

Электронно-пучковая обработка поверхности металлов и сплавов

Одним из новых перспективных методов, позволяющих значительно повысить механические и трибологические свойства поверхности конструкционного материала при сохранении структурно-фазового состояния основного объема и за счёт этогократно повысить срок службы изделий в целом, является использование импульсных электронных пучков. По сравнению с лазерным излучением или ионными пучками, электронно-пучковая обработка характеризуется более высокой энергетической эффективностью (до 90 %), хорошей воспроизводимостью импульсов ($\pm 10\%$), низкой неоднородностью распределения плотности энергии ($\pm 10\%$) и высокой частотой следования импульсов (десятки Гц).

Для решения подобных задач авторами данной работы был подробно исследован и кардинально модернизирован созданный в Институте сильноточной электроники (ИСЭ СО РАН) источник электронов «СОЛО» (рис.1, *слева*) с плазменным катодом, генерирующий планарный электронный пучок с возможностью управления мощностью модулированного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности, а также создан оригинальный источник электронов «РАДИАН» с плазменным катодом (рис.1, *справа*), генерирующий радиально сходящийся пучок для обработки изделий сложной формы (например, цилиндрической).

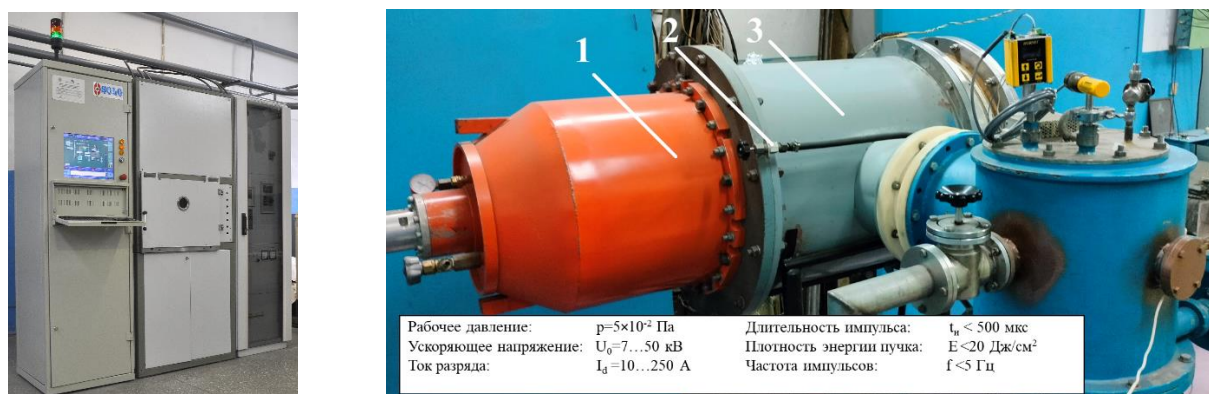


Рис. 1 – Внешний вид источника «СОЛО» (*слева*) и источника «РАДИАН» (*справа*): 1- высоковольтный колпак, 2 – напуск газа, 3 - вакуумная камера.

Новые системы электропитания и управления плазменных катодов, разработанные и созданные научным коллективом, позволили управлять мощностью пучка (мощность пучка до 10 МВт при максимальной скорости изменения не более 0,5 МВт/мкс) в течение импульса (рис. 2, а), а, следовательно, формировать температурное поле в поверхности облучаемого металлического образца (рис. 2, б),

что определяет его структурно-фазовое состояние, а соответственно и физико-механические и эксплуатационные свойства.

