

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»

Факультет физико-математических и естественных наук
Институт физических исследований и технологий

«Допустить к защите»

Директор ИФИТ

д.ф.-м.н., проф.

О.Т. Лоза

«_____» _____ 20__ г.

**Выпускная квалификационная работа
бакалавра**

Направление 03.03.02 «Физика»

ТЕМА Исследование стойкости материалов первой стенки
плазменных установок к воздействию сильноточных электронных пучков

Выполнил студент: Сунчугашев Кирилл Александрович
(Фамилия, имя, отчество)

Группа: НФ3бд-01-18

Студ. билет № 1032182603

Руководитель выпускной

квалификационной работы:

Лоза О.Т. д.ф.-м.н., проф. Директор ИФИТ

(подпись)

Казаков Е. Д. к.ф.-м.н., зам. руководителя отделения НИЦ КИ

(подпись)

Автор _____

(подпись)

г. Москва, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|--|
| 1. Введение..... | 3 |
| 2. Цели и задачи..... | 6 |
| 3. Методы исследования воздействия плазмы на перовую стенку мощных плазменных установок | 7 |
| 3.1. Испытания при стационарных и квазистационарных нагрузках (термоциклирование)..... | 7 |
| 3.2. Испытание импульсными нагрузками..... | 9 |
| 3.3. Изменение микроструктуры после отверждения расплавленной поверхности и рекристаллизации вольфрама..... | 15 |
| 3.4. Радиационно-повреждённый вольфрам | 18 |
| 4. Экспериментальные исследования на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» | 22 |
| 4.1 Сильноточный ускоритель «Кальмар» | 22 |
| 4.2. Диагностический комплекс | 26 |
| 4.3 Постановка эксперимента..... | 28 |
| 5. Результаты экспериментов | 31 |
| 5.1. Выбор материала для катода | 31 |
| 5.2. Исследование стойкости материалов..... | 33 |
| 5.2.1. Проведение экспериментов по исследованию прочностных свойств образцов из коррозионностойкая ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 (Русфер) при облучении сильноточным электронным пучком на установке «Кальмар». Микроскопическое исследование образцов. | 33 |
| 5.2.2. Проведение экспериментов по исследованию прочностных свойств образцов из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) при облучении сильноточным электронным пучком на установке «Кальмар». Микроскопическое исследование образцов. | 39 |
| 6. Вывод..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 7. Заключение | 44 |
| 8. Список литературы | 45 |

1. ВВЕДЕНИЕ

При аварийных ситуациях на мощных импульсных плазменных установках на стенку вакуумной камеры могут воздействовать потоки плазмы и пучки заряженных частиц, в частности, убегających электронов. Подобные импульсные воздействия с суммарным энерговыделением до сотен Дж/см² и весьма значительными потоками мощности, приводят к значительному повреждению внутренней поверхности стенок вакуумной камеры [2].

При интенсивном плазменно-тепловом воздействии на пластины дивертора и на облицовку первой стенки, появляется проблема плавления и эрозии материала, которая является ключевой при создании международного экспериментального термоядерного реактора типа токамак ИТЭР и реакторов следующего поколения [3].

Для изготовления компонентов первой стенки (ограничителей и диверторных пластин) используют вольфрам. Первая стенка ограничивает воздействие плазмы с вакуумной камерой в современных плазменных установках и будет использоваться в будущих установках реакторного масштаба: вольфрамовый дивертор будет использоваться в международном экспериментальном термоядерном реакторе типа токамак ИТЭР, обсуждается использование вольфрама в планируемой электростанции «ДЕМО», использующей термоядерный синтез, и в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) [5].

На пластины дивертора в токамаке ИТЭР будут осуществляться тепловые нагрузки в стационарной стадии DT-разряда будут достигать ~10 МВт·м⁻², что будет приводить к повышению температуры пластин в среднем до ~1100 °С. В срывах импульсные кратковременные нагрузки на первую стенку будут достигать величины гигаваттного масштаба 0,6—3,5 ГВт· м⁻², что будет вызывать периодически повышения температуры материала до более высокой температуры. Мощные нагрузки подобного уровня может привести к перегреву и плавлению поверхности первой стенки, материалом

которой, планируется использовать вольфрам. Когда мощные тепловые нагрузки имеют циклический характер, то температура поверхности первой стенки может превышать температуру рекристаллизации, что, приводит к изменению микроструктуры вольфрама, росту зёрен, ухудшению механических свойств и охрупчиванию. При возможном растрескивании вольфрама, рекристаллизации поверхностных слоёв, образовании пылевых частиц после разрушения поверхностных слоёв, формировании неоднородных и пористых слоёв на поверхности вольфрамовых пластин в ИТЭР при критических и субкритических тепловых нагрузках необходимо провести оценку последствий. Также необходимо определить характеристики стойкости вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках для решения проблем, которые могут возникать на первой стенке в термоядерных установках следующего поколения ТИН и ДЕМО [5].

На свойства плазмы может повлиять и частицы субмикронного размера, которые появляются при взаимодействии плазмы на первую стенку термоядерного реактора. Поэтому изменение микроструктуры поверхности вольфрамовых пластин первой стенки тесно связано с проблемой формирования пыли в термоядерном реакторе [5].

Для возможного использования вольфрама в качестве материала для дивертора в ИТЭР необходимо провести дополнительные испытания по изучению стойкости вольфрама в условиях импульсных плазменных нагрузок, в том числе срывов [4].

Также в качестве конструкционного материала при создании термоядерного реактора предполагается использовать ферритно-мартенситную сталь с низкой активацией в термоядерном спектре нейтронов. Из-за того, что сталь обладает высоким коэффициентом распыления, низкой теплопроводностью и высоким атомным номером входящих в её состав элементов, негативно влияющих на плазму, сталь редко рассматривают как материал первой стенки. Несмотря на это, некоторыми авторами обсуждается вопрос использования обращенных к плазме элементов стали без

дополнительной защиты. Например, сталь используется в отдельных местах центральной колонны токамака ASDEX-U именно в качестве обращённого к плазме материала.

Термоядерная плазма может оказывать воздействие на сталь не защищенной дополнительными элементами, например патрубки вакуумной камеры термоядерного реактора. В материалах элемента реактора может накапливаться изотопы водорода: тритий и дейтерий и это накопление может оказывать существенное влияние на баланс топлива. Кроме того, один из элементов топлива — тритий является дорогостоящим и радиоактивным элементом. В России во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара создана низкоактивируемая ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 (русфер) [4].

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью данной работы являлось исследование стойкости материалов первой стенки плазменных установок к воздействию сильноточных электронных пучков. В качестве исследуемых материалов были выбраны перспективные образцы для первой стенки плазменных установок из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181. Эксперименты проводились на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» в НИЦ «Курчатовский институт».

Сильноточный ускоритель электронов имеет достаточно широкий диапазон плотностей энергий выдаваемой на мишень от 1 до 1500 Дж/см². Это позволяет на одной установке проводить эксперименты с различными энергетиками, моделируя различные ситуации, возможные на сильноточных плазменных установках. Установка обладает диагностикой, с помощью которой можно наблюдать за ударно-волновыми, откольными процессами и динамикой плазмы при облучении образцов.

Основные задачи были связаны с определением отклика материалов – кандидатов на воздействие мощных импульсных потоков энергии. Для различных интегральных потоков измерялся унос массы с поверхности образца, степень и характер повреждения поверхности.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ НА ПЕРОВУЮ СТЕНКУ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

Исследование стойкости вольфрама при мощных плазменно-тепловых нагрузках осуществляется и планируется в экспериментах на токамаках JET, AUG, Alcator C-Mod, T-10, стеллараторе LHD, линейных плазменных установках, импульсных плазменных ускорителях типа КСПУ-Т, в электронно- и ионно-лучевых установках, в лазерных экспериментах. [5].

В экспериментах на современных крупных токамаках (JET, AUG) и стеллараторе LHD, плазменно-тепловые нагрузки не достигают уровня нагрузок, ожидаемых в ИТЭР. Поэтому проводятся исследования материалов в условиях интенсивного плазменного, корпускулярного и лазерного облучения проводятся также на других установках. В квазистационарных плазменных ускорителях типа КСПУ-Т, КСПУ-Ве, КСПУ-Х5 производится облучение мощными импульсными плазменными потоками по тестовым образцам с плотностью мощности до $5 \text{ ГВт} \cdot \text{м}^2$ и длительностью менее миллисекунды, что соответствует уровню тепловой нагрузке на диверторные пластины в ИТЭР.

В установках JUDITH-2 в Германии, IDTF в России, FE200 в Европе, JEBIS в Японии и др. с электронным пучком высокой мощности, обеспечивается облучение с большой тепловой мощностью.

Установки с вытягиванием ионного пучка из сильноточного разряда типа Magnum-PSI, MARION, PISCES Pilot-PSI позволяют получать плотность мощности облучения до $20 \text{ МВт} \cdot \text{м}^2$ в стационарном режиме в течение десятков и сотен секунд. В России испытания вольфрама проводятся также в установках ГОЛ-3, СОПМАТТ [5].

3.1. Испытания при стационарных и квазистационарных нагрузках (термоциклирование).

Испытания электронным пучком в установке IDTF (НИИЭФА) и других установках Европы и Японии показали, что вольфрамовые моноблоки, изготовленные из различных сортов вольфрама (Рисунок 1) растрескиваются при термоциклировании.

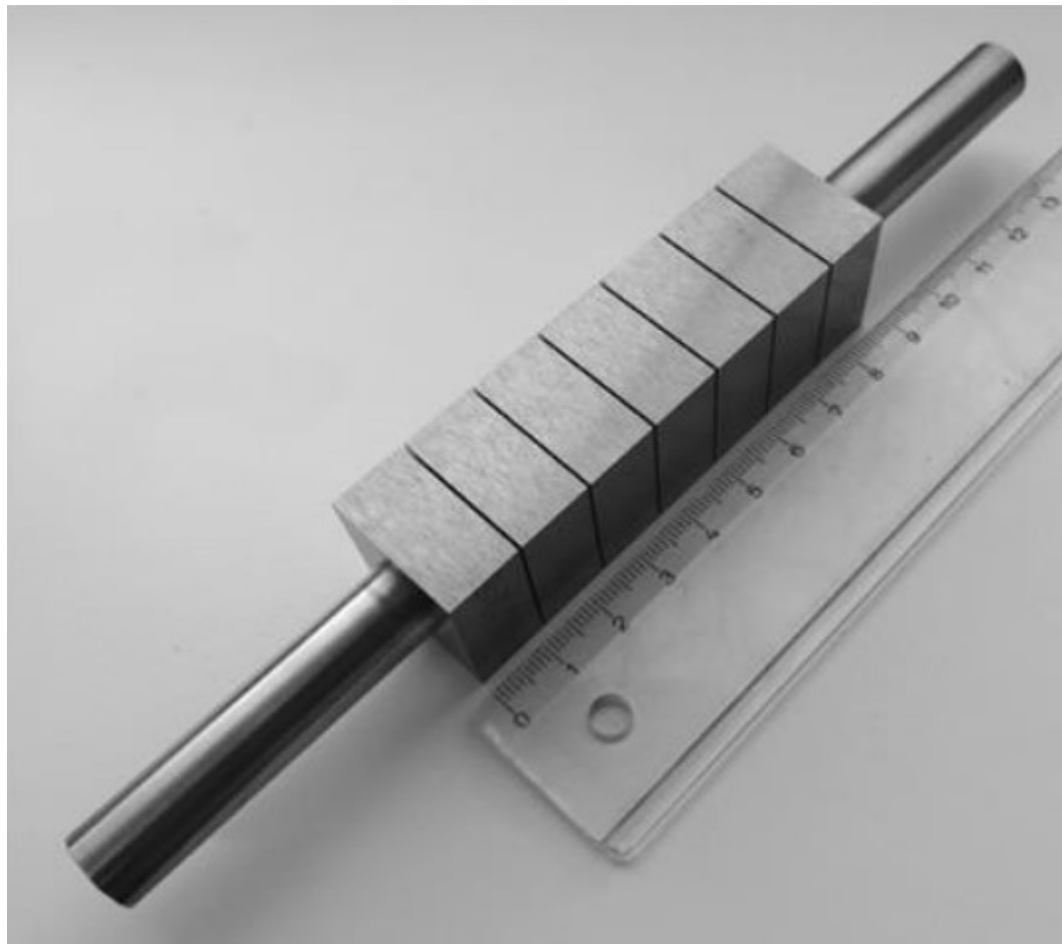


Рисунок 1 Моноблоки диверторной облицовки ИТЭР. Общий вид сборки из семи сегментов

Испытания производились при следующих параметрах, длительность одного импульса около 0,5 мс, количество импульсов от 5000 до 18000, средняя мощность нагрузки 10—20 МВт·м⁻², максимальная энергия 0,1 МДж·м⁻². На моноблоках с поперечной структурой зёрен наблюдалось крупномасштабное растрескивание (Рисунок 2). Крупномасштабного растрескивания на моноблоках, изготовленных из прокатанных листов, не наблюдалось. Это означает, что стойкость вольфрамовых моноблоков зависит от изначальной микроструктуры вольфрама. [5].

