

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

Физический факультет

Выпускная квалификационная работа магистерская диссертация

Кафедра физики плазмы

Васильев Александр Александрович

Название работы:

Исследование модификации вольфрама после облучения электронным пучком и потоком
плазмы

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Шошин Андрей Алексеевич

Новосибирск – 2014 год

Содержание

| | |
|--|----|
| 1. Введение. | 3 |
| 2. Обзор исследований модификации материалов термоядерных реакторов. | 5 |
| 3. Метод термодесорбционного анализа. | 10 |
| 4. Описание установки ГОЛ-3. | 14 |
| 5. Описание стенда для ТДА. | 16 |
| 6. Описание стенда с многоапертурным инжектором электронов. | 21 |
| 7. Эксперименты с нагретыми мишенями. | 23 |
| 8. Предварительные испытания стенда для ТДА. | 30 |
| 9. Многоимпульсное облучение электронным пучком. | 32 |
| 10. Заключение и выводы. | 42 |
| 11. Библиографический список. | 43 |

1. Введение.

Современная человеческая цивилизация сильно зависит от различных источников энергии. Промышленность, транспорт, сфера быта с каждым годом увеличивают потребляемое ими количество энергии. При этом количество традиционных невозполнимых источников энергии (уголь, нефть, газ, уран) на Земле очень ограничено. Другие восполняемые ресурсы (водные, биомасса) почти полностью исчерпали свои возможности по производству электроэнергии. Большинство альтернативных источников электроэнергии (солнечная, ветряная, геотермальная) имеют серьезные ограничения для их повсеместного использования и не могут рассматриваться как серьезная замена традиционным источникам энергии, так как ее главным критерием является бесперебойность снабжения и гарантированность параметров сети. Наиболее перспективным путем решения данной проблемы может стать осуществление реакции управляемого термоядерного синтеза (УТС), при которой происходит слияние легких ядер в более тяжелые с выходом некоторой энергии, передающейся продуктам реакции. УТС возможен лишь в сильно нагретом веществе – плазме, так как для этого необходимо преодолеть силы кулоновского отталкивания между атомами. Для нагрева и удержания плазмы используется магнитное поле, вдоль силовых линий которого движутся заряженные частицы плазмы. Наилучших параметров в этой области достигли закрытые ловушки, в частности токамаки. Первые термоядерные реакторы создаются для осуществления D-T реакции, в результате которой образуются высокоэнергичные нейтроны. Попадая на первую стенку, они приводят к мощному нейтронному облучению материала. С другой стороны постоянный поток плазмы через ноль полоидального поля приводит к большим тепловым нагрузкам на диверторную зону реактора. Возникающие в плазме неустойчивости (ЭЛМы первого типа, большие срывы) приводят к еще большему нагреву

материала. Отсюда возникает проблема взаимодействия плазмы и поверхностей стенок установки. Мощный нейтронный поток накладывает условие низкой нейтронной активации, а высокие тепловые нагрузки требуют хорошую устойчивость материала к ним. Под эти ограничения подходят 3 материала: углерод, бериллий и вольфрам. Первый при высоких тепловых нагрузках очень сильно подвержен эрозии и образует большое количество пыли, которая остается в установке и приводит к существенному накоплению радиоактивного топлива в ней. Бериллий также не выдерживает потоков тепла, попадающих на дивертор в токамаке, к тому же являясь ядовитым веществом. Таким образом, наиболее подходящим материалом дивертора является вольфрам. Именно поэтому так важно изучать устойчивость данного материала к высоким импульсным тепловым нагрузкам. Кроме того при облучении вольфрама водородной плазмой наблюдается накопление газа на поверхности и в объеме пластин. А так как плазма термоядерного реактора содержит тритий, на который накладываются серьезные ограничения в его использовании (700 грамм на площадке ИТЭР), то это может приводить к вынужденной остановке работы установки для ее последующей очистки. Поэтому важно знать параметры захвата и удержания изотопов водорода на поверхности вольфрама, а также параметры сорбционной кинетики.

2. Обзор исследований модификации материалов термоядерных реакторов.

Проблема взаимодействия стенок термоядерного реактора и попадающей на него плазмы стоит с 80-х годов прошлого века. По всему миру ведется исследование и разработка материалов способных выдерживать высокие тепловые нагрузки[1,2].

Различают два основных вклада в поток энергии на компоненты внутренней части установки: постоянный и импульсный. На первую стенку токамака непрерывно попадает поток энергии в виде излучения с удельной мощностью ниже 1 МВт/м^2 . Постоянный поток плазмы на дивертор приводит к нагрузке до 10 МВт/м^2 . С другой стороны существуют различные плазменные неустойчивости различной периодичностью и энергосодержанием. ЭЛМы типа 1 возникающие до 1000 раз за разряд приводят к нагрузке около $0,5\text{-}4 \text{ МДж/м}^2$ за $0,3\text{-}0,6 \text{ мс}$. При большом срыве на материал дивертора попадает до 100 МДж/м^2 за 1 мс .

Для изучения модификации материалов под воздействием тепловой нагрузки в Германии в исследовательском центре Juelich используется установка Juelich Divertor Test Facility Hot Cells (JUDITH)[3]. Она представляет собой вакуумную камеру, в которой происходит облучение материалов электронным пучком с энергией 150 кВ и общей мощностью 60 кВт . Плотность энергии достигает 15 ГВт/м^2 с длительностью от 1 мс до непрерывного режима и площадью облучаемой поверхности от 4 до 100 мм^2 . Пучок электронов отклоняется управляющими катушками и может сканировать исследуемые поверхности мишеней. Подобная конструкция позволяет симулировать тепловое воздействие ЭЛМов на материалы.