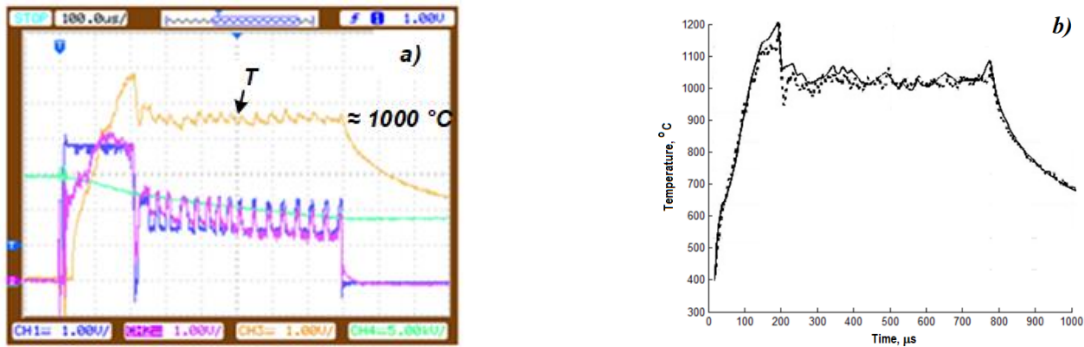


Рис. 2 – Характерные осциллограммы тока дугового разряда I_d , 20 А/дел. (голубой), ток в ускоряющем промежутке I_0 , 20 А/дел. (фиолетовый), ускоряющего напряжения U_0 , 5 кВ/дел. (зелёный), и температуры поверхности силуминового образца T (оранжевый), оцениваемой как $T=308+164 \cdot U$, где $U = 1$ В/дел. а) эксперимент; б) численное моделирование.

Основные параметры источника «СОЛЮ»:

Ускоряющее напряжение	5-25 кВ;
Ток пучка	20-500 А;
Длительность импульса	50-1000 мкс;
Частота следования импульсов	0.3-20 Гц;
Диаметр пучка	до 5 см;
Рабочее давление	0.01–0.05 Па;
Рабочий газ	Аргон;
Размер области сканирования	200×200 мм.

Уникальные возможности разработанного и созданного оборудования продемонстрированы на примере воздействия на поверхность заэвтектического силумина (рис. 3) как одного из широко используемых в

промышленности групп конструкционных материалов.

Таблица 1. Режимы облучения силумина

№	Плотность энергии, Дж/см ²	Длительность основного импульса, мкс	Время удержания, мкс	Температура удержания, °С
1	20	200	800	600
2	20	200	400	600
3	20	200	0	
4	Исходный образец			

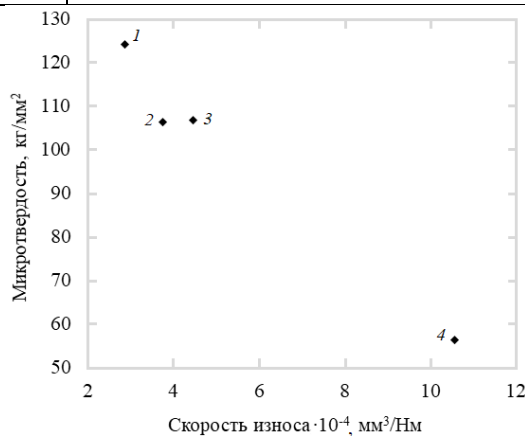


Рис. 3 – Корреляционная зависимость, связывающая микротвердость и скорость износа образцов силумина, режим облучения 1–4 (табл. 1).

Наибольшей твердостью и износостойкостью обладают образцы после длительного воздействия электронного пучка (800 мкс). На основе данных работ разработано 2 патента, получено 3 акта использования, а также несколько писем от заинтересованных в данных технологиях. Разработанное оборудование и реализованные режимы имеют хорошие перспективы внедрения в передовые отрасли промышленности России.

Генерация пучков большого сечения и воздействие ими на органические материалы в атмосфере

Для обработки различных органических материалов могут использоваться электронные пучки, выведенные в атмосферу, для чего требуются надежно работающие ускорители электронов. Поскольку ускорители электронов с плазменными эмиттерами отличаются уникальностью параметров пучка, то научный коллектив разработал и создал два таких ускорителя, позволяющих генерировать электронные пучки большого сечения ($\sim 1000 \text{ см}^2$), выводимые в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Ускоритель «ДУЭТ» (рис. 4) генерирует электронный пучок средней мощностью до 5 кВт с эффективностью вывода пучка в атмосферу до 80%. Кроме этого, на данном ускорителе впервые продемонстрирована возможность контролируемого изменения ширины спектра электронного пучка в атмосфере, что является крайне важным аспектом для многих технологических процессов.