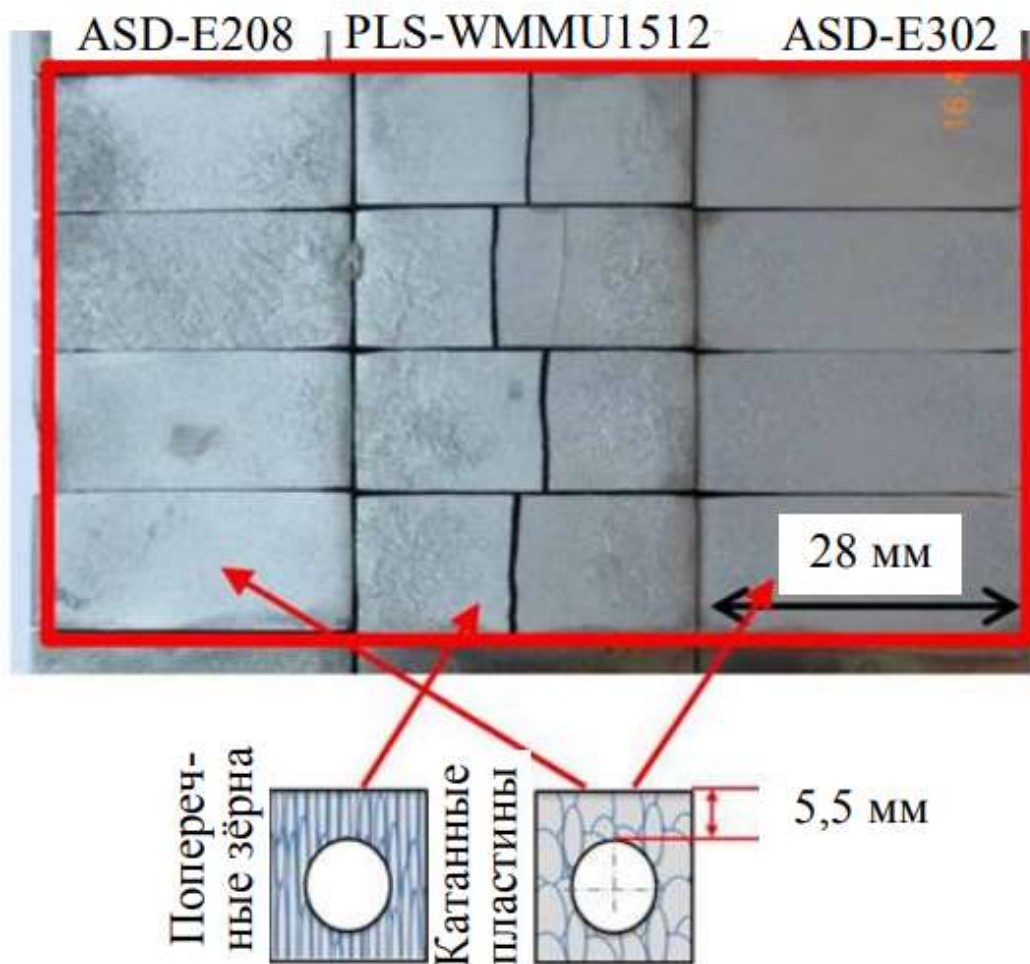


Рисунок 2 моноблоки, изготовленные из различных сортов вольфрама марки ASD и PLS, после испытания термоциклированием мощными электронными пучками. Схематично показана структура моноблоков с соответствующей поперечной и продольной структурой зёрен (внизу)

3.2. Испытание импульсными нагрузками

Для изучения и условий тепловых нагрузок в срывах в ИТЭР используется методика экспериментов в импульсных плазменных установках в серии последовательных разрядов числом от одного до нескольких сотен и тысяч.

Испытания проводились и комбинированном воздействии квазистационарного плазменного разряда и одновременной нагрузки электронным пучком. Во время таких испытаний ожидается несколько

эффектов разрушения и модификации поверхности вольфрама, такие как растрескивание, рекристаллизация и плавление поверхностного слоя.

При импульсных плазменных испытаниях вольфрамовых пластин в установке КСПУ-Т зарегистрировано образование трещин на поверхности вольфрама при достаточно низких нагрузках в сравнении с порогом плавления. На поверхности образцов при испытании с плазменной нагрузкой до $0,5 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ образуются трещины, ширина которых растет с количеством импульсов. При количестве импульсов ~ 500 , ширина трещин достигает 20 мкм. Впоследствии термоциклирования электронным пучком, характеристики которого 2000 циклов с плотностью мощности $10 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и 300 циклов с плотностью мощности $20 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$, ширина трещин на мишенях увеличилась до 50-200 мкм.

При тепловой нагрузке $0,8 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ в испытаниях в КСПУ-Т трещины на поверхности вольфрама начинают регулярно образовываться, что ниже порога его плавления. Трещины можно разделить на два вида: 1) крупные с характерным размером ячеек 1-2 мм и характерным значением глубины проникновения в материал 500 мкм 2) мелкие с характерным размером ячеек 200 мкм и характерным значением глубины проникновения в материал 50 мкм. Стоит заметить, что глубина крупных трещин существенно превышает максимальную толщину расплавленного слоя (Рисунок 3).

На (Рисунок 4) представлены результаты пластин вольфрама, которые планируется использовать в ИТЭР. Видно, поверхность сильно оплавляется и сильно изменяется при экспериментах на КСПУ-Т после 100 импульсов под нагрузкой $1,6 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, что соответствует нагрузке на материал первой стенки при срыве в ИТЭР.

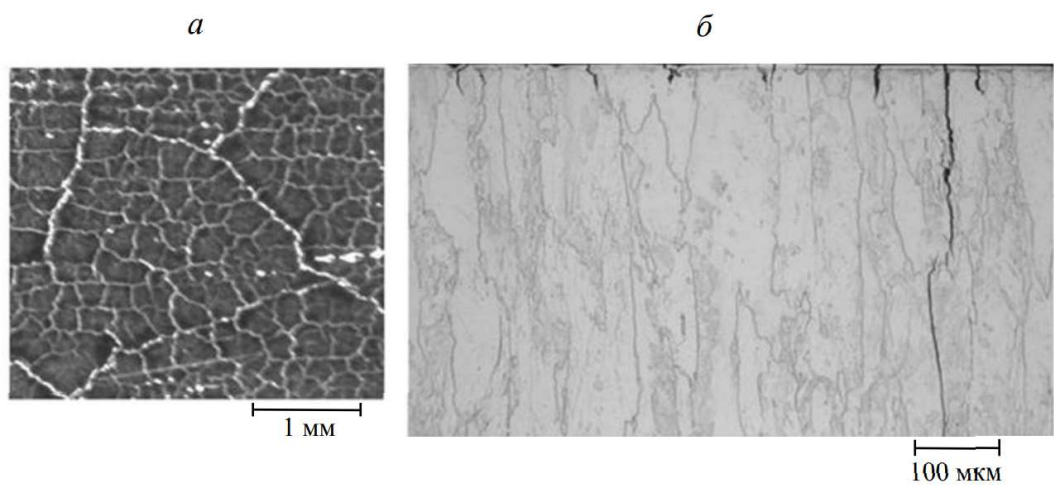


Рисунок 3. Первичные (а) и вторичные трещины (б) вольфрама после испытаний в КСПУ-Т при нагрузке $1 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$, 100 импульсов



Рисунок 4 Испытание вольфрама в КСПУ-Т при нагрузке $1,6 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ (эквивалентно воздействию срыва в ИТЭР), 100 импульсов

На (Рисунок 5) представлены результаты испытаний плазменным пучком с электронным пучком вольфрамовых моноблоков сорта ITER-grade корпорации A.L.M.T. Corp. Испытания выявили образование трещин в зоне оплавления поверхности вольфрама. Было произведено 25 плазменных импульсов плотностью мощности $\sim 2,0 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ и 300 импульсов электронного пучка с плотностью мощности $20 \text{ МВт}\cdot\text{м}^{-2}$ и длительностью 10с.

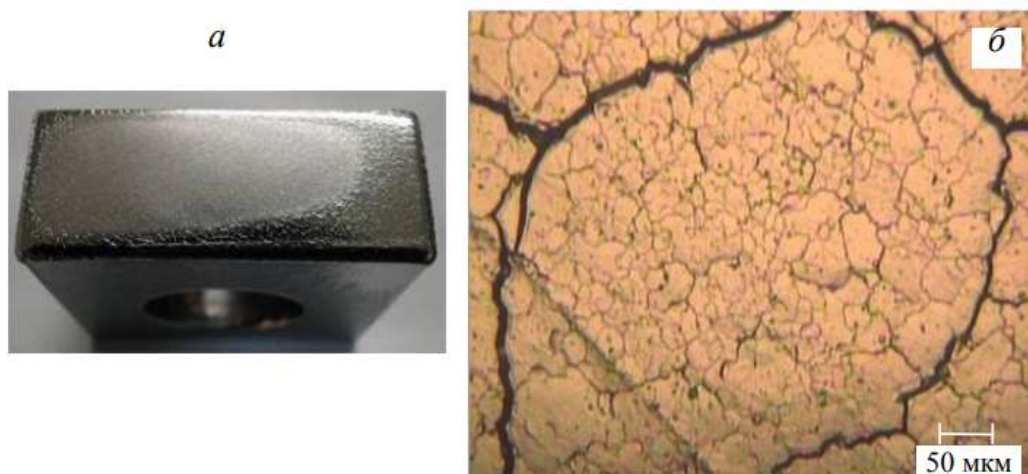


Рисунок 5 Общий вид моноблока вольфрама ITER-grade W марки A.L.M.T. Corp. (a) и трещины в переплавленном слое — микрофотография СЭМ (б)

Когда ставится цель достичь предела разрушений моноблока при испытаниях предельно мощным плазменно-тепловыми нагрузками при термоциклировании, является результат, когда моноблок раскалывается поперёк переплавленной зоны (Рисунок 6).



Рисунок 6. Фотография моноблоков вольфрама ITER-grade марки A.L.M.T. Corp. после плазменно-тепловых испытаний в плазменной пушке и электронным пучком. На поверхности образуются большие трещины

Для моделирования воздействия срыва в ИТЭР требуются плазменные нагрузки $\sim 2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ и выше.

При экспериментах на КСПУ-Т с такими нагрузками, поверхность образца из вольфрама оплавляется и появляются мелкие трещины на поверхности после отверждения. При этом в глубине образцов из вольфрама образуются большие трещины вдоль поверхности (Рисунок 7). Они могут вызывать охрупчивание поверхности, разрушение поверхностных слоёв с образованием пылевых частиц различного размера. В поверхностных слоях формируются поперечные к поверхности трещины на глубину до 50 мкм (Рисунок 8)

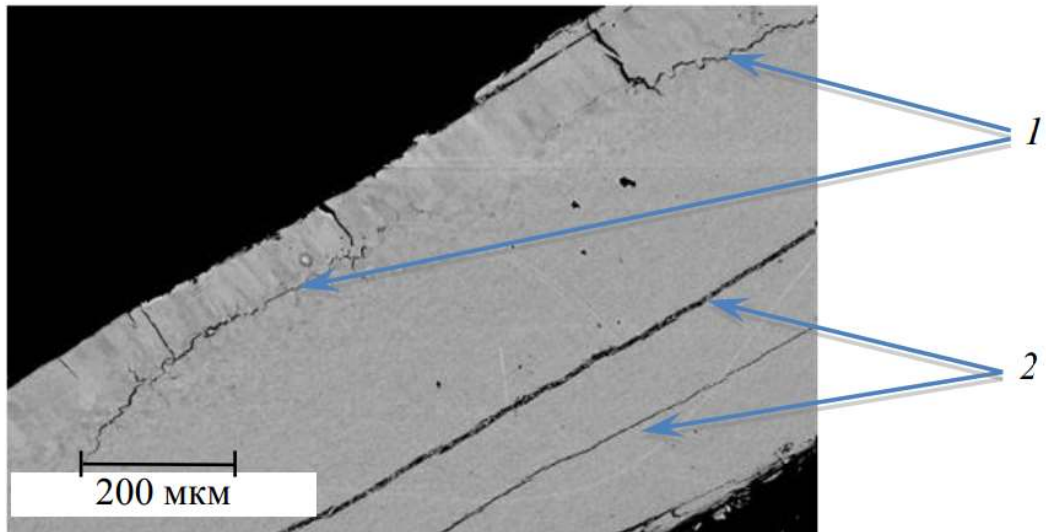


Рисунок 7 Металлографический срез вольфрамовой мишени после испытаний в КСПУ-Т при нагрузках, соответствующих срыву в ИТЭР: 1 — трещины вдоль поверхности после рекристаллизации поверхностного слоя; 2 — трещины в глубине, вызванные тепловым перегревом мишени и дефектами заготовки

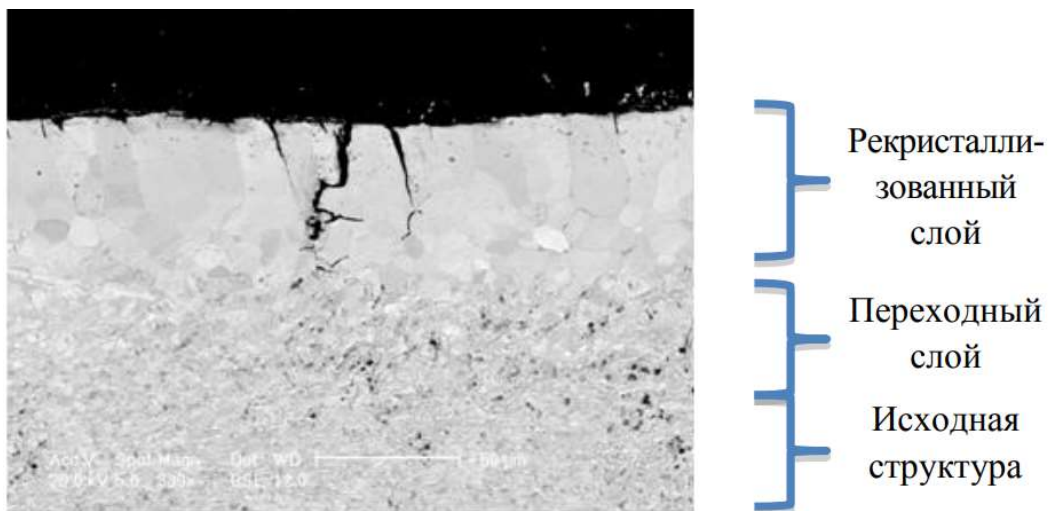


Рисунок 8 Металлографический срез вольфрамовой мишени после испытаний в КСПУ-Т при нагрузках, соответствующих срыву в ИТЭР

По результатам исследований в плазменной установке КСПУ-Х50 различных образцов вольфрама с нагрузками, имитирующими срывы в ИТЭР, наблюдаются крупные трещины (независимо от сорта вольфрама) и микротрещины, образующиеся, возможно, при отверждении оплавленных слоёв [5].

