меди удалось получить наноразмерные ~ 100 – 200 нм образования (рис. 4, в) на ее поверхности. На рис. 4, г представлена зависимость изменения микротвердости стали ХВГ от координаты. Видно, что даже при трех импульсах воздействия микротвердость увеличивается с 3,5 ГПа в необлученной области до 8,2 ГПа в облученной. Облучение образцов циркония и сплава Zr1%Nb показали, что на поверхности формируется нанослой с повышенной твердостью (рис. 5, а, б). Максимальная нанотвердость образцов сплава Zr1%Nb после облучения достигает 3,6 ГПа в сравнении с 2,2 ГПа для исходного образца.

Модуль Юнга, который характеризует сопротивление материала растяжению/сжатию при упругой деформации, для исходных образцов циркониевых материалов составляет 80 ГПа, а для образцов после облучения — 120 ГПа.

Таким образом, важным результатом воздействия электронного пучка на циркониевые материалы является повышение прочностных характеристик при сохранении пластичности обрабатываемых образцов.

Были проведены экспериментальные исследования по увеличению и регулировке тока электронного пучка в ускорителе, в котором в качестве источника электронов исполь-

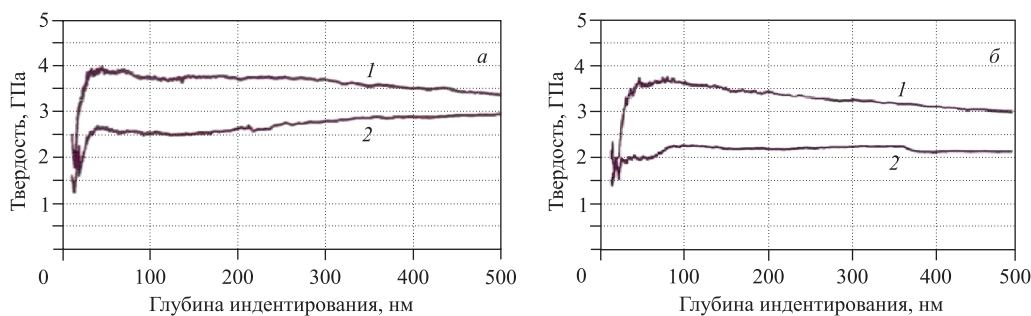


Рис. 5. Зависимости нанотвердости поверхности образцов циркония (а) и сплава Zr1%Nb (б): исходного (2); после облучения (1) электронным пучком с плотностью энергии 10 (б) и 20 Дж/см² (а) от глубины поверхностного слоя

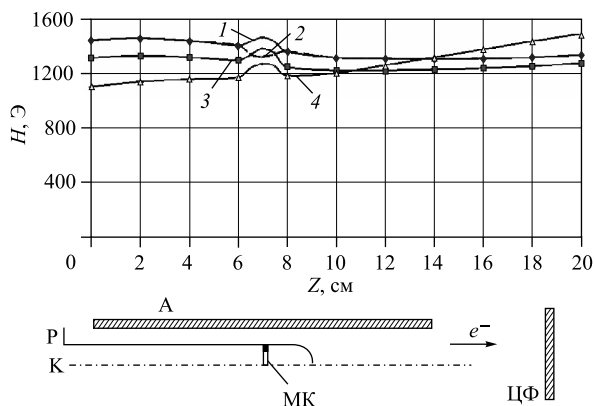


Рис. 6. Распределение магнитного поля (кривые 1–4) и расположение элементов пушки. А — анод; К — катод; Р — рефлектор; МК — магнитное кольцо (находится в точке L_1); ЦФ — цилиндр Фарадея

зовалась магнетронная пушка с диаметром катода 50 мм, длина катода 90 мм, внутри которого располагался кольцевой магнит из материала NdFeB на различных расстояниях ($L_1 = 20$ мм, $L_2 = 65$ мм, $L_3 = 82$ мм) от конца катода, и с диаметром анода 70 мм в диапазоне напряжений 20–50 кВ. Кольцевой магнит создавал выброс или провал поля (рис. 6) на поверхности катода. На рис. 6 приведены суммарные распределения продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки пучка до цилиндра Фарадея (рис. 6, кривые 1, 2), при которых проводились исследования по генерации электронных пучков. Как показали эксперименты, при наличии выброса магнитного поля на 5–10% (рис. 6, кривая 1) на различных расстояниях (L_1 , L_2 , L_3) вдоль катода создается комбинированная электромагнитная ловушка для электронов за счет совместных действий электрического и магнитного полей.

