

13.2;13.3

## Влияние импульсных электронно-пучковой и ионной обработок электродов из нержавеющей стали на электрическую прочность вакуумных промежутков

© С.А. Онищенко, Е.В. Нефедцев

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: nev@lve.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2024 г.

В окончательной редакции 28 июня 2024 г.

Принято к публикации 3 июля 2024 г.

Известно, что импульсное оплавление поверхности электродов низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком на глубину нескольких микрометров значительно повышает уровень электрической прочности вакуумных промежутков. Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности дополнительного 30% электрического упрочнения вакуумных промежутков со стальными (12X18H10T) электродами в том случае, если перед оплавлением электроды облучить потоком ионов, извлекаемым серией коротких импульсов отрицательного смещения из плазмы аргона с концентрацией заряженных частиц  $\sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

**Ключевые слова:** электрическая прочность вакуумного промежутка, низкоэнергетический сильноточный электронный пучок, импульсный ионный поток.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58949.19924

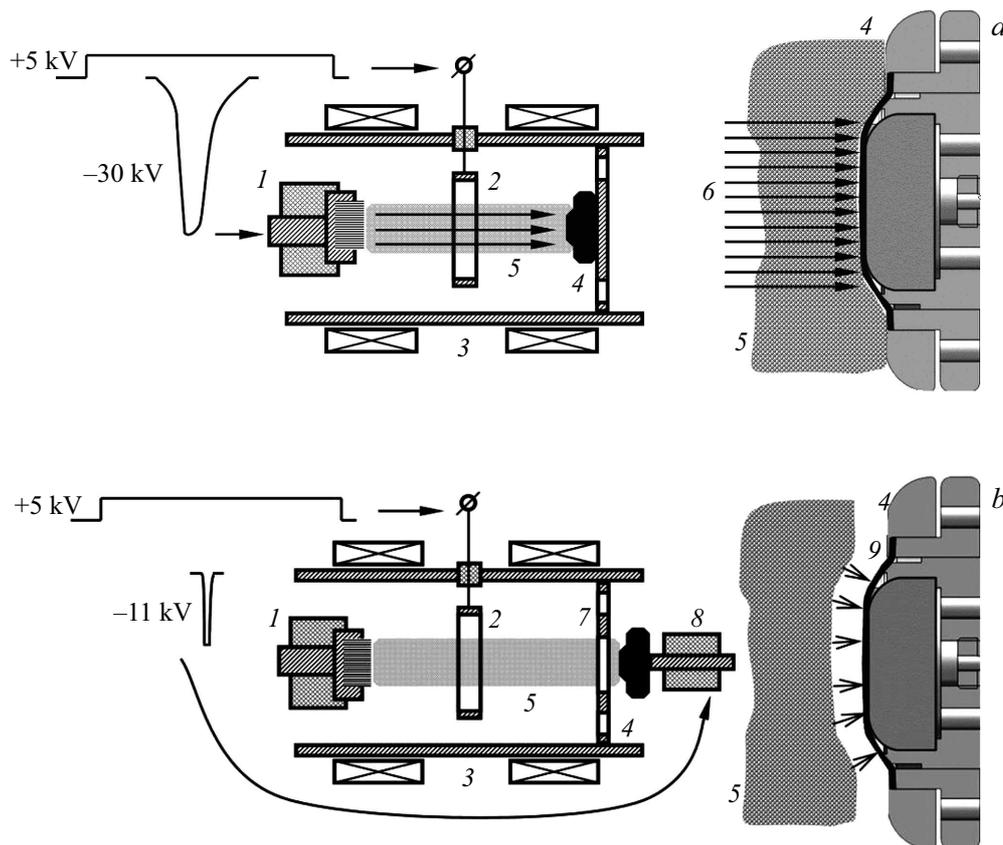
Инициирование электрического пробоя вакуумных промежутков (ВП) связывают, как правило, с геометрическими или химическими неоднородностями на поверхности электродов, проявляющими высокую эмиссионную активность: микровыступами, порами, микро- и наночастицами, диэлектрическими или полупроводниковыми пленками и включениями [1–3]. Удаление таких провокаторов пробоя импульсным оплавлением поверхности электродов широкоапертурным низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП) микросекундной длительности на глубину в несколько микрометров способствует повышению импульсной электрической прочности ВП перед первым пробоем в несколько раз по сравнению с уровнем импульсной электрической прочности аналогичного ВП с механически или электрохимически полированными электродами, прошедшими финишную очистку поверхности различными традиционными методами [2,3]. В работе [4] нами была показана возможность дополнительного электрического упрочнения ВП со стальными (12X18H10T) электродами путем предварительного (перед обработкой НСЭП) погружения каждого электрода в плазму аргона с концентрацией частиц  $\sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и подачи на него серии коротких ( $\sim 100 \text{ ns}$ ) отрицательных импульсов напряжения амплитудой свыше 10 kV, создающих импульсный ионный поток (ИИП) из плазмы на поверхность. Однако этот эффект оказался статистически нестабильным, вероятно в силу недостаточно жестких режимов тренировки.