3.3. Изменение микроструктуры после отверждения расплавленной поверхности и рекристаллизации вольфрама

Вольфрамовая облицовка при критических тепловых нагрузках в результате срывов плазмы, может достигать высоких температур, вплоть до эффекта плавления поверхности вольфрама (температура плавления вольфрама $T_{пл} = 3370$ °С). При повышении температура металла происходит происходят рекристаллизация — укрупнение зёрен, с увеличением времени критического теплового воздействия зёрна также укрупняются. В металлофизике известно правило А.А. Бочвара, которое связывает температуру начала (порога) рекристаллизации $T_{рек}$ металлов и сплавов с температурой плавления $T_{пл}$, для вольфрама $T_{рек} \cong 0,4T_{пл}$. В металлургии известна минимальная температура рекристаллизации вольфрама $T_{рек} \cong 1200$ °С. Процесс рекристаллизации зависит от многих условий. При рекристаллизации происходят деградация механических свойств, охрупчивание, уменьшается жаропрочность. С учетом данных известных в металлургии, проводятся испытания вольфрамовых образцов и исследование структуры нагрузками, ожидаемыми в ИТЭР.

Мишени вольфрама российской марки ВМ-П (ОАО «ПОЛЕМА», англ. POLEMA, этот сорт вольфрама предполагается использовать для изготовления диверторных пластин ИТЭР) исследованы после испытаний в плазменном ускорителе КСПУ-Т с плотностью энергии, соответствующей ожидаемой в ИТЭР при плазменной фазе срыва.

Глубокие крупномасштабные трещины могут быть вызваны первоначальными дислокациями из-за метода производства вольфрама промышленной прокаткой, что подтверждается соответствующими испытаниями вольфрама с различной исходной структурой — прокатанный вдоль поверхности и с поперечной структурой зёрен.

Наклонные границы гранул в слое рекристаллизации (Рисунок 9) могут приводить к повышенной вероятности охрупчивания. В рекристаллизованном слое наблюдаются колоннообразные гранулы, вытянутые перпендикулярно поверхности (Рисунок 10) независимо от исходной структуры вольфрама — прокатанного или с поперечной структурой кристаллитов. Гранулы идентичного размера в рекристаллизованном слое формируются независимо от исходной текстуры.

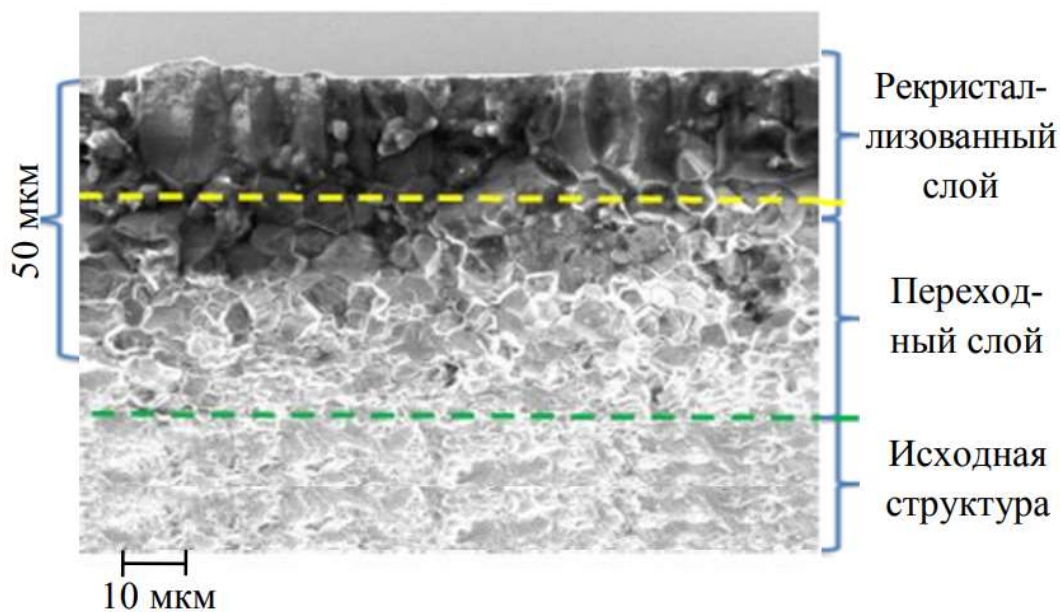


Рисунок 9 Металлографический срез мишени вольфрама после испытаний в КСПУ-

T ($\Delta t = 0,5$ мс, 2 МДж·м⁻², $F_{HF} \approx 90$ МДж·м⁻²·с^{-0,5}, $N = 2$ импульса)

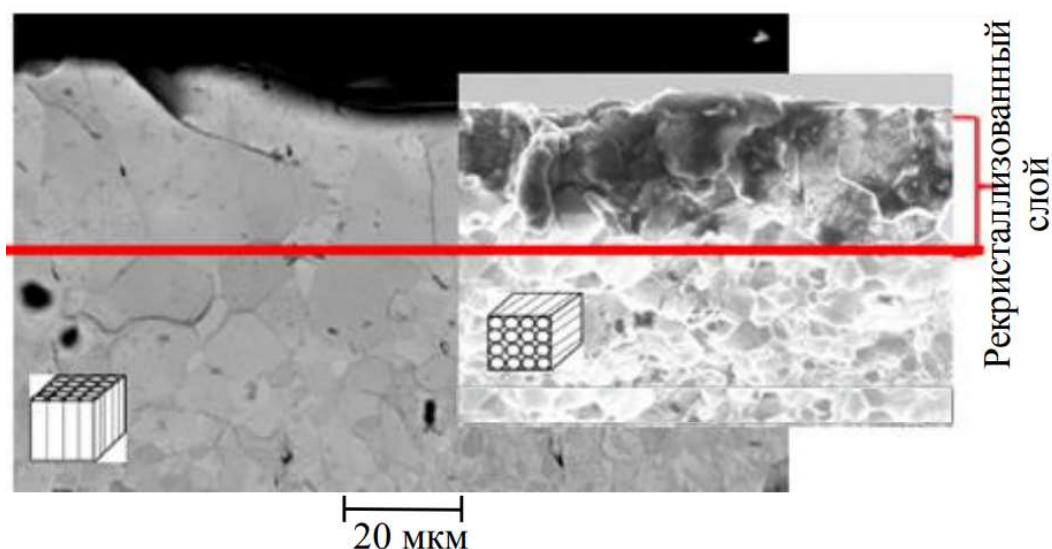


Рисунок 10 Металлографический срез мишеней вольфрама с различной ориентацией зёрен (перпендикулярно и параллельно поверхности — отмечены схематическими указателями) после испытаний в КСПУ-Т, $\Delta t = 0,5$ мс, $2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$, $F_{\text{HF}} \approx 90 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$, $N = 2$ импульса

По результатам исследований при мощной тепловой нагрузке в КСПУ-Т, показало, что после оплавления рекристаллизованный слой на образце с примесями бора на поверхности вольфрамовой мишени не имеет качественных отличий от рекристаллизованного слоя образца чистого вольфрама без примесей. Исследования структуры вольфрамовой мишени после испытаний электронным пучком (в установке JUDITH-2, Германия) (Рисунок 11 и Рисунок 12) и нейтральными мощными потоками (в установке GLADIS, Германия) показали такие же результаты: формирование рекристаллизованного слоя с колоннообразными гранулами, ориентированными перпендикулярно поверхности [5].

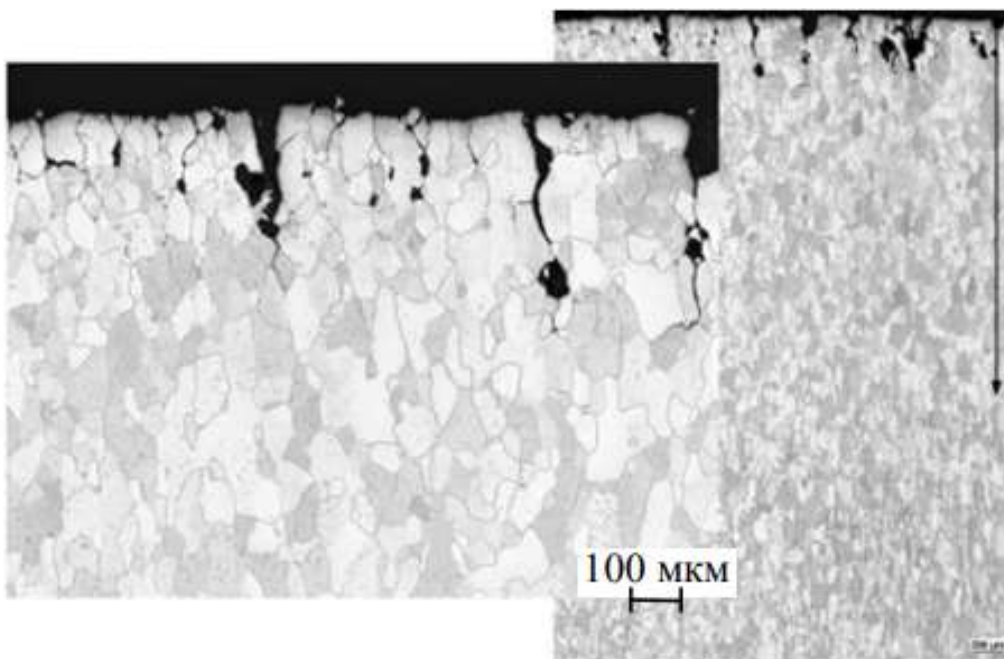


Рисунок 11 Металлографический срез мишени вольфрама после испытаний электронным пучком в JUDITH-2 после $N = 18\ 000$ импульсов, эффективный фактор теплового потока $F_{HF} \approx 4,5\ \text{МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$, образуется рекристаллизованный слой на глубине до 2 мм

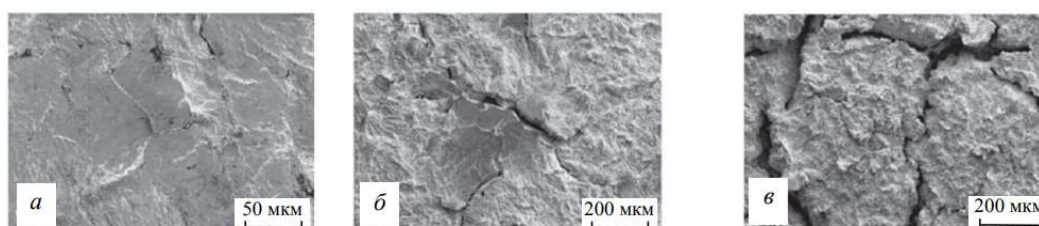


Рисунок 12 СЭМ-изображение поверхности вольфрамового образца после испытаний электронным пучком в установке JUDITH-2, $0,41\ \text{ГВт} \cdot \text{м}^{-2}$ (что соответствует фактору теплового потока $F_{HF} \approx 9\ \text{МВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-0,5}$ и плотности энергии $0,2\ \text{МДж} \cdot \text{м}^{-2}$) после 1000 (а), 10 000 (б), 100 000 (в) импульсов, квазистационарная температура образца $700\ \text{°C}$

3.4. Радиационно-повреждённый вольфрам

В [10] представлены результаты по облучению вольфрама подверженного экспозиции в дейтериевой плазме на установке ЛЕНТА с

аксиальным магнитным полем, на которой экспериментально моделируется дивертор и пристеночный слой токамака

Поверхность облучённого вольфрама после экспозиции в плазме испытывает изменения в микроструктуре. На (Рисунок 13, а), а показана поверхность облучённого вольфрама (He^{++} , $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, 3,5 МэВ) перед экспозицией в плазме и после неё (Рисунок 13, б) с эрозией на глубину 3,6 мкм. Обработка плазмой выявила ячеистую структуру повреждённого слоя, сформированную в процессе эрозии с выходом гелия из пор, образованных в материале в результате облучения.