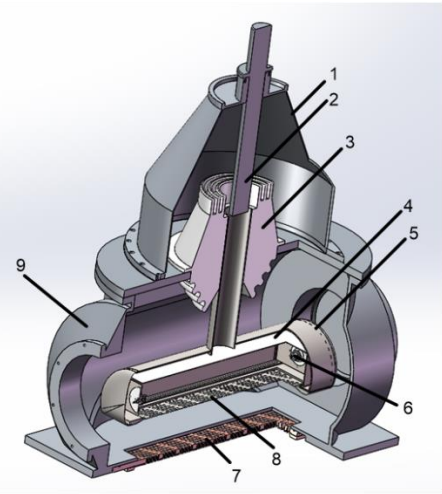


Рис.4 – Ускоритель «ДУЭТ»: 1-колпак изолятора; 2-высоковольтный кабель; 3- изолятор; 4-полый анод; 5-корпус плазменного катода; 6-катодный узел; 7-выпускное фольговое окно; 8-маска; 9-вакуумная камера.

Основные параметры ускорителя «ДУЭТ»:

Ускоряющее напряжение	(100÷200) кВ
Ток пучка (в атмосфере)	(2÷30) А
Длительность импульса	(10÷250) мкс
Частота следования импульсов	до 50 с ⁻¹
Поперечные размеры пучка	(150×750) мм
Неоднородность пучка	±10%
Средняя мощность пучка	до 5 кВт
Рабочее давление	0.02–0.1 Па

Другой созданный ускоритель электронов «Гелион» (Рис. 5) на основе несамоостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с выводом пучка в атмосферу позволяет генерировать электронный пучок

размером 45×65 см, энергией до 150 кэВ и током до 40 мА. На данном ускорителе

впервые для источников с несамостоятельным ВТР был реализован импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда, характеризующийся частотой следования импульсов до 100 кГц, управлением амплитудой и длительностью импульса путем изменения коэффициента заполнения импульсов при стабилизации среднего тока разряда. В сравнении с непрерывным режимом импульсно-периодический позволяет увеличить импульсную мощность электронного пучка до 4 раз, повысить коэффициент вывода тока пучка с 0,2 до 0,6 и обеспечить неоднородность распределения плотности тока до $\pm 15\%$, что открыло для него новые технологические возможности.

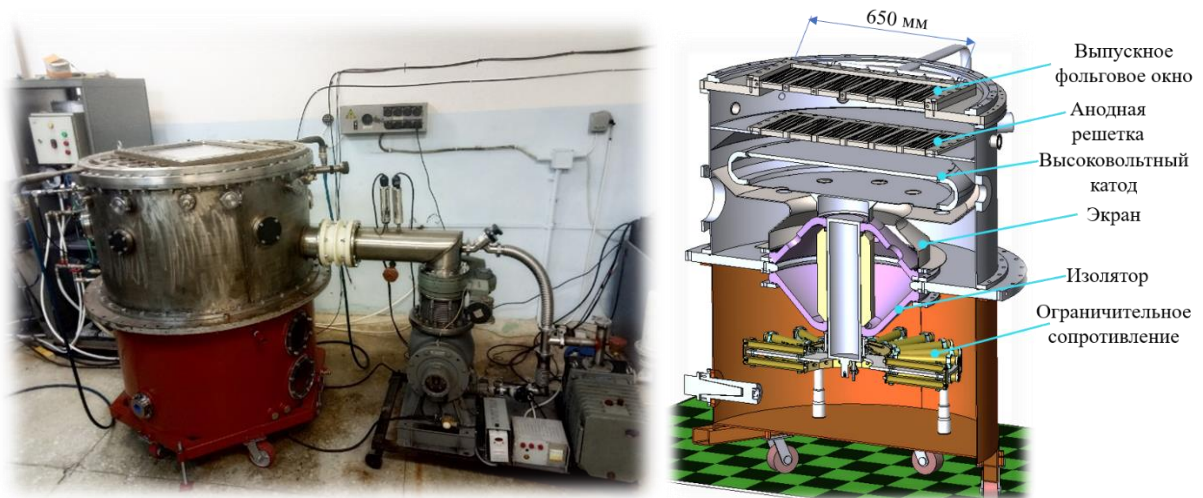


Рис.5 – Ускоритель «Гелион» для генерации электронного пучка в атмосфере

Уникальность режимов облучения органических материалов продемонстрирована на нескольких примерах, по результатам которых получено несколько писем-поддержки и актов использования от организаций-партнеров.