В настоящей работе исследована статистика пробоев ВП после комплексной обработки стальных электродов ИИП + НСЭП при амплитуде тока ИИП, достигну-

той при применении имеющегося оборудования, равной 70 А, что более чем в 3 раза превышает аналогичную величину в работе [4]. Как и в [4], в настоящей работе использовались электроды „со сменяемой поверхностью“ в виде фольги толщиной 0.2 mm из нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 1, справа). Формующей основой электродов являлись стальные диски диаметром 30 mm и толщиной 12 mm со скруглением по периметру основания радиусом 6 mm.

Стандартная обработка НСЭП электродов контрольной партии (24 шт.) производилась с помощью электронной пушки с плазмонаполненным диодом „РИТМ-М“ [3], где одним из катодов ячейки Пеннинга являлся многоострый взрывоэмиссионный эмиттер электронов 1, а другим — обрабатываемая мишень-электрод 4 (рис. 1, а). Давление аргона в корпусе пушки составляло  $4 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ . Расстояние между катодами ячейки составляло 20 cm, а диаметр кольцевого анода 2 был равен 8 cm. Диаметр трубы корпуса пушки составлял 20 cm. Сначала подавалось 20 импульсов НСЭП 6 при амплитуде ускоряющего напряжения 30 kV (режим углубленного плавления и очистки поверхности), затем 10 импульсов при амплитуде 20 kV (режим полировки поверхности). Соответствующие значения плотности энергии в импульсе составляли оценочно 7 и 4 J/cm<sup>2</sup>.

Для предварительной обработки ИИП электродов экспериментальной партии (24 шт.) использовалась плазма разрядной ячейки Пеннинга той же установки „РИТМ-М“ (рис. 1, б). При этом обрабатываемый ионами электрод 4 размещался на изоляторе 8 за плоскостью диафрагмы 7 с диаметром отверстия 45 mm на расстоянии 12 mm.