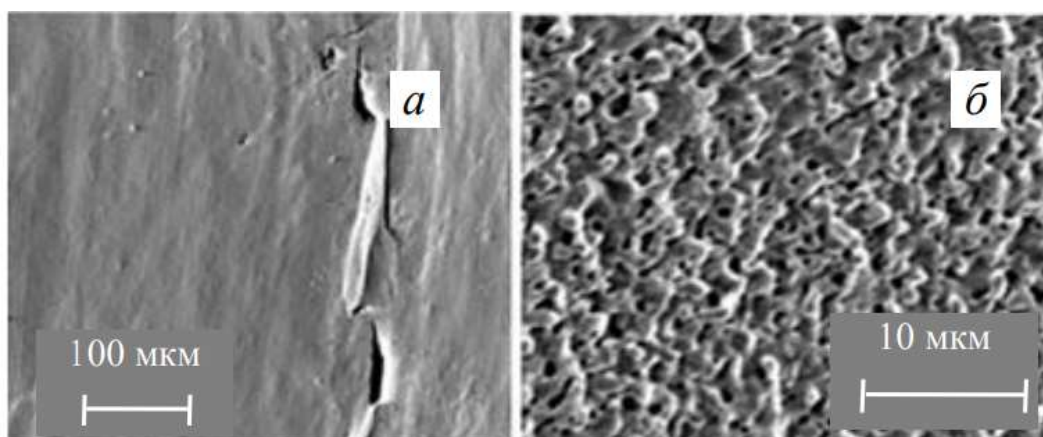


Рисунок 13 Вольфрам после облучения ионами гелия ($3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, 3,5 МэВ): а — поверхность после облучения; б — после экспозиции в D-плазме ($2,4 \cdot 10^{21} \text{ D/см}^2$) с эрозией до 3,6 мкм

Образцы вольфрама после облучения ионами углерода не имеют столь явно выраженных изменений структуры, вызванных плазмой. На (Рисунок 14) в качестве примера показаны фотографии СЭМ-вольфрама, облучённого ионами углерода (10 МэВ), после обработки плазмой, на которых видно образование характерной волнистой структуры. Эти фотографии отвечают близким значениям величины первичных дефектов, но разным температурам плазменной обработки — комнатной температуре и 500 °С. Причём разница для этих двух случаев хотя и незначительна, однако вполне заметна

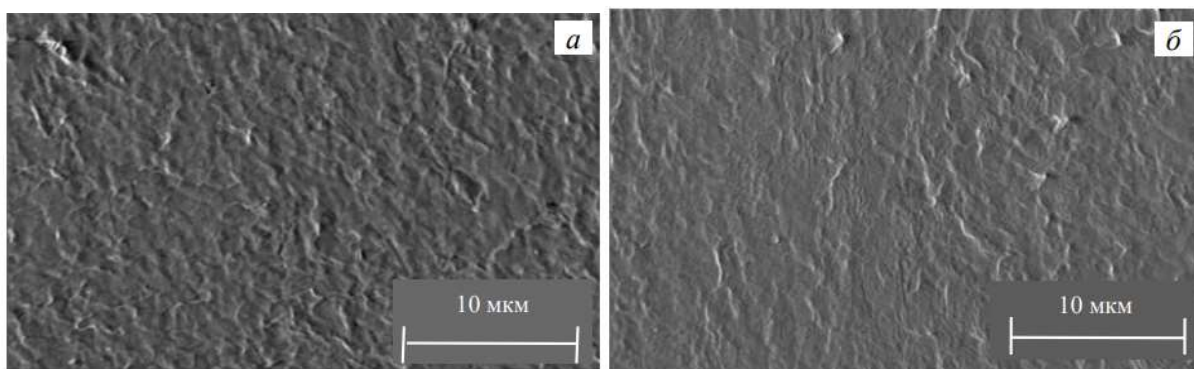


Рисунок 14. Поверхность вольфрама, облучённого ионами углерода (10 МэВ, $(1,5—2)10^{17} \text{ C}^{3+}/\text{см}^2$), после эрозии в дейтериевой плазме на глубину 1 мкм при разной температуре: а — комнатная температура; б — 500 °С

Также на плазменной установке ЛЕНТА проводилось исследование по облучению вольфрама ионами азота. Исследование микроструктуры поверхности образцов после облучения ионами азота показало, что видимых изменений поверхности после облучения не наблюдается. На (Рисунок 15) показаны фотографии поверхности образца вольфрама Plansee в исходном состоянии и после облучения ионами азота [9].

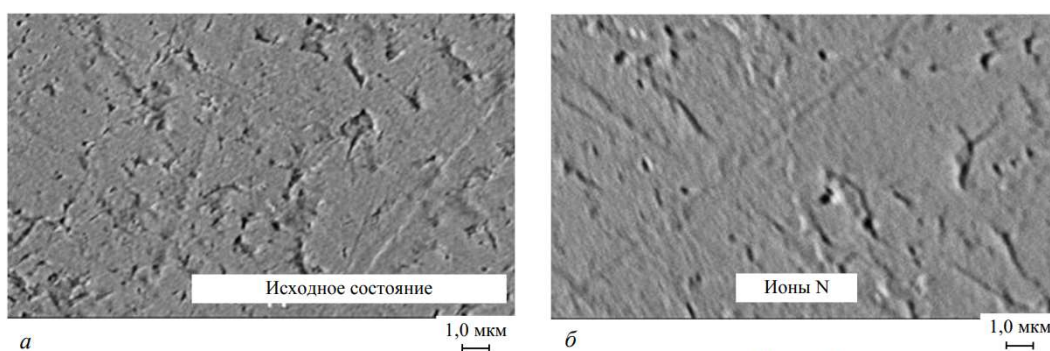


Рисунок 15. Поверхность вольфрама Plansee до (а) и после (б) облучения ионами азота (28 МэВ, 10^{17} ион/см²)

Также проводятся эксперименты на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар». Изучаются образцы из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Русфер) при облучении образцов многократным импульсом с

энергией порядка 100 Дж. Это приводит к оплавлению стали и растрескиванию образцов из вольфрама [7].

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СИЛЬНОТОЧНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ «КАЛЬМАР»

4.1 Сильноточный ускоритель «Кальмар»

Для изучения прочностных свойств образцов из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181, мною был выбран сильноточный ускоритель электронов «Кальмар» (Рисунок 16).



Рисунок 16. Установка «Кальмар»

Ускоритель «Кальмар» обеспечивает ток $I = 30$ кА при энергии электронов $E = 0,3$ МэВ и длительности импульса тока на полувисоте $\tau = 10^{-7}$ с.

Конструкция ускорителя максимально проста и надежна в работе. Основным элементом ускорителя является двойная формирующая линия (ДФЛ) с электрической длиной 70 нс, заряжаемая от генератора импульсов напряжения (ГИН). В качестве диэлектрика в ДФЛ используется

дистиллированная вода с удельным сопротивлением $2 \times 10^6 \text{ Ом} \times \text{см}$. Выходное напряжение ГИН составляет $6 \times 10^5 \text{ В}$ при энергозапасе 6.3 кДж.

Роль разрядника ДФЛ выполняет водяной промежуток

Генератор импульсов напряжения собран по схеме Аркадьева-Маркса и состоит из 140 конденсаторов ИМН-100-01. Принципиальная схема представлена на (Рисунок 17).

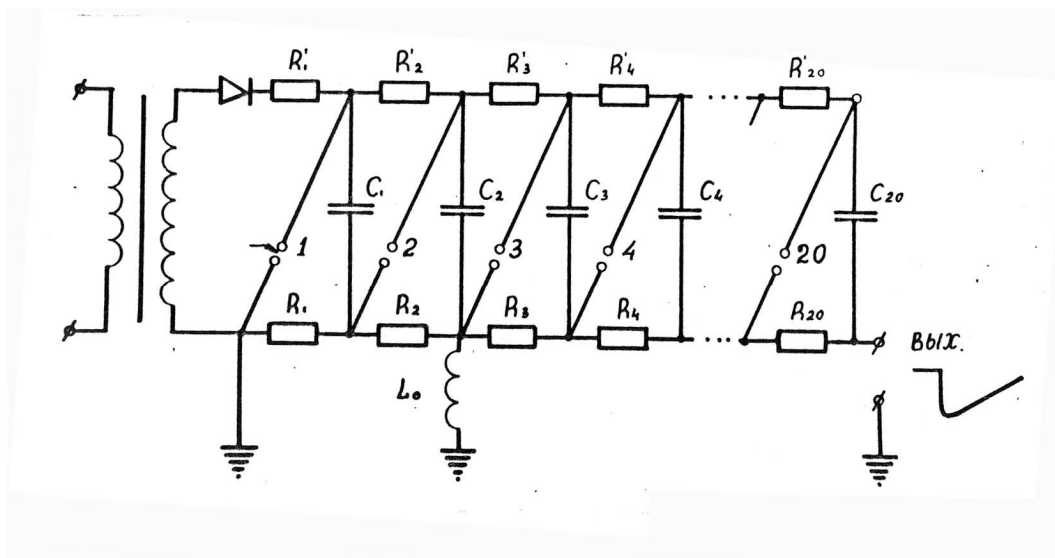


Рисунок 17 Принципиальная схема ГИН

ГИН содержит 20 ступеней умножения напряжения, каждая из которых состоит из 7 конденсаторов, соединённых параллельно. Все разрядники неуправляемые открытого типа, кроме первого. Каждый из них состоит из двух шаровых электродов диаметром 4 см с воздушным зазором. Первый разрядник – тригatronного типа работает в атмосфере азота при давлении 3 атмосферы. Резисторы R_1 - R_{20} , R'_1 - R'_{20} , равные 10 кОм, выполнены из отрезков полиэтиленовой трубки диаметром 20 мм, длиной 1,5 м, залитых раствором CuSO_4 . Индуктивность L_0 , равная 15 мкГн, представляет собой 30-витковую катушку, намотанную кабелем РК-3 (без металлической оплетки) на цилиндре из оргстекла диаметром 6 см. Конструкция каркаса генератора блочная, четырехъярусная и смонтирована из фанеры ДСП. Для уменьшения собственной индуктивности ГИН электрическая схема генератора собрана по типу «зигзаг».

Как видно из (Рисунок 17) схема ГИН отличается от традиционной введением индуктивности L_0 , являющейся нагрузкой двух первых каскадов генератора. Индуктивность L_0 за счет собственной емкости увеличивает паразитную емкость второго каскада генератора, что приводит к увеличению перенапряжения на втором разряднике. После срабатывания второго разрядника на индуктивности L_0 выделяется хорошо сформированный импульс напряжения с удвоенной амплитудой, который прикладывается к последующим разрядным промежуткам и вызывает срабатывание ГИН. Чтобы форма импульса, вырабатываемая ГИН не искажалась, необходимо выполнить условие:

$$L_0 \gg 2L_r/n \quad (1)$$

где L_r – индуктивность ГИН, n – число каскадов умножения.

Благодаря введению индуктивности L_0 разброс задержки срабатывания ГИН не превышает $\Delta\tau_3 = 15-20$ нс при $\tau_3 = 250$ нс и выходном напряжении более 80% пробойного.

На (Рисунок 18) приводится эквивалентная электрическая схема установки «Кальмар» в режиме зарядки.

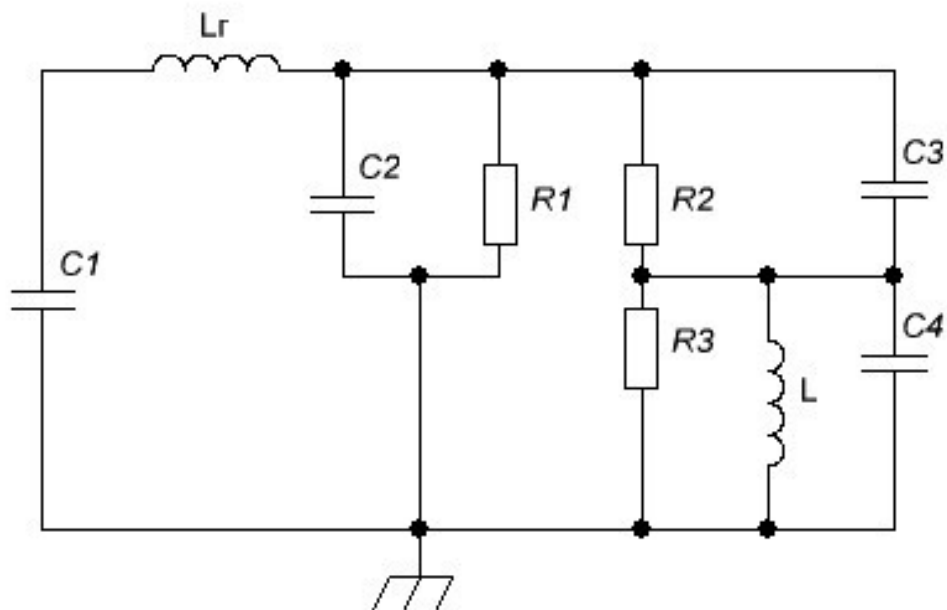


Рисунок 18. Эквивалентная электрическая схема установки «Кальмар» в режиме зарядки. c_1 – Ёмкость ГИН, c_2, c_3 – Ёмкости плеч ДФЛ, c_4 – Ёмкость коаксиального трансформатора, L_r – Индуктивность ГИН и цепей зарядки, R_1, R_2, R_3 – Сопротивления утечки по воде., L – Индуктивность развертки

Индуктивность L обеспечивает симметричную зарядку ДФЛ. Кроме того, путем изменения величины индуктивности L можно в широких пределах регулировать амплитуду предимпульса вплоть до 3-5% амплитуды основного импульса напряжения.

Ёмкость ГИН (35 нФ) была выбрана близкой к ёмкости ДФЛ (ёмкость плеч ДФЛ: $c_2 = 14$ нФ, $c_3 = 12.5$ нФ), что обеспечивает высокую эффективность резонансной зарядки ДФЛ (период зарядки соответствует циклической частоте $\omega = 1.7 \times 10^6$ с⁻¹).

Простота конструкции ускорителя «Кальмар», обусловленная в первую очередь простейшим способом коммутации (пробой разрядного промежутка в воде), заключается также в использовании несложной, но эффективной защиты от гидроудара, возникающего при срабатывании водяного разрядника.

Сильноточный ускоритель электронов имеет достаточно широкий диапазон плотностей энергий выдаваемой на мишень от 1 до 1500 Дж/см². Это позволяет на одной установке проводить эксперименты с различными энергетиками, моделируя различные ситуации, возможные на сильноточных плазменных установках. Выдаваемую установкой энергетика, можно изменять с помощью изменения воздушного зазора между разрядниками на генераторе импульса напряжения.

Диодный узел представлен на (Рисунок 19). Как было сказано выше, сильноточный ускоритель электронов «Кальмар» обладает широким диапазоном плотностей энергий. Поэтому диодный узел, должен обеспечивать воздействие электронного пучка на исследуемую мишень. Также должны быть предусмотрены оптические окна для проведения оптических наблюдений за поведением мишени [6].