На рис. 7 (линия 1) приведена зависимость отношения токов $K_1 = I_1/I_2$ на цилиндре Фарадея, полученная при выбросе магнитного поля (I_1) и провале (I_2) при расположении кольцевого магнита на различных расстояниях (L_1 , L_2 , L_3) от конца катода. Из рисунка

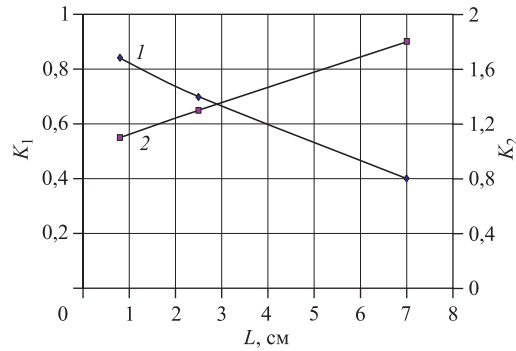


Рис. 7. Зависимости отношения токов на цилиндре Фарадея (линии 1, 2), полученные при различных распределениях магнитного поля

видно, что когда магнитное кольцо находится в точке L_1 , амплитуда тока пучка в 2,5–2,7 раза больше в случае выброса магнитного поля, чем в случае провала поля.

На рис. 7 (линия 2) показана зависимость величины отношения токов $K_2 = I_1/I_0$ на цилиндре Фарадея при выбросе магнитного поля (I_1) к току (I_0) при однородном магнитном поле (катод — без магнитного кольца). Из зависимости 2 следует, что, когда магнитное кольцо расположено в точке L_1 , происходит существенное увеличение амплитуды тока электронного пучка на 80–85 % по сравнению с экспериментами, выполненными с однородным магнитным полем. При напряжении на катоде 35 кВ магнетронная пушка формирует трубчатый пучок с током 105 А. Коэффициент азимутальной однородности пучка $\sim 1,15$. На рис. 8 приведены зависимости тока пучка от напряжения на катоде в диапазоне 20–35 кВ, полученные при выбросе магнитного поля (рис. 6, кривая 1) и при провале поля (рис. 6, кривая 2). Как видно из рисунка, зависимости тока пучка на цилиндре Фарадея подчиняются закону $3/2$.

На рис. 9 показана зависимость тока электронного пучка на цилиндре Фарадея от величины отношения амплитуды выброса к плоской части импульса напряжения $K = U_{\text{выб}}/U_{\text{хх}}$, полученная при напряжении холостого хода ($U_{\text{хх}}$) 45 кВ. Как видно из ри-

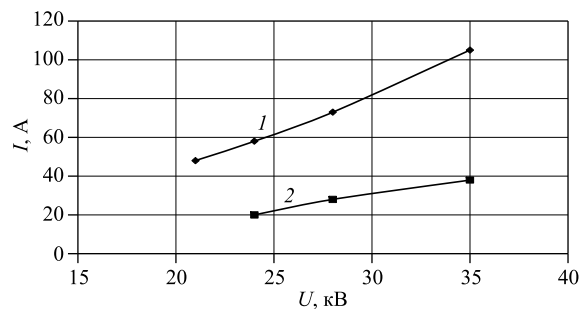


Рис. 8. Зависимости тока от напряжения на катоде при выбросе магнитного поля (кривая 1) и при провале магнитного поля (кривая 2). Магнитное кольцо расположено на расстоянии ~ 20 мм от конца катода

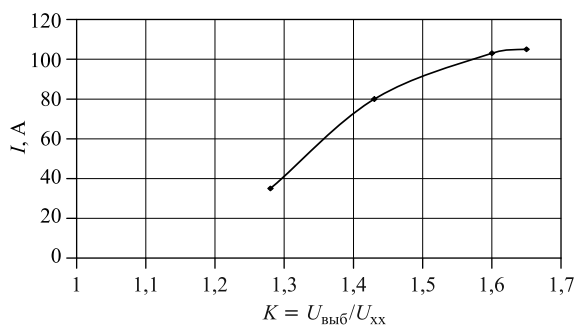


Рис. 9. Зависимость тока пучка от отношения амплитуды выброса напряжения к амплитуде плоской части импульса $K = U_{\text{выб}}/U_{\text{хх}}$

сунка, при величине отношения $K \sim 1,6$ ток пучка составил ~ 105 А. При уменьшении величины отношения до $K \sim 1,28$ ток пучка составил ~ 36 А. В этом случае существенно изменились амплитуда и вид распределения магнитного поля (рис. 6, кривая 4) по сравнению с оптимальным распределением (рис. 6, кривая 1). Таким образом, при уменьшении величины отношения амплитуды выброса напряжения к амплитуде плоской части импульса на 30–35 % от оптимального значения ток пучка уменьшался в 2,5–3 раза.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследования формирования электронного пучка в ускорителе на основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом достигнут максимальный режим работы, при котором ток пучка составляет 140 А при энергии частиц 125 кэВ, плотность энергии пучка на мишени ~ 40 Дж/см².

2. Проведенные исследования показали возможность использования ускорителя для модификации поверхности металлов: увеличивается микротвердость, повышаются прочностные характеристики циркониевых материалов и т. д.

3. Продемонстрирована возможность регулировки тока пучка в 2,5–3,5 раза различными способами в ускорителе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelko V. et al. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment of Materials // Proc. of the Tenth Intern. Conf. on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry, Saint-Petersburg, Russia, 2001. P. 412–417.
2. Довбня А. Н. и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторично-эмиссионным катодом // Вестн. Харьковск. ун-та. Сер. физ.: Ядра, частицы, поля. 2006. № 732, вып. 2(30). С. 96–100.