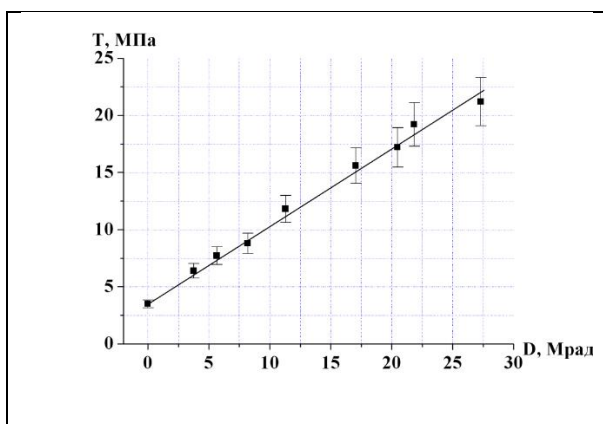


Рис.6 – Зависимость прочности на разрыв образцов Т от вкладываемой в латекс дозы облучения D.

Показано (рис. 6), что после электронно-пучковой модификации жидкого невулканизированного натурального латекса в атмосфере, прочность на разрыв образцов была увеличена до 7 раз по сравнению с необлученным образцом. Максимальное значение прочности на разрыв каучуковых образцов, составившее 21 МПа, было получено при дозе облучения равной 27 Мрад.

На сегодняшний день это значение прочности на разрыв является рекордным среди

химически чистых процессов получения натурального каучука. Продемонстрированный метод перспективен для использования в производстве биосовместимых медицинских изделий из натурального латекса.



Рис.7 – Образцы пленок ПВХ после облучения электронным пучком

Радиационно-химические превращения природных и синтетических полимеров могут явиться альтернативой общепринятым технологиям получения углеродных материалов в результате высокотемпературной обработки органического сырья. Впервые было показано (рис. 7), что отщепление хлора по реакции дегидрохлорирования приводит к

образованию из ПВХ обогащенных углеродом полимеров с системой сопряженных кратных углерод–углеродных связей. Развиваемый подход может послужить основой для разработки бездиоксиновых методов утилизации отходов хлорполимеров, и осуществления дехлорирования последних в мягких условиях низкотемпературных воздействий (в том числе, вместо мусоросжигания), не приводящих к выделению токсичных хлордиоксинов, что весьма важно с экологической точки зрения.



Рис.8 – Полевые эксперименты с пшеницей, облученной электронным пучком

Были проведены исследования по обработке пучком посевного материала сельхозпродукции (пшеница, ячмень, горох) и влияния пучка на всхожесть семян, их основных морфометрических параметров и степени поражения растений возбудителями корневых гнилей с определением оптимальных режимов облучения. Продемонстрированные эффекты позволили выйти на заказчика из коммерческого сектора, для которого было облучено около 1 тонны зерна и посажено около 7 Га пахотных

земель в Московской области (рис. 8). В полевых условиях было получено на 10–15% большая урожайность пшеницы сорта Ирень при использовании посевного материала низкого качества («Элита»), что обуславливает экономическую целесообразность

предлагаемого радиационного способа стимуляции роста и дезинфекции не только пшеницы, но и других продуктов сельского хозяйства.

Использование источников с плазменными эмиттерами в научных целях

На протяжении длительного времени в ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты с инъекцией мощного электронного пучка в плазму линейных магнитных ловушек для целей управляемого термоядерного синтеза. Показано, что в такой плазме развивается ленгмюровская турбулентность, приводящая к повышению температуры электронной компоненты плазмы, подавлению продольной теплопроводности, генерации мощного электромагнитного излучения в субтерагерцовом диапазоне длин волн. Осевая инъекция мощного субмиллисекундного пучка электронов рассматривается также как инструмент МГД-стабилизации плазмы в открытой ловушке за счет воздействия на плазму отрицательного заряда пучка, приводящего к азимутальному дрейфовому вращению плазменного столба в продольном магнитном и в радиальном электрическом поле пучка.

Для решения данной научной задачи был спроектирован и создан источник электронов «КИЛОАМПЕР» (рис. 9, а) с многодуговым плазменным катодом (рис. 9, б) и плазменным анодом, нарабатываемым электронным пучком в самосогласованном режиме.