Рисунок 19. Конструкция диодного узла

4.2. Диагностический комплекс

Установка обладает диагностикой, с помощью которой можно наблюдать за ударно-волновыми, откольными процессами и динамикой

плазмы при облучении образцов. Схема диагностики, используемой в моём эксперименте представлена на (Рисунок 20).

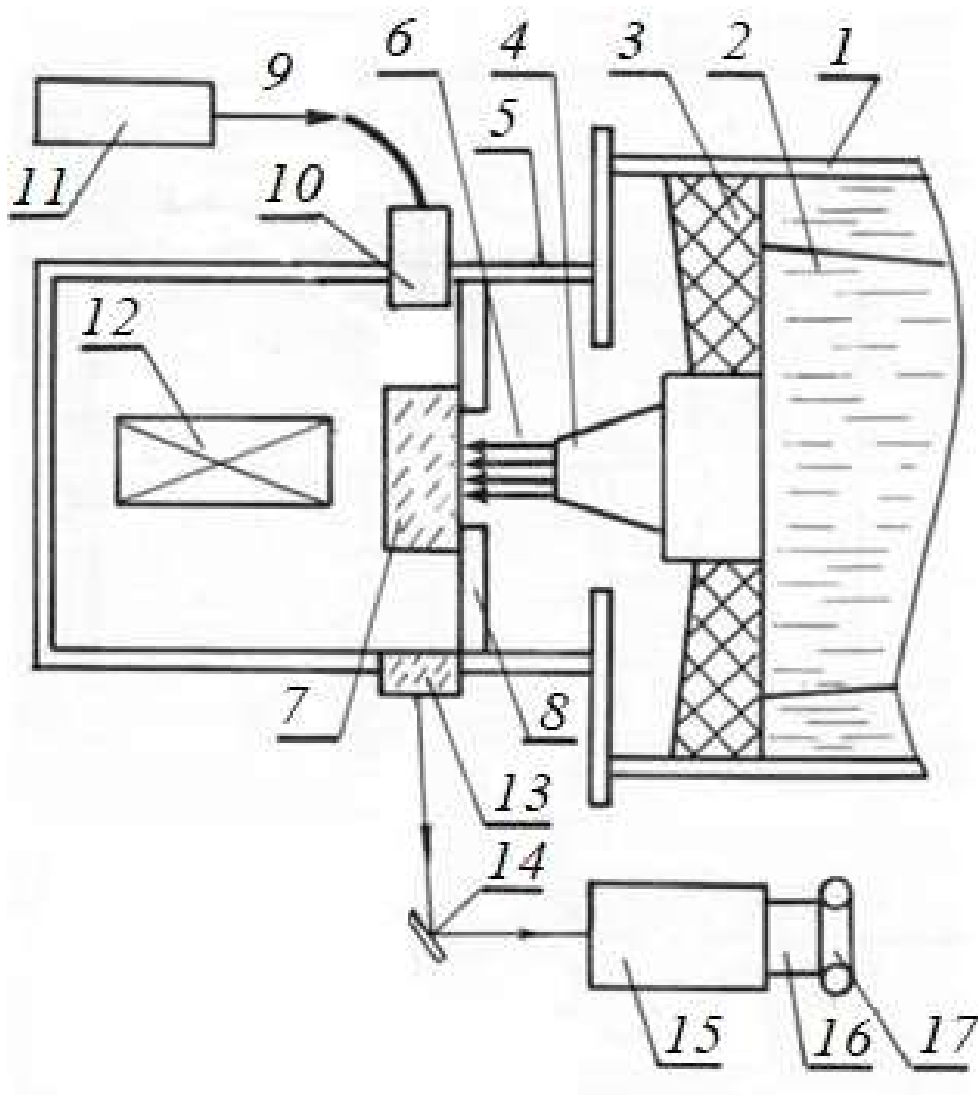


Рисунок 20 Схема диагностики

1 – Камера ускорителя, 2 – Дистиллированная вода, 3 – Изолятор, 4 – Катод, 5 – Вакуумная камера, 6 – релятивистский электронный пучок (РЭП), 7 – Исследуемый образец, 8 – Анодный узел, 9-11 – Система ввода лазерного излучения в камеру, 12 – Камера-обскура, 13 – Диагностическое окно, 14 – Зеркало, 15-17 – Оптическая щелевая развертка с фотоприставкой

Данная диагностика работает по принципу метода лазерной теневой фотографии. Лазер 11, проходя через зеркало 9 и диагностическое окно 10,

проходит сквозь РЭП, далее проходит через диагностическое окно 13, отражается от зеркала 14 и попадает на ЭОП. Так как лазер не может пройти сквозь РЭП и плазму, образованную им, то на фотоэлемент ЭОП попадает лишь часть лазера. Благодаря временной щелевой развертке, на фотообъективе мы можем наблюдать движение плазмы во времени. Для того, чтобы можно было соотносить временную развертку со срабатыванием установки, то в ЭОП встроен светодиод, благодаря которому, хронограммы можно соотносить с осциллограммами. На (Рисунок 21) представлена схема диагностики на которой видно, как позиционируется картинка на фотоаппарате, а также видно, где находится светодиод [8].

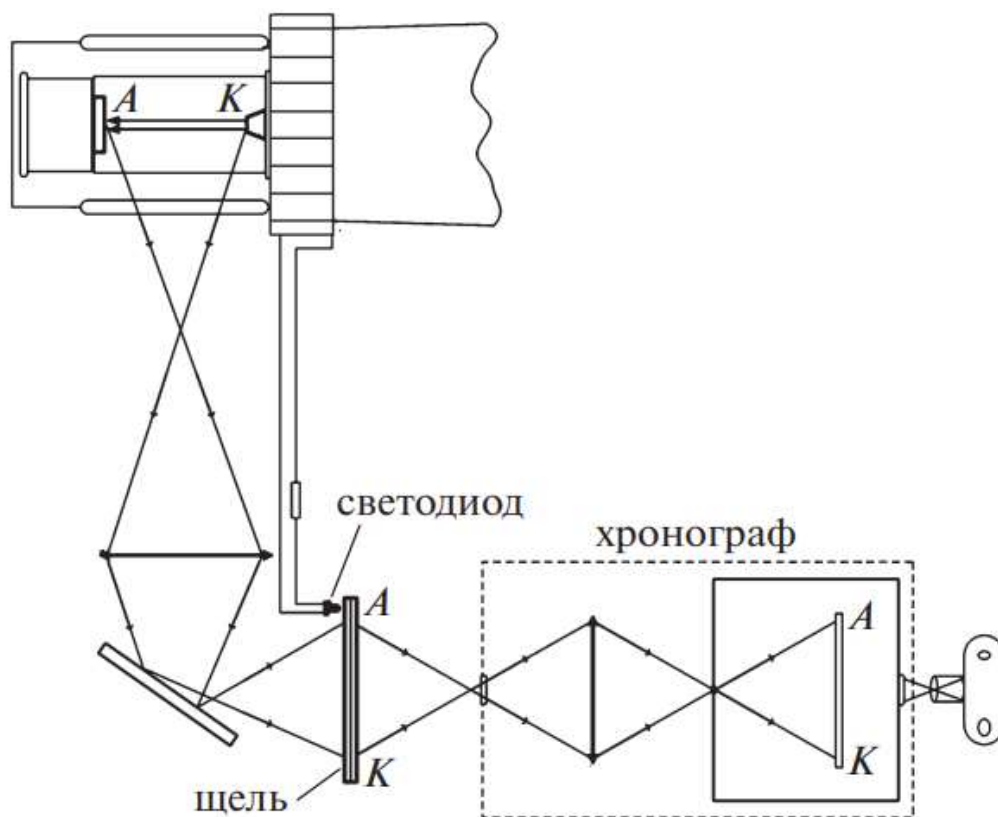


Рисунок 21. Схема позиционирования картинки

4.3 Постановка эксперимента

Исследовались образцы из коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 и поликристаллического вольфрама (Goodfellow) размером 10*10 мм² и толщиной 1 мм. Образцы устанавливались в центре анодной пластины диодного узла и закреплялись на молибденовой подложке. На (Рисунок 22) представлен способ крепления исследуемого образца. Образец крепится к молибденовой подложке с помощью резинового клея. Молибденовая подложка крепко прижимается с помощью специального крепежа на диодном узле к анодной пластине, представлено на (Рисунок 19).



Рисунок 22. Способ крепления исследуемого образца

Для изучения воздействия пучка на исследуемые образцы использовался диагностический комплекс, описанный в пункте 4.2, работающий по принципу метода лазерной теневой диагностики. После облучения масса образцов измеряется с помощью прецизионных цифровых весов AND с точностью 0,1 мг. Облученные образцы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VERSA (FEI, USA).

Проводятся серии экспериментов по образцам с различной энергетикой. В первой серии экспериментов образцы из вольфрама и ЭК-181 облучаются с большой разовой энергетикой равной 613 Дж/см² и 588 Дж/см² соответственно. Во второй серии экспериментов образцы из вольфрама и ЭК-181 облучаются с меньшей средней энергетикой равной 100±30 Дж/см² и большим числом повторений. Проводились эксперименты с количеством повторений равным 1,3,6,10 импульсов по каждому из образцов.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. Выбор материала для катода

В результате эксперимента по изучению подходящего материала для катода, было выяснено, что катоды из латуни и нержавеющей стали не подходят для использования в основной части эксперимента. Это вызвано большим напылением катодной пыли на исследуемом образце, что можно видеть на (Рисунок 23).

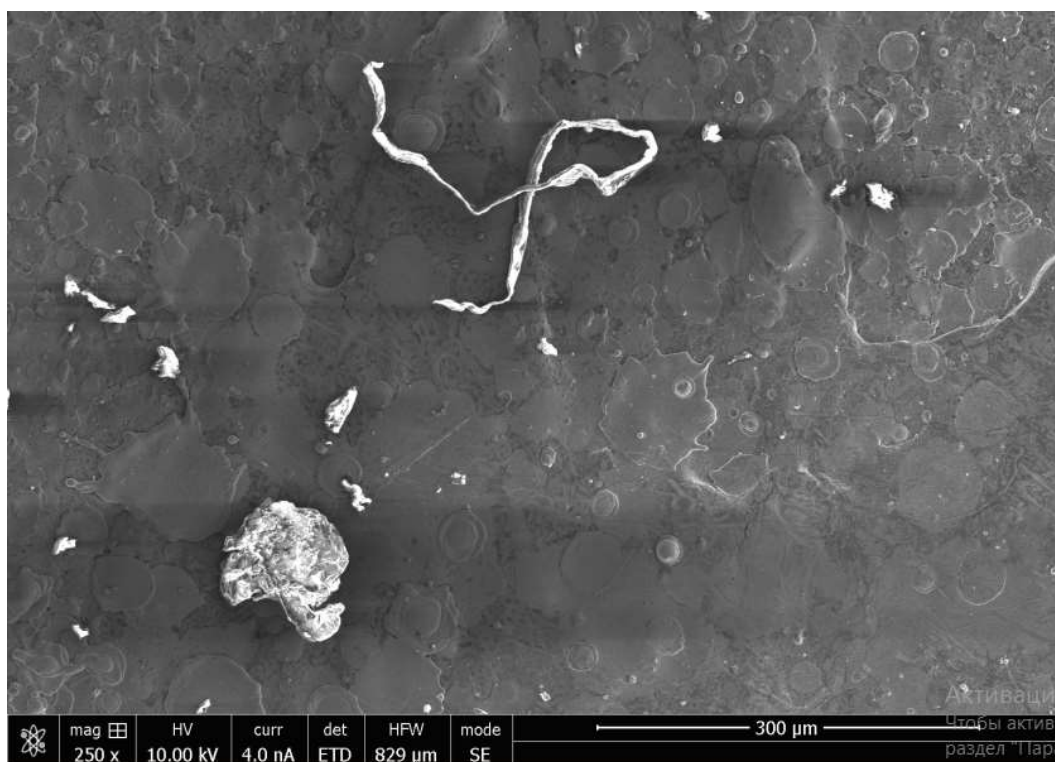


Рисунок 23. Запыление поверхности образцов

Также имеет значение материал подложки, на которую крепится исследуемый образец. Так как часть пучка попадает на подложку, она испаряет материал и запыляет образец. В связи с этим необходимо было выбрать более тугоплавкие материалы, чем латунь и нержавеющая сталь, из которых должны состоять катод и подложка для материала. В качестве данного материала, был выбран молибден, который хоть и является хрупким, но имеет температуру плавления больше, чем нержавеющая сталь. Также

можно использовать вольфрам, но он является дорогим и очень трудным в обработке. Основные параметры материалов представлены в таблице 1.

| Материал | $T_{пл}$ | Особенности |
|-------------------|----------|--|
| Латунь | 900°C | Типичный вариант катодов для установки «Кальмар», очень подвержен распылению |
| Нержавеющая сталь | 1400°C | Типичный вариант катодов для установки «Кальмар», недостаточно тугоплавкий |
| Молибден | 2600°C | Сложен в обработке, хрупок |
| Вольфрам | 3370°C | Дорог, очень сложен в обработке, хрупок |

Таблица 1. Основные характеристики перспективных материалов катода

Во время серии экспериментов, было обнаружено, что катоды из молибдена разрушаются после 5-10 импульсов. Так как молибден является хрупким и отсутствует возможность контроля целостности катода, невозможно исполнять многократные серии импульсов. Для решения этой проблемы, была реализована комбинированная схема, при которой основание катода состоит из молибдена, а крепеж выполнен из нержавеющей стали. Основная часть катода имела цилиндрическую форму, закрывая диодный промежуток от плазмы, летящей с элементов крепления. Кроме того, такая форма призвана была обеспечить более равномерное распределение в области взаимодействия пучка с мишенью. При использовании катодов традиционной формы (рыбий рот) чаще всего наблюдается распределение

электронов в пучке близкое к гауссову. Внешний вид такого катода представлен на (Рисунок 24).