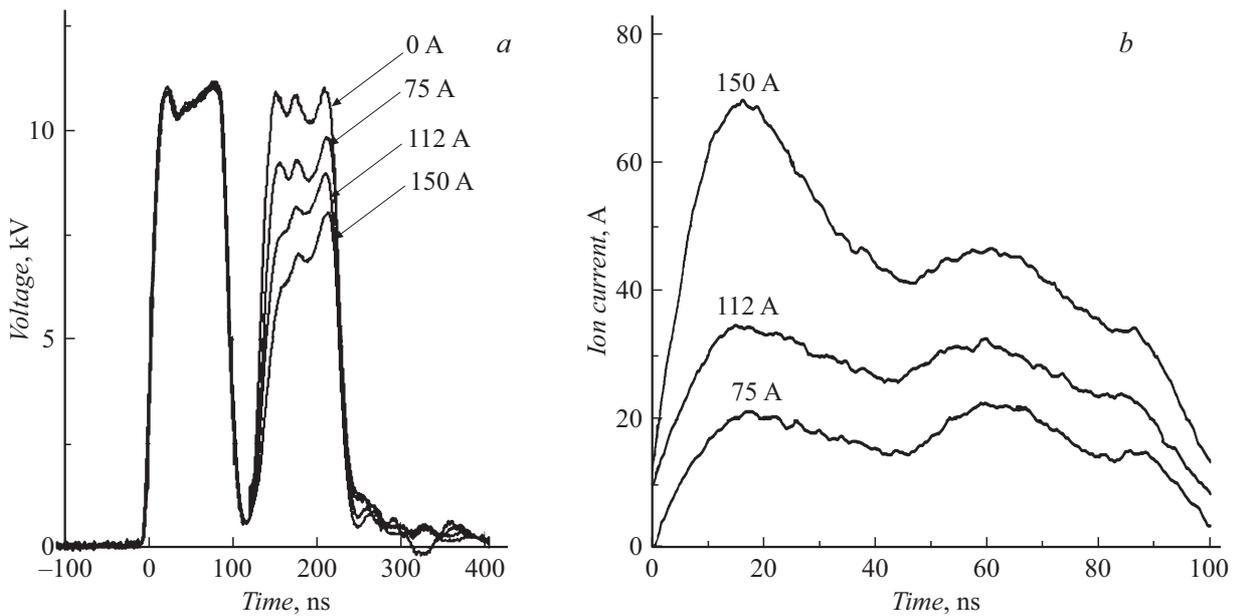
**Рис. 1.** Схема обработки электродов. *a* — обработка низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком; *b* — обработка импульсным ионным потоком. 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — анод, 3 — соленоиды ведущего магнитного поля, 4 — мишень (обрабатываемый электрод), 5 — плазма, 6 — электронный пучок, 7 — диафрагма, 8 — изолятор мишени, 9 — формирующийся ионный слой.

Для обеспечения короткоимпульсного режима ионной обработки необходимо, чтобы длительность фронта импульса отрицательного смещения мишени была меньше или по крайней мере соизмерима с временем пролета ионом равновесного слоя Чайлда–Лэнгмюра (порядка нескольких десятков наносекунд). В этом случае (при быстром вытравливании малоинерционных электронов в глубь плазмы) формируется слой с высокой плотностью некомпенсированных ионов, которые начинают ускоряться электрическим полем в сторону катода. В результате до образования равновесного ионного слоя с характерным режимом переноса ионов, ограниченного эмиссией из плазмы, происходит бомбардировка поверхности мишени плотным импульсным потоком ионов (рис. 1, *b*), интенсивность которого определяется как динамикой ускорения ионов в слое, так и кинетикой расширения самого слоя. В данном эксперименте импульс напряжения отрицательной полярности амплитудой 11 kV, длительностью 100 ns при длительности фронта 20 ns формировался кабельным генератором Введенского с особенностями конструкции, описанными в [5], и поступал на обрабатываемый электрод 4 синхронизованно с импульсом тока ячейки Пеннинга. На рис. 2, *b* пока-

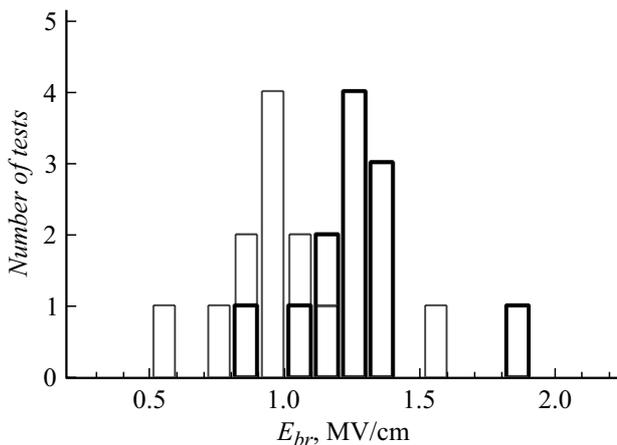
заны осциллограммы тока, рассчитанные по разности падающей и отраженной от электрода волн напряжения при различных значениях тока в ячейке Пеннинга (рис. 2, *a*). Обе волны фиксировались на одной осциллограмме, снятой с согласованной нагрузки 50  $\Omega$  (временной сдвиг определяется временем прохождения отраженной волной всех участков коаксиальной линии). Значения амплитуд тока соответствуют теоретическим оценкам всплесков плотности ионного тока  $\sim 10^5$  A/m<sup>2</sup> (с учетом площади обработки), выполненным на основе гидродинамической модели в приближении ступенчатого импульса напряжения с линейным фронтом [6].