Основные параметры ускорителя «Килоампер»:

Ускоряющее напряжение	до 100 кВ
Ток пучка	до 1 кА
Длительность импульса	100 мкс
Частота следования имп.	0.1 Гц
Диаметр пучка	≈(50-70) мм
Рабочее давление	0.01–0.05 Па
Рабочий газ	Аргон

В результате исследований показано, что при длительности электронного пучка на полувысоте около 100 мкс его энергия достигает 5 кДж, которая ограничена пробоем ускоряющего

промежутка, но которой более чем достаточно для решения поставленной задачи. Уникальные параметры электронного пучка, достигнутые в источнике «Килоампер», позволили провести в ИЯФ СО РАН экспериментальное сравнение двух электронно-оптических систем (ЭОС): двухэлектродной мультиапертурной ЭОС №1 (рис. 10) и ЭОС №2 с сетчатым плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей анодной плазмы (рис. 11).

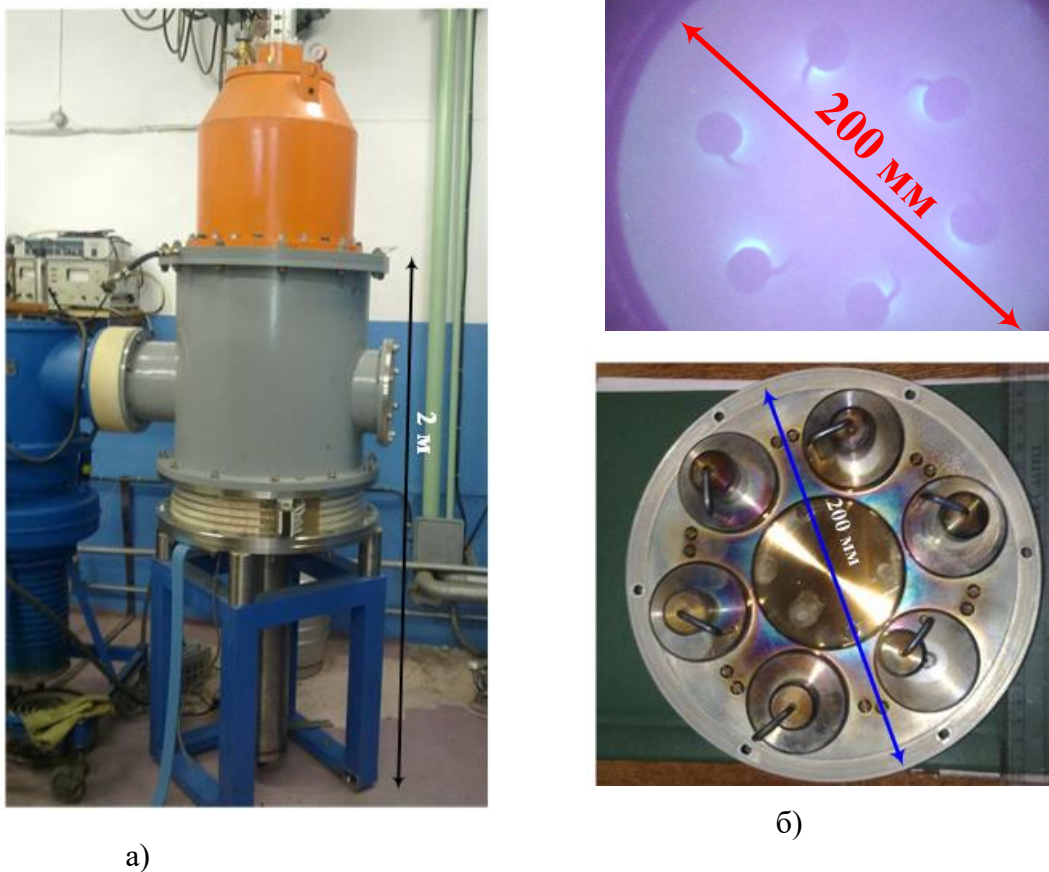


Рис. 9 – Фотография источника электронов «Килоампер» (а) с плазменным катодом (б)