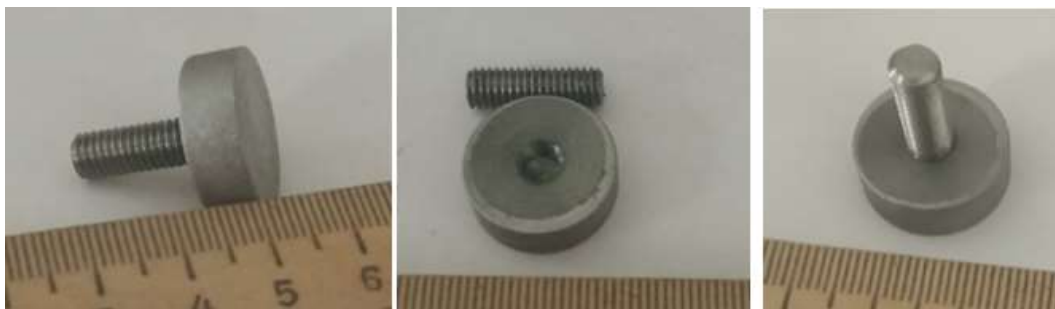


Рисунок 24. Комбинированный катод из молибдена и нержавеющей стали

5.2. Исследование стойкости материалов

Мною был проделан ряд экспериментов по изучению прочностных свойств образцов из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Русфер). Для этого была проведена серия импульсов по каждому из образцов с различными энергетиками.

5.2.1. Проведение экспериментов по исследованию прочностных свойств образцов из коррозионностойкая ферритно-мартенситная сталь ЭК-181 (Русфер) при облучении сильноточным электронным пучком на установке «Кальмар». Микроскопическое исследование образцов.

Исследовались образцы из коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 размером $10*10$ мм² и толщиной 1 мм. Образцы устанавливались в центре анодной пластины диодного узла и закреплялись на молибденовой подложке.

Для начала изучалось однократное облучение материала при большой энергетике равной 588 Дж. По хронограмме динамики плазмы образца из ЭК-181 (Рисунок 25), можно наблюдать, что плазма летит с анода раньше, чем с

катода (начало разлета плазмы закрывается анодной пластиной). Это вызвано тем, что материал катода более тугоплавкий, чем материал образца.

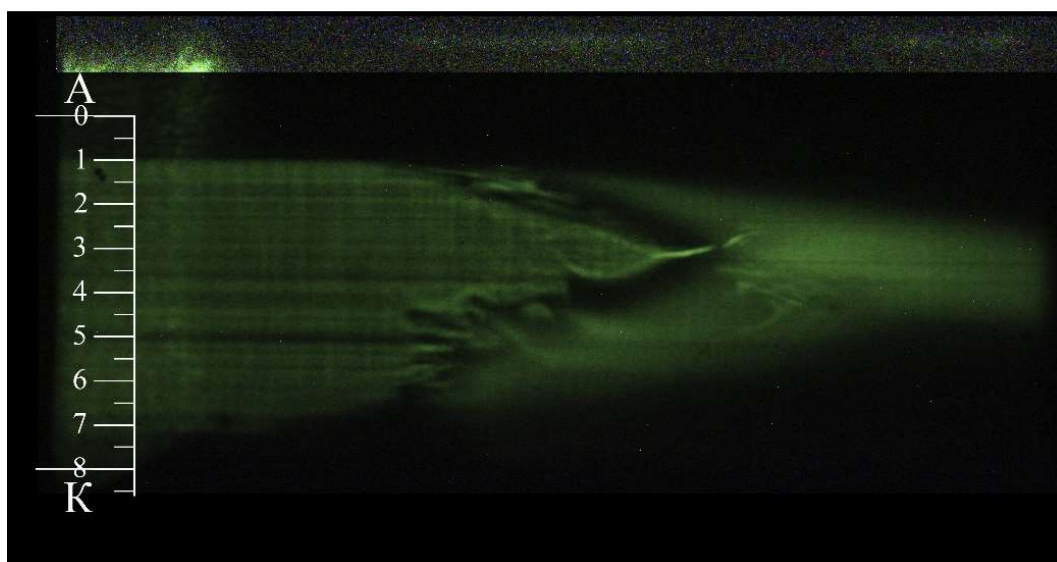
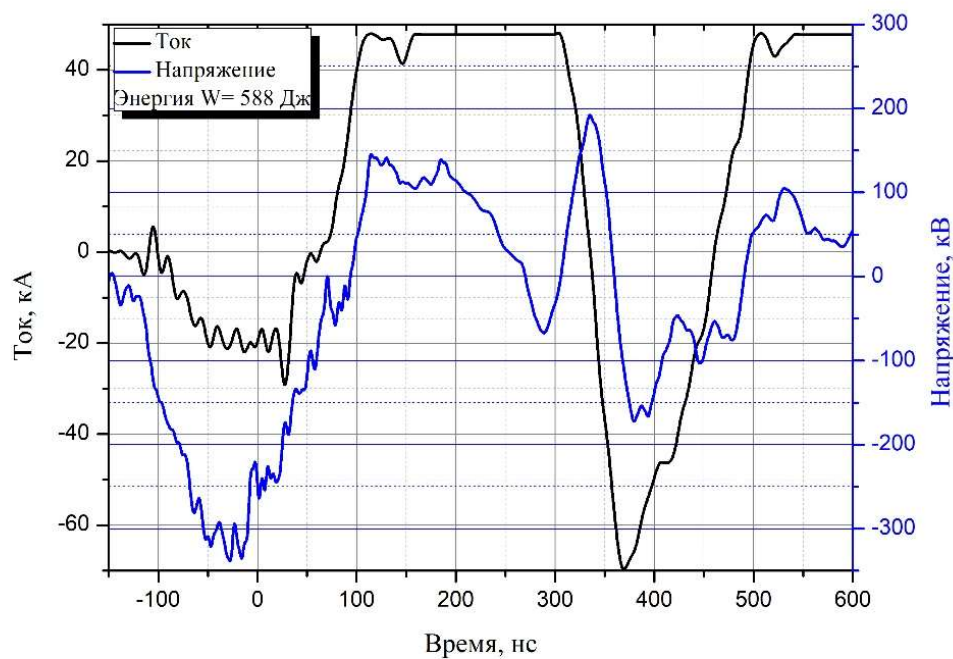


Рисунок 25. Хронограмма динамики плазмы ЭК-181

По результатам эксперимента, было выяснено, что пучок не является достаточно однородным, чтобы использовать одиночный импульс. Поэтому в

дальнейшем проводились эксперименты при меньшей средней энергетикой, но с большим количеством повторений импульсов.

Суммарный поток энергии, выдаваемый установкой за 1 срабатывание равен 100 ± 30 Дж/см². По каждому образцу было совершено 1,3,6,10 импульсов. После облучения масса образцов измерялась с помощью прецизионных цифровых весов AND с точностью 0,1 мг. На (Рисунок 26) представлен график унесённой массы ЭК-181 в зависимости от количества облучений. Зависимость близка в линейной [1].

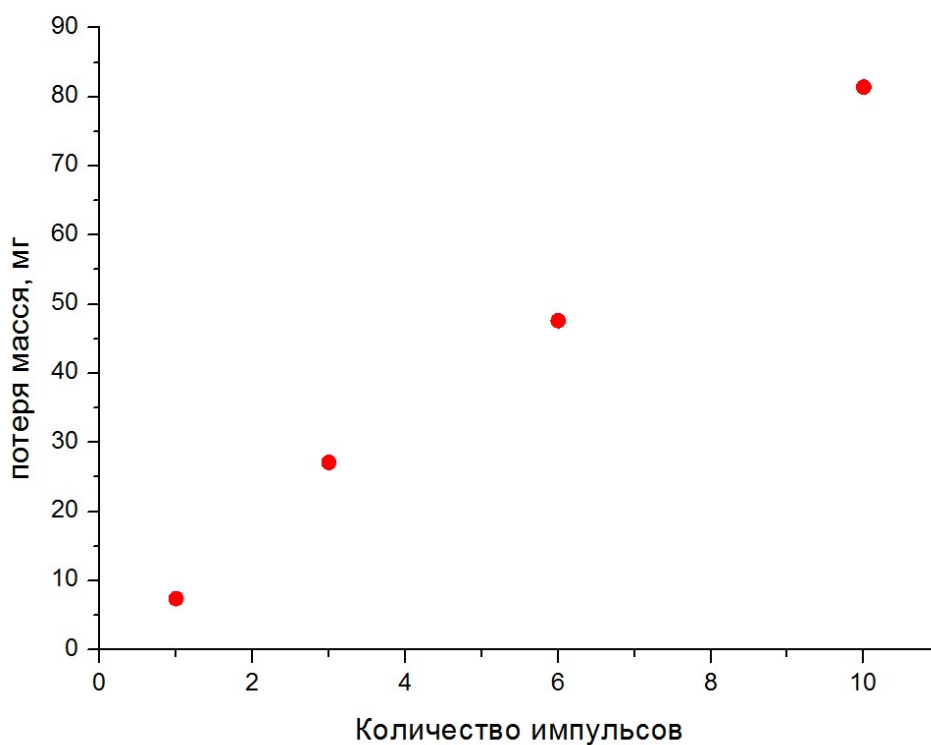


Рисунок 26. Зависимость унесенной с образца из стали ЭК-181 массы от числа облучений.

Облученные образцы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VERSA (FEI, USA).

После 1 импульса на поверхности ЭК-181 были обнаружено небольшое количество микротрещин протяженностью порядка 10 мкм и субмикронной толщины. После трехкратного облучения растрескиваний не наблюдается.

Есть вероятность, что поверхность материала заправляется, в результате этого, мы не можем наблюдать трещины на поверхности материала. На (Рисунок 27 и Рисунок 28) представлена микроскопия ЭК-181 после 3 импульсов.

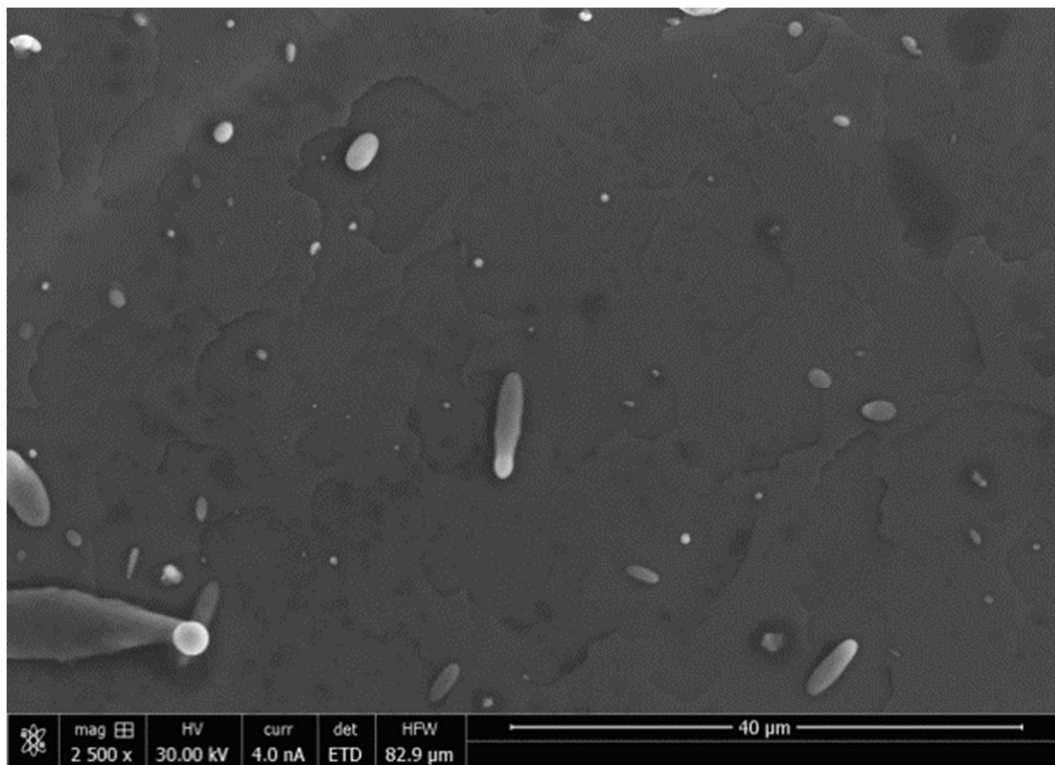


Рисунок 27 Микрофотография образцов ЭК-181 после 3-кратного облучения



Рисунок 28. Микрофотография образцов ЭК-181 после 3-кратного облучения

Подобное наблюдается и после 10 импульсов, как видно из микрофотографий представленных на (Рисунок 29 и Рисунок 30).