Каждый электрод экспериментальной партии обрабатывался 100 импульсами ионного тока амплитудой 70 А, которая соответствовала максимально достижимому току в ячейке 150 А. Последующая обработка НСЭП электродов экспериментальной партии после перекомпоновки оснастки установки „РИТМ-М“ по схеме, представленной на рис. 1, *a*, проводилась в тех же режимах, что и обработка контрольной партии (см. выше).

Испытания ВП на импульсную электрическую прочность проводились на стенде „Пробой“, описанном в [4]. На ВП подавались одиночные прямоугольные им-



**Рис. 2.** Усредненная по десяти последовательным осциллограммам форма импульсов напряжения на нагрузке кабельного генератора в зависимости от тока разряда в ячейке Пеннинга (указан около кривых) (a) и соответствующие рассчитанные осциллограммы тока в цепи обрабатываемого электрода (b).



**Рис. 3.** Сравнение гистограмм распределения величины импульсной электрической прочности контрольных (тонкие линии) и экспериментальных (жирные линии) вакуумных промежуток.

пульсы напряжения длительностью 100 ns, амплитудой  $U = 200$  kV с длительностью фронта 20 ns. Амплитуда напряженности электрического поля в ВП повышалась за счет уменьшения зазора  $d$  между электродами с шагом  $50 \mu\text{m}$ . На каждом шаге подавалось по пять импульсов напряжения. Эта процедура повторялась до тех пор, пока не происходил пробой. После замера конечного межэлектродного расстояния  $d = d_{br}$  электрическая прочность ВП определялась как  $E_{br} = U/d_{br}$ .

Помимо основных партий в работе были испытаны также сравнительно небольшие партии ВП с элек-

тродами, выполненными из той же стали 12X18H10T, меди М1 и титана ВТ1-00 после различных вариантов комплексной обработки.

Результаты основного эксперимента представлены на рис. 3, где показаны наложенные друг на друга гистограммы распределения величины электрической прочности ВП (по первому пробую) контрольной и экспериментальной партий. Из полученных данных следует, что после предварительной обработки стальных электродов ИИП на уровне амплитуды ионного тока 70 А и последующей обработки НСЭП достигается статистически стабильное электрическое упрочнение ВП. В данном эксперименте зафиксирован подъем среднего значения электрической прочности ВП от 0.98 до 1.28 MV/cm (приблизительно на 30%) при сохранившемся статистическом разбросе, типичном для данных испытаний ВП.

В дополнение к основному результату установлено следующее. Комплексная обработка стальных электродов в обратной последовательности НСЭП + ИИП и трехэтапная обработка НСЭП + ИИП + НСЭП, в которых воздействие ИИП не является первичным, не смещает гистограмму импульсной электрической прочности ВП относительно гистограммы контрольной партии. Для медных электродов добавление обработки ИИП к обработке НСЭП, причем в любой последовательности, также не оказывает влияния на импульсную электрическую прочность ВП, которая составляет в среднем 0.95 MV/cm. Для титановых электродов, напротив, добавление обработки ИИП в любом сочетании с обработкой НСЭП приводит к более чем двукратному снижению среднего значения импульсной электрической прочности относительно исходного значения 1.5 MV/cm.