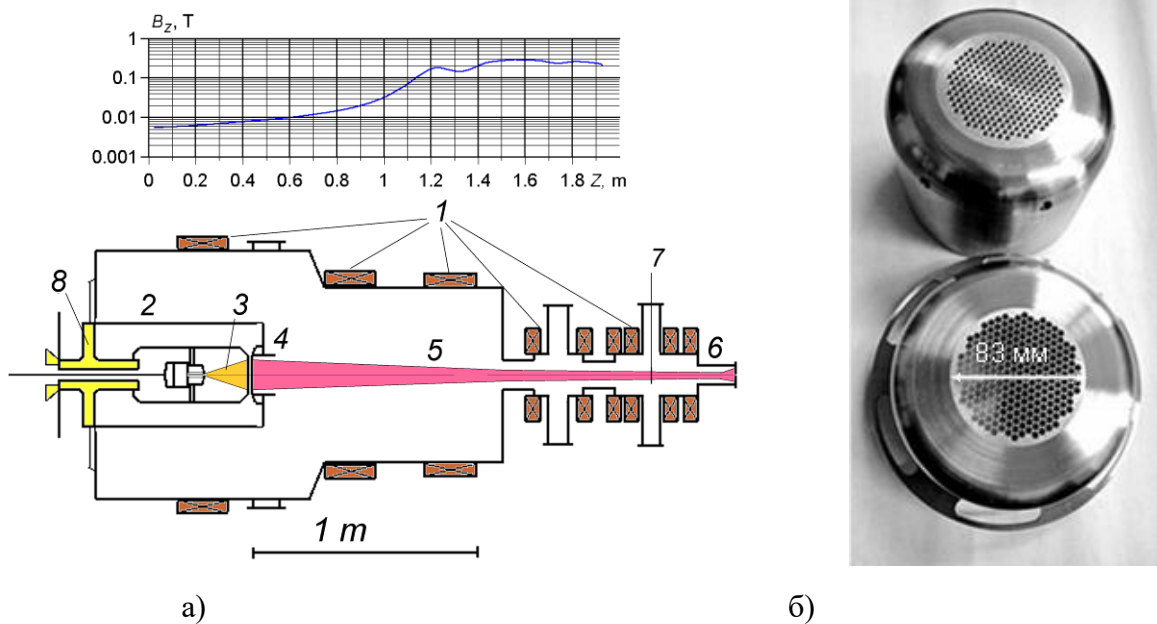


Рис. 10. а – эксперимент по транспортировке электронного пучка в магнитном поле при использовании ЭОС №1: сверху – распределение магнитного поля по длине; внизу – геометрия эксперимента: 1 - катушки магнитного поля; 2 - мультиапертурный источник пучка; 3 - эмитирующая плазма; 4 - лайнер; 5 - электронный пучок; 6 - приемник пучка (цилиндр Фарадея); 7 – мишень; 8 – изолятор.
б – общий вид катодного (сверху) и анодного (снизу) электродов мультиапертурного диода.

При работе источника с ЭОС №2, несмотря на сравнительно высокую неоднородность плотности тока по сечению пучка, возрастает электрическая прочность высоковольтного ускоряющего промежутка, что позволило повысить

любой из основных параметров электронного пучка (энергию, амплитуду и длительность пучка). Энергосодержание транспортируемого пучка в условиях его адиабатического сжатия в нарастающем магнитном поле было увеличено примерно в 1.8 раза, что продемонстрировало перспективу развития источников электронов такого типа не только для материаловедческих целей, но и для решения задач УТС.