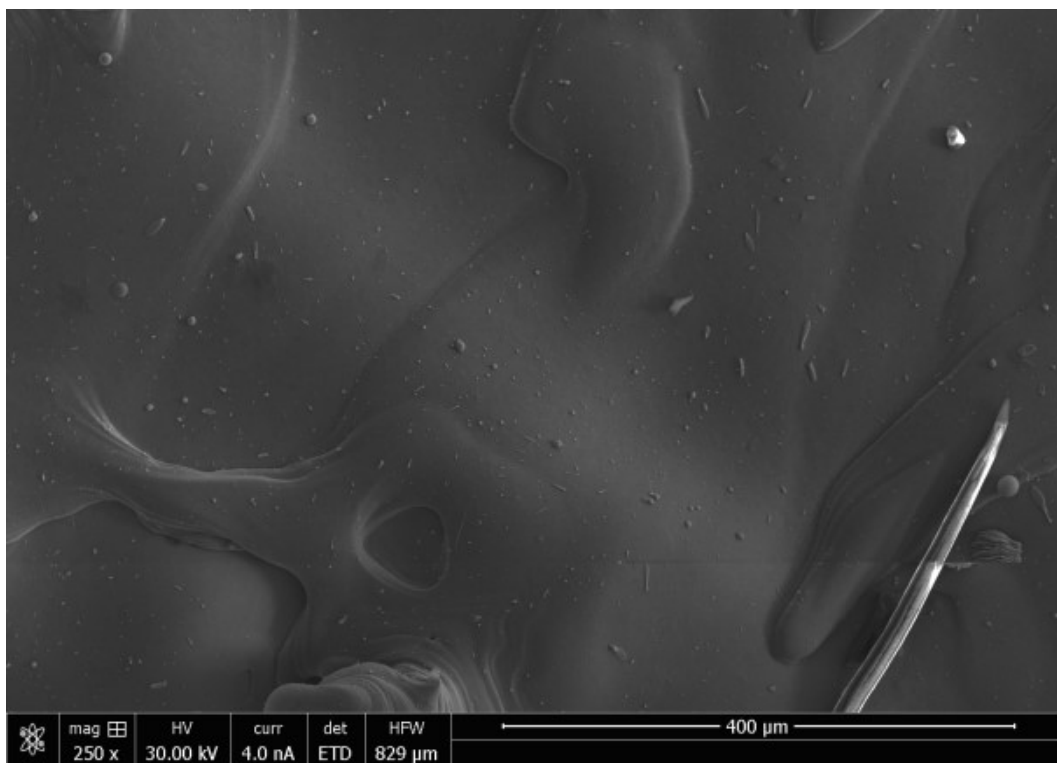


Рисунок 29 Микрофотографии образцов ЭК-181 после 10-кратного облучения

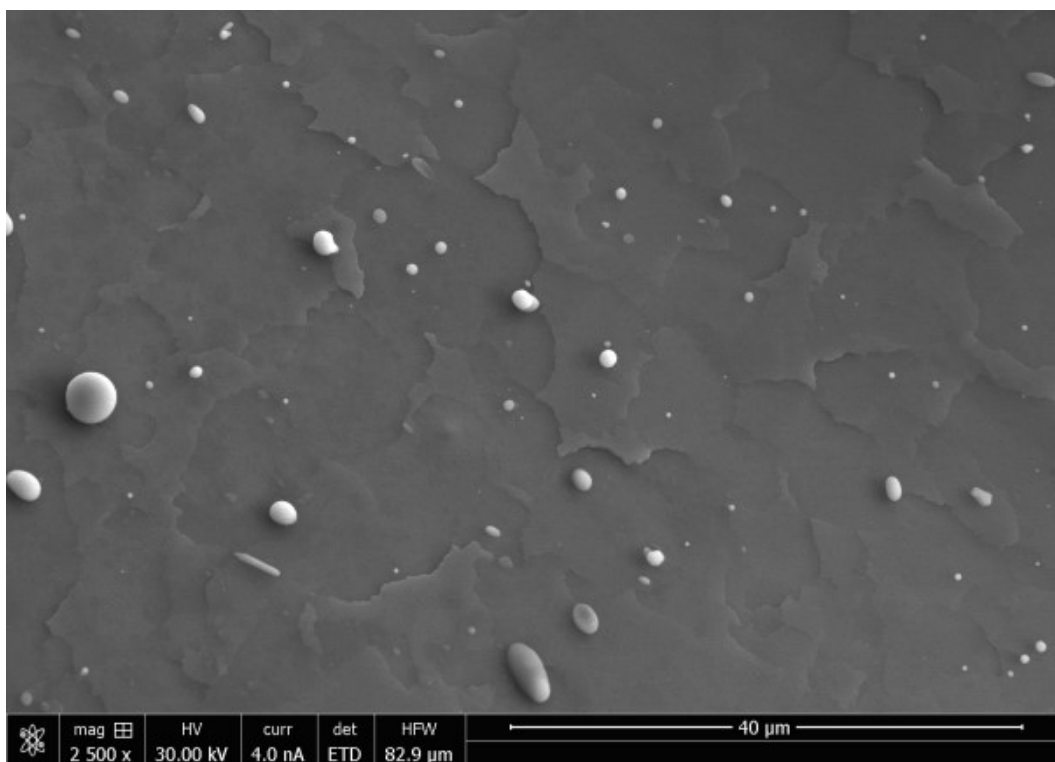


Рисунок 30. Микрофотографии образцов ЭК-181 после 10-кратного облучения

По хронограмме динамики плазмы образца из ЭК-181 (Рисунок 31), можно наблюдать, что плазма летит с анода раньше, чем с катода (начало разлета плазмы закрывается анодной пластиной). Это вызвано тем, что материал катода более тугоплавкий, чем материал образца.

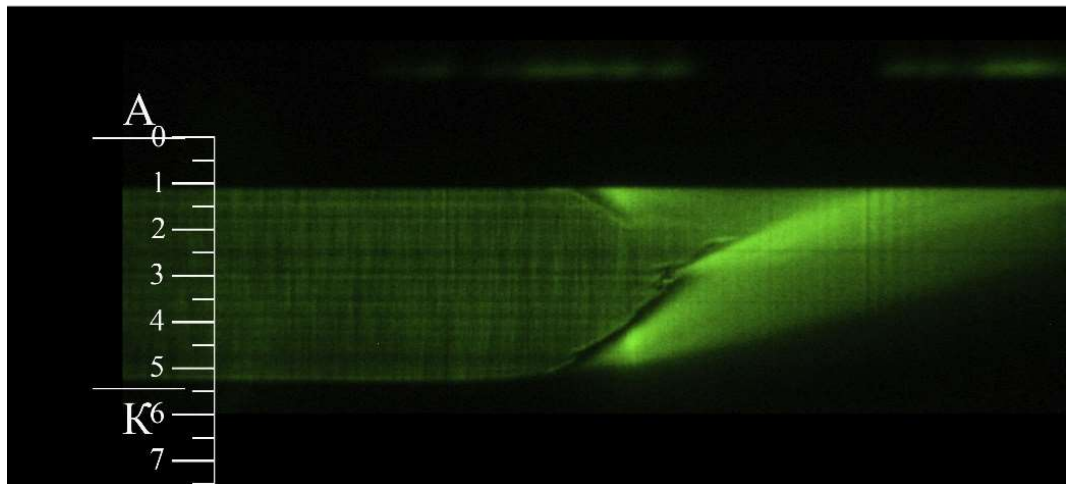
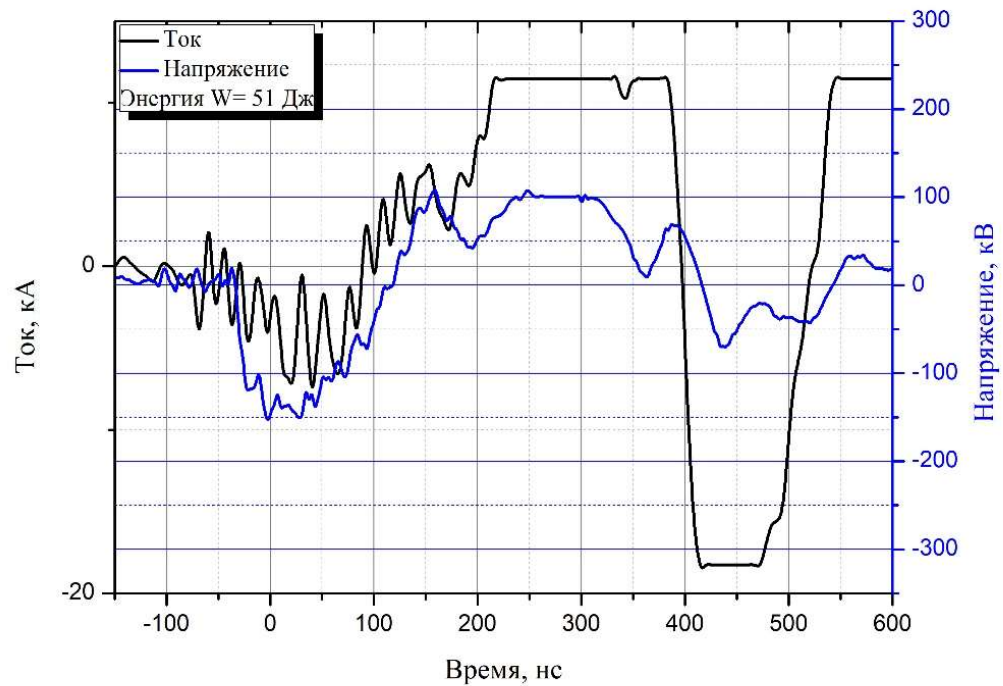


Рисунок 31. Хронограмма динамики плазмы ЭК-181 при 6-кратном облучении

5.2.2. Проведение экспериментов по исследованию прочностных свойств образцов из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) при облучении сильноточным электронным пучком на установке «Кальмар». Микроскопическое исследование образцов.

Исследовались образцы из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) размером 10×10 мм² и толщиной 1 мм. Образцы

устанавливались в центре анодной пластины диодного узла и закреплялись на молибденовой подложке.

Для начала изучалось однократное облучение материала при большой энергетике равной 613 Дж.

По результатам эксперимента, было выяснено, что пучок не является достаточно однородным, чтобы использовать одиночный импульс. Поэтому в дальнейшем проводились эксперименты при меньшей средней энергетикой, но с большим количеством повторений импульсов.

Суммарный поток энергии, выдаваемый установкой за 1 срабатывание равен 100 ± 30 Дж/см². По каждому образцу было совершено 1,3,6,10 импульсов. После облучения масса образцов измерялась с помощью прецизионных цифровых весов AND с точностью 0,1 мг. На (Рисунок 32) представлен график унесённой массы вольфрама в зависимости от количества облучений. Зависимость близка в линейной.

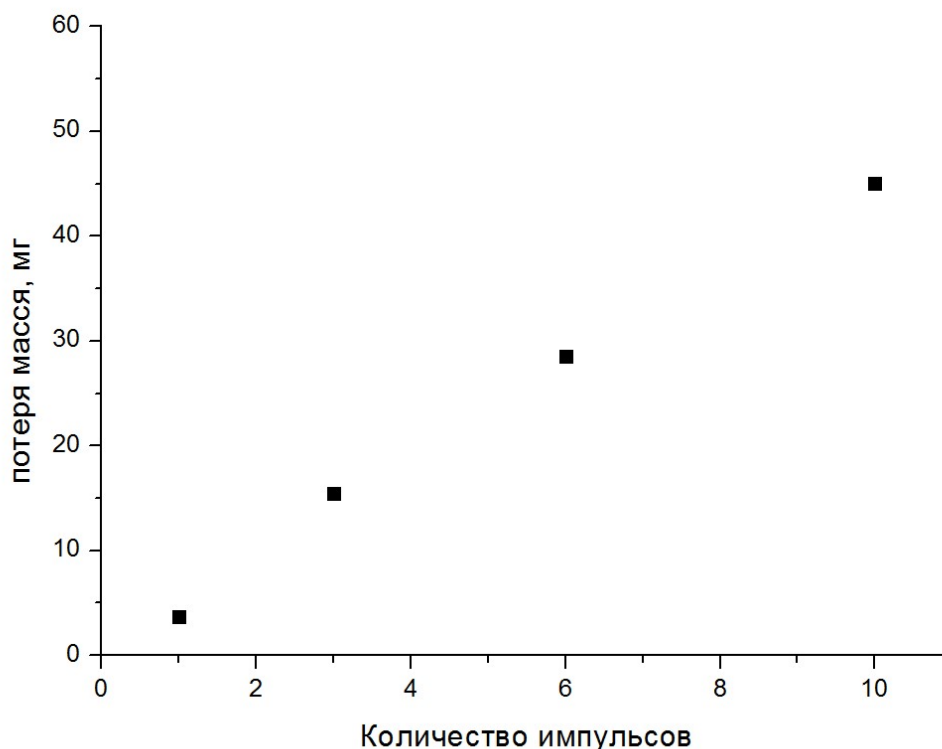


Рисунок 32. Зависимость унесенной с образца из Вольфрама массы от числа облучений.

Облученные образцы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VERSA (FEI, USA).

Уже при трехкратном облучение вольфрама (Рисунок 33) наблюдается сильное растрескивание поверхности материала с протяженностью трещин на уровне десятков микрометров. После 10 облучений поверхность образца покрывается трещинами шириной до 10 мкм и миллиметровой протяженностью, это хорошо видно на (Рисунок 34). Также растрескивание материала сопровождается капельной эрозией [2].