Электрофизические режимы обработки ИИП, примененной в настоящей работе, близки к режимам так называемой низкоэнергетической высокоинтенсивной плазменно-иммерсионной имплантации ионов (как правило, азота), используемой для механического упрочнения поверхности металлов. Для таких режимов характерно возникновение значительных термомеханических напряжений в металле, приводящих к формированию дефектной структуры на глубинах порядка десятков микрометров [7,8]. В нашем случае установлено, что обработка ИИП приводит к образованию микротрещин на поверхности титана, а также к удалению примесных включений с поверхности нержавеющей стали (без образования микротрещин) [4], что может быть причиной описанной выше неоднозначности эффекта ИИП для разных материалов электродов.

Сам факт значительного увеличения импульсной электрической прочности ВП после комплексной обработки ИИП + НСЭП стальных электродов свидетельствует о том, что обычная обработка НСЭП не обеспечивает их полную очистку от следов загрязнений, провоцирующих пробой, вероятно в силу того, что в сталях содержатся включения примесей, размеры которых превышают глубину оплавления ( $\sim 5 \mu\text{m}$ ), а также оксиды с высокой температурой плавления. Исходя из данных, представленных на рис. 3, есть основания полагать, что дальнейшая работа над методиками предварительной очистки поверхности электродов из нержавеющей стали перед обработкой НСЭП позволит выйти на уровень импульсной электрической прочности ВП 1.8–2 MV/cm. Целесообразность использования обработки ИИП в качестве такой методики связана с принципиальной возможностью совмещения ее с обработкой НСЭП в одной установке в пределах одного цикла откатки.

В литературе уделяется большое внимание проблеме внезапного пробоя вакуумных устройств после их длительной эксплуатации в условиях повышенных температур (в частности, пробоя между железо-никелевым экраном и анодом в компактных рентгеновских трубках) [9]. Пробою предшествуют процессы роста „усов“ и „выползания“ включений за пределы исходной поверхности катода. Предварительная очистка от включений электродной оснастки посредством обработки ИИП до отпайки прибора, особенно в комбинации с последующей обработкой НСЭП, может оказаться весьма перспективной в отношении увеличения гарантийного срока эксплуатации такого рода приборов.

## Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность Д.И. Проскуровскому и В.П. Ротштейну за участие в дискуссиях по содержанию работы.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания № FWRM-2021-0007.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский, *Импульсный электрический разряд в вакууме* (Наука, Новосибирск, 1984). [G.A. Mesyats, D.I. Proskurovskii, *Pulsed electrical discharge in vacuum* (Springer-Verlag, Berlin, 1989). DOI: 10.1007/978-3-642-83698-5].
- [2] A.V. Batrakov, D.S. Nazarov, G.E. Ozur, S.A. Popov, D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **4** (6), 857 (1997). DOI: 10.1109/94.654730
- [3] В.П. Ротштейн, Д.И. Проскуровский, Г.Е. Озур, Ю.Ф. Иванов, *Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками* (Наука, Новосибирск, 2019). DOI: 10.7868/978-5-02-038809-3
- [4] E.V. Nefedtsev, S.A. Onischenko, G.E. Ozur, D.I. Proskurovsky, in *2018 28th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (IEEE, 2018), p. 97–100. DOI: 10.1109/DEIV.2018.8537035
- [5] Д.И. Проскуровский, Е.Б. Янкелевич, ПТЭ, № 5, 108 (1973).
- [6] Е.В. Нефедцев, Г.Е. Озур, *Физика плазмы*, **35** (8), 700 (2009). [E.V. Nefyodtsev, G.E. Ozur, *Plasma Phys. Rep.*, **35** (8), 643 (2009). DOI: 10.1134/S1063780X09080030].
- [7] A.I. Ryabchikov, *Surface Coat. Technol.*, **388**, 125561 (2020). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125561
- [8] В.М. Анищик, В.В. Углов, *Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками* (Изд-во БГУ, Минск, 2003).
- [9] R. Behling, *Instruments*, **3** (4), 64 (2019). DOI: 10.3390/instruments3040064