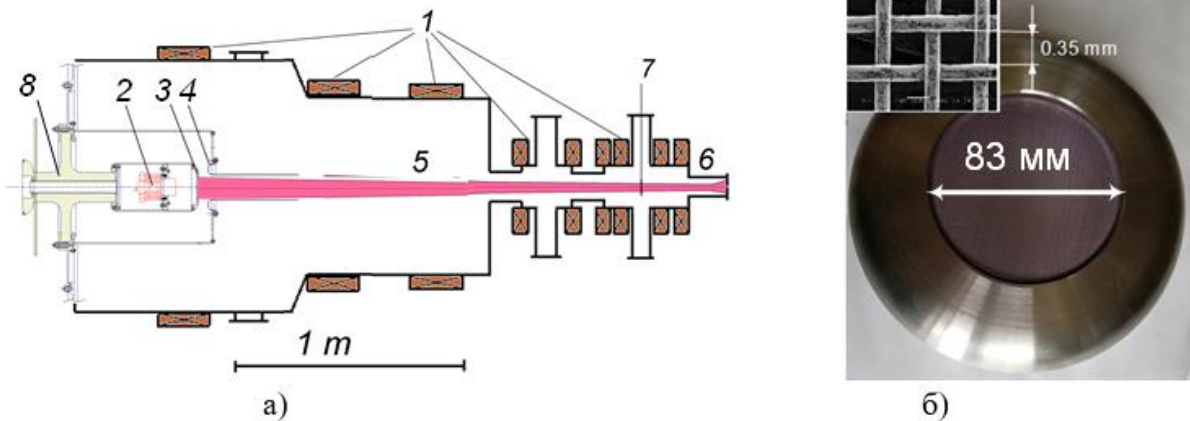


Рис. 11. а – эксперимент по транспортировке электронного пучка в магнитном поле при использовании ЭОС №2: 1 - катушки магнитного поля; 2 – генератор плазмы; 3 – катодный электрод; 4 - анодный электрод; 5 - электронный пучок; 6 - приемник пучка (цилиндр Фарадея); 7 – мишень; 8 – изолятор.

б – эмиссионный электрод сетчатого плазменного катода и фрагмент катодной сетки.

Разработка и создание систем питания и управления плазменными эмиттерами и систем диагностики

Поскольку системы электропитания и управления являются важным звеном при проектировании источников и ускорителей электронов с плазменными катодами, то научный коллектив уделяет этому большое внимание. Кроме этого, построение новых систем диагностики позволяет получать новые научные результаты о процессах, происходящих как в эмиссионной плазме, так и при генерации электронного пучка (особенно когда речь идет о пучках большого сечения). На основе современной элементной базы были построены новые оригинальные системы электропитания и управления плазменных эмиттеров, а также системы диагностики, а именно:

- система электропитания и управления плазменного катода на основе индуктивного накопителя для источника «СОЛО»;
- система электропитания и управления плазменного катода на основе двух двухобмоточных индуктивных накопителей для ускорителя «ДУЭТ»;
- система электропитания и управления многодугового плазменного катода на основе шести двухобмоточных индуктивных накопителей для источника «Радиян»;

- система электропитания и управления плазменного катода для генерации амплитудно- и широтно-модулированного тока дугового разряда;
- автоматизированная система измерения параметров эмиссионной плазмы в эмиттерах на основе тлеющего и дугового разрядов низкого давления;
- автоматизированные системы измерения распределения плотности тока пучка большого сечения, выведенного в атмосферу на ускорителях с плазменными эмиттерами, работающими как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с частотой следования импульсов от единиц Гц до 100 кГц;
- и др.

Заключение

Разработано и создано новое поколение источников и ускорителей электронов с плазменными эмиттерами на основе разрядов различного типа, обеспечивающих высокую стабильность и управляемость генерации электронных пучков, а также имеющих более широкий диапазон перестройки параметров генерируемого электронного пучка, чем у ближайших конкурентов (источники на основе взрывной и термоэмиссии), а именно: энергия электронов от единиц до 200 кэВ, ток пучка от долей до 1000 А, плотность тока эмиссии от 0,0001 до 50 А/см² при сечении пучка (1000÷10) см², плотность тока на мишени до 50 А/см², длительность импульса (10÷1000) мкс, энергии пучка от десятков Дж до 5 кДж/имп, неоднородность плотности энергии по сечению пучка не хуже $\pm 15\%$ от среднего значения. По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу, при средней мощности пучка ≤ 5 кВт созданные источники электронов не имеют прямых мировых аналогов и являются перспективными для их использования в научных и технологических целях.

Перспективность новых режимов облучения, которые невозможно или очень сложно обеспечить другими источниками и ускорителями электронов, была продемонстрирована на нескольких примерах, что подтверждает их востребованность и высокую экономическую целесообразность внедрения в промышленный сектор, что уже подтверждено несколькими примерами и имеющейся в настоящий момент заинтересованностью со стороны промышленного сектора.