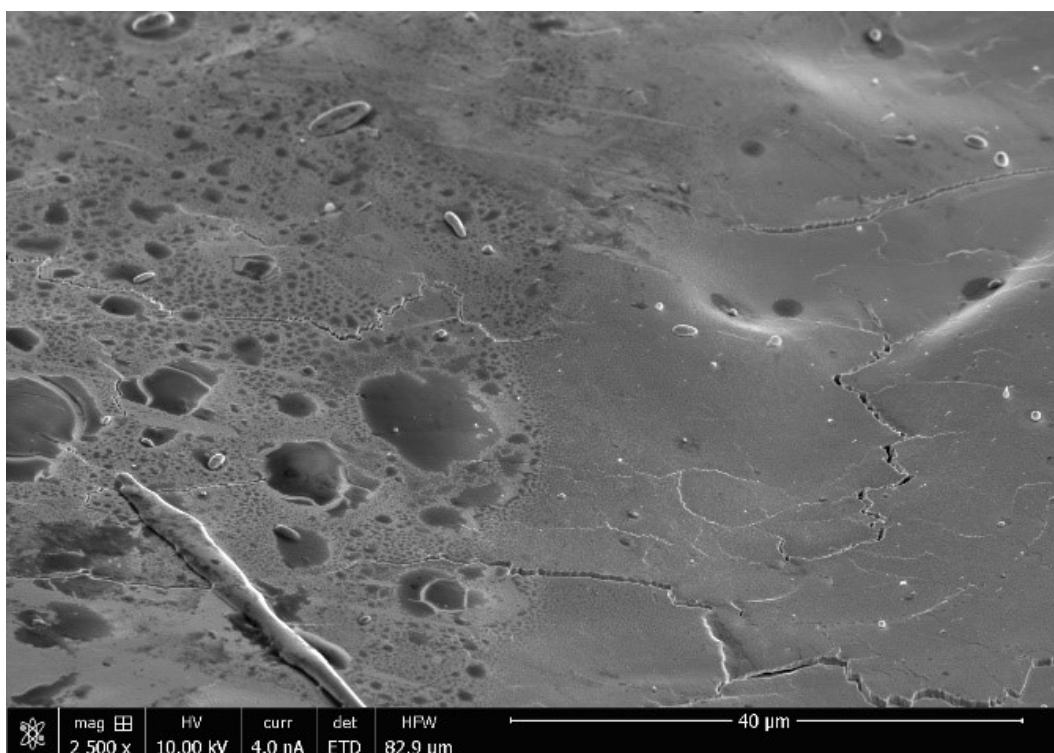


Рисунок 33 Микрофотография образцов из поликристаллического вольфрама после 3 импульсов

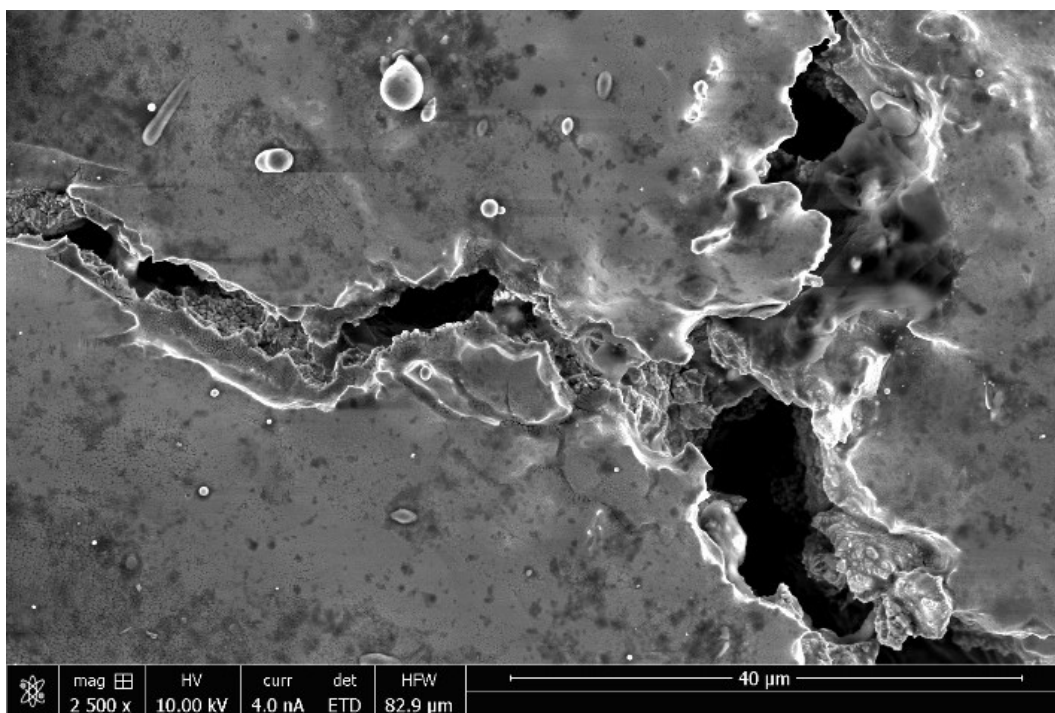


Рисунок 34. Микрофотография образцов из поликристаллического вольфрама после 10 импульсов

Такие разрушения могут приводить к значительному снижению механической прочности и накоплению в трещинах иных перенапыляемых материалов элементов вакуумной камеры. Кроме того, по таким трещинам будет проходить ускоренная утечка элементов топлива (дейтерия и трития) в теплоноситель.

По хронограмме динамики плазмы образца из вольфрама (Рисунок 35), можно наблюдать, что свечение анодной плазмы появляется на 125 нс позже плазмы с катода. Это обусловлена тем, что анода мы не видим и не знаем, когда появилась плазма и анод, сделанный из вольфрама, более тугоплавкий, чем материал катод, сделанный из нержавеющей стали.

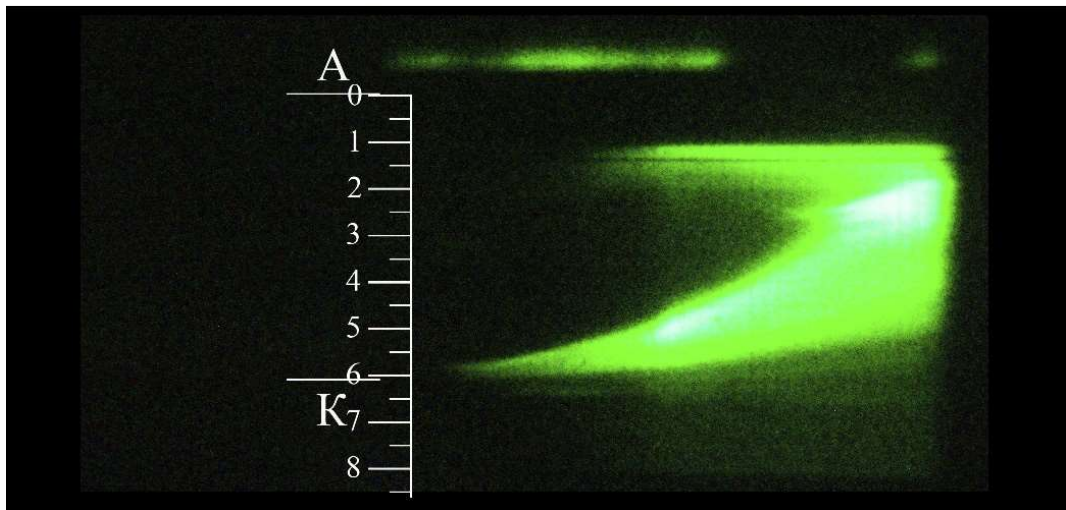
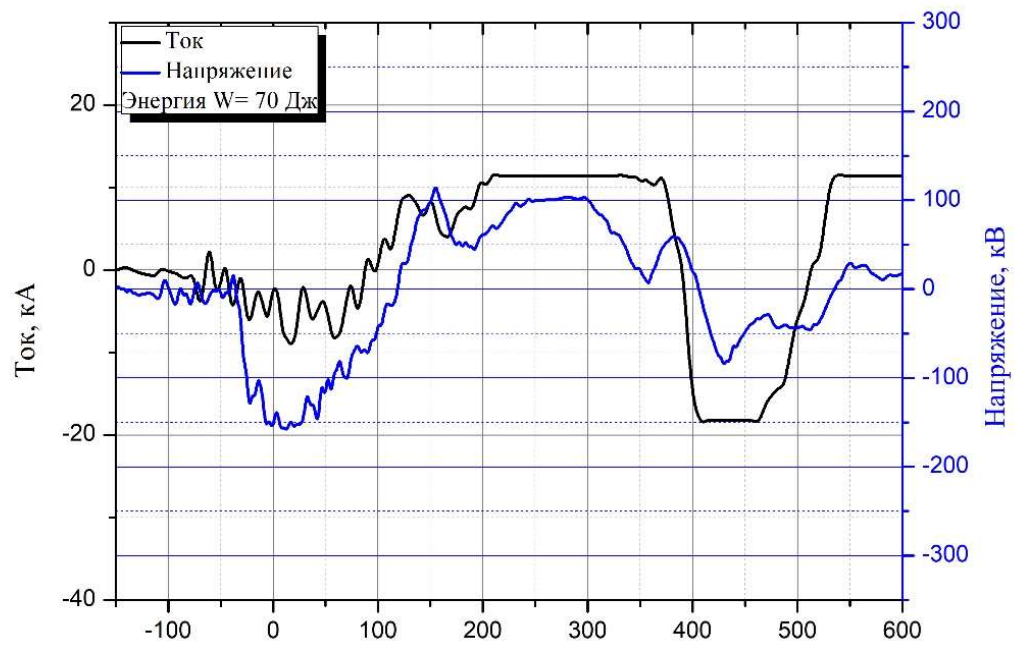


Рисунок 35. Хронограмма динамики плазмы Вольфрама при 3-кратном облучении

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых экспериментов продемонстрировали, что из-за недостаточной равномерности электронного пучка подход с однократным воздействием применим только для моделирования критически аварийных ситуаций, когда, например, на вакуумную стенку попадает сильнооточный пучок убегających электронов. Тепловое же воздействие целесообразно моделировать многократными импульсами малой мощности.

При моделировании мощного теплового воздействия на образцы из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 было проведено четыре серии – 1, 3, 6 и 10 импульсов. Суммарная энергия в импульсе составляла 100 ± 30 Дж.

Поверхность облученных образцов исследовалась с помощью электронного микроскопа. Было продемонстрировано, что вольфрам начинает значительно растрескиваться уже после трёх импульсов в то время как сталь имеет оплавленную поверхность без трещин даже после десяти воздействий. Возможно, это связано с переосаждением испаренного материала образца на поверхность. В дальнейшем планируется провести исследование срезов образцов для определения склонности стали к растрескиванию. Эти результаты в целом хорошо коррелируют с другими плазменными и пучковыми испытаниями подобных материалов.

Продемонстрирована линейная зависимость унесенной массы с поверхности облучаемых образцов от количества воздействий. Линейность соблюдается для обоих материалов в исследованном диапазоне. При этом скорость уноса массы для вольфрама ниже, чем для стали ЭК-181, что объясняется существенной разницей в температуре плавления и массы отдельных атомов.

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bobyr, N. P., Kazakov, E. D., Krutikov, D. I., Kurilo, A. A., Orlov, M. Y., Strizhakov, M. G., & Spitsyn, A. V. (2020). A pilot study of the behavior of structural materials under powerful pulse influence on the “Calamary” accelerator. *Journal of Physics: Conference Series*, 1686 (2020) 012066. doi:doi:10.1088/1742-6596/1686/1/012066
2. Bobyr, N. P., Kazakov, E. D., Krutikov, D. I., Kurilo, A. A., Orlov, M. Y., Strizhakov, M. G., & Spitsyn, A. V. (2021). Study of Properties of Structural Materials of Powerful Pulsed Plasma Facilities under Extreme Load. *Physics of Atomic Nuclei*(84), 1672–1675. doi:https://doi.org/10.1134/S1063778821100082
3. Martynenko Yu. V., Budaev, V. P., Grashin, S. A., & Shestakov, E. A. (2017). Tungsten Erosion in Tokamak at Current Disruption. *BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE*, 44(6), 182-186. doi:10.3103/S1068335617060070
4. Бобырь, Н. П., Голубева, А. В., Черкез, Д. И., Ефимов, В. С., Спицын, А. В., & Гаспарян, Ю. М. (2015). ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В НИЗКОАКТИВИРУЕМОЙ СТАЛИ ЭК-181 (РУСФЕР) ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМОЙ. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 38(2), 38-42.
5. Будаев В. П. (2015). РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВОЛЬФРАМОВЫХ МИШЕНЕЙ ДИВЕРТОРА ПРИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННО-ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ, ОЖИДАЕМЫХ В ИТЭР И ТОКАМАКАХ РЕАКТОРНОГО МАСШТАБА (ОБЗОР). *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 38(4), 5-33. doi:10.21517/0202-3822-2015-38-4-5-33
6. Казаков Е.Д., Крутиков Д.И., Орлов М.Ю., Павленко М.И., Смирнова А.Р., Стрижаков М.Г., & Сунчугашев К.А. (2022). Развитие системы оптической диагностики сильноточного электронного ускорителя "КАЛЬМАР". *XLIX Международная (Звенигородская) конференция по*

физике плазмы и УТС,14 — 18 марта 2022 года (стр. 169). Звенигород: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ РОСАТОМ.

7. Казаков, Е. Д., Бобыр, Н. П., Крутиков, Д. И., Орлов, М. Ю., Смирнова, А. Р., Спицын, А. В., . . . Сунчугашев, К. А. (2022). ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК, СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ. *XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС,14 — 18 марта 2022 года* (стр. 171). Звенигород: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ РОСАТОМ.
8. Казаков, Е. Д., Калинин, Ю. Г., Крутиков, Д. И., Курило, А. А., Орлов, М. Ю., Стрижаков, М. Г., . . . Шашков, А. Ю. (2021). МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕНЕВОЙ ФОТОГРАФИИ С ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ В ХРОНОГРАФИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В ДИОДЕ ГЕНЕРАТОРА РЭП. *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 47(8), 716-727.
9. Хрипунов, Б. И., Койдан, В. С., Рязанов, А. И., Гуреев, В. М., Корниенко, С. Н., Латушкин, С. Т., . . . Унежев, В. (2017). РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЁННЫЙ ВОЛЬФРАМ: ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ В ПОТОКЕ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 40(4), 40-49. doi:10.21517/0202-3822-2017-40-4-40-49
10. Хрипунов, Б. И., Койдан, В. С., Рязанов, А. И., Гуреев, В. М., Латушкин, С. Т., Семенов, Е. В., & Столярова, В. Г. (2020). ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ТЯР В ПОТОКЕ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ: РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ, МОДИФИКАЦИЯ

ПОВЕРХНОСТИ, ЭРОЗИЯ. *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 43(1),
46-54. doi:10.21517/0202-3822-2020-43-1-46-54