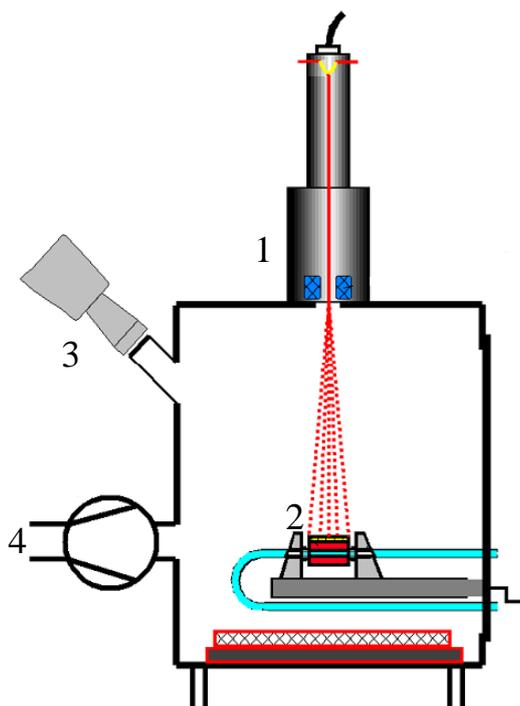


Рисунок 1 — Схематическое изображение установки JUDITH. 1 – генератор электронного пучка, 2 – исследуемые образцы, 3 – диагностика, 4 – к вакуумному насосу.

Изучение взаимодействия мощных потоков плазмы с различными материалами производится на установке КСПУ Х-50 в Харькове. Квazистационарный ускоритель создает плазму, которая транспортируется магнитным полем в соленоидальную камеру. Попадающие на мишень частицы имеют высокую продольную скорость, в результате чего можно получать большие тепловые нагрузки от плазменного потока. На данной установке исследовался предварительно нагретый вольфрам после многоимпульсного облучения потоком плазмы длительностью 0,25 мс и энергосодержанием 0,45 и 0,75 МДж/м², что ниже и выше порога плавления для данных условий[5]. При облучении ниже порога плавления наблюдалась большая устойчивость мишеней, облученных при температуре 650°С, чем при комнатной. После преодоления порога плавления не были обнаружены серьезные отличия в эрозии поверхности на ненагретом и нагретом вольфраме.

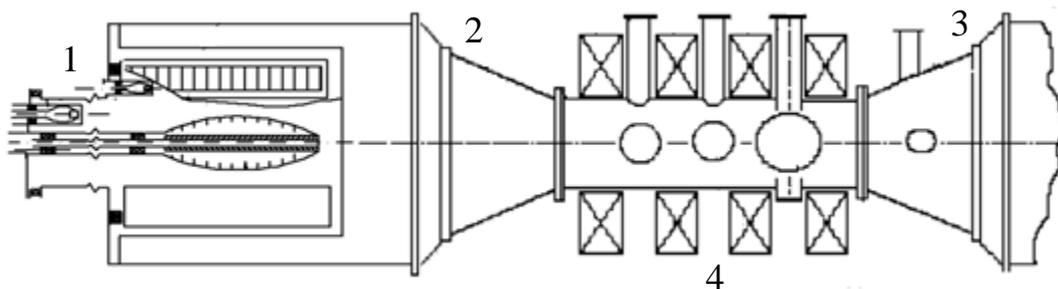


Рисунок 2 — Схематическое изображение установки КСПУ X-50. 1 – плазменный ускоритель, 2 – входная коническая камера, 3 – соленоидальная камера, 4 – выходная коническая камера.

Аналогичным образом устроена установка КСПУ-Т в Троицке. На ней исследовалась рекристаллизация и растрескивание вольфрама при нагрузках выше порога плавления[6]. Толщина рекристаллизованного слоя составила 50 мкм с ориентацией зерен перпендикулярной поверхности, что характерно и для изначальной поверхности, при этом величина зерен была существенно больше. Между слоем рекристаллизации и первичным материалом был обнаружен слой с хаотичной ориентацией зерен. Наблюдались как перпендикулярные поверхности трещины, так и продольные ей на глубине 300 мкм.

Для изучения модификации поверхности, а также миграции газа внутрь объема материала, в институте физики плазмы в городе Гархинг используется установка Garching Large Divertor Sample test facility (GLADIS)[8]. Основной частью его является инжектор нейтралов, генерирующий 2 пучка водорода или гелия мощностью по 1 МВт. Удельное энерговыделение составляет 3-45 МВт/м² с длительностью импульса от 1 мс до 45 секунд и площадью облучаемой поверхности до 300 см². GLADIS позволяет исследовать как металлические, так и неметаллические компоненты будущих реакторов.

Для проверки возможности создания мощного плазменного генератора, способного симулировать нагрузки дивертора ИТЭРа, была

сконструирована установка Pilot-PSI[9]. Каскадный дуговой генератор создает плазму, которая транспортируется магнитным полем до 1,6 Тл в соленоид и дополнительно омически нагревается до электронной температуры в 1 эВ. В результате создается поток частиц более $10^{23} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, который уже может быть использован в экспериментах по изучению взаимодействия плазмы и поверхности материалов. На установке были проведены эксперименты по облучению мишеней с нагрузкой, симулирующей ЭЛМы большой амплитуды, в течение которых был обнаружен подъем температуры поверхности вольфрама с изначальной 650 °С до 2000 °С и растрескивание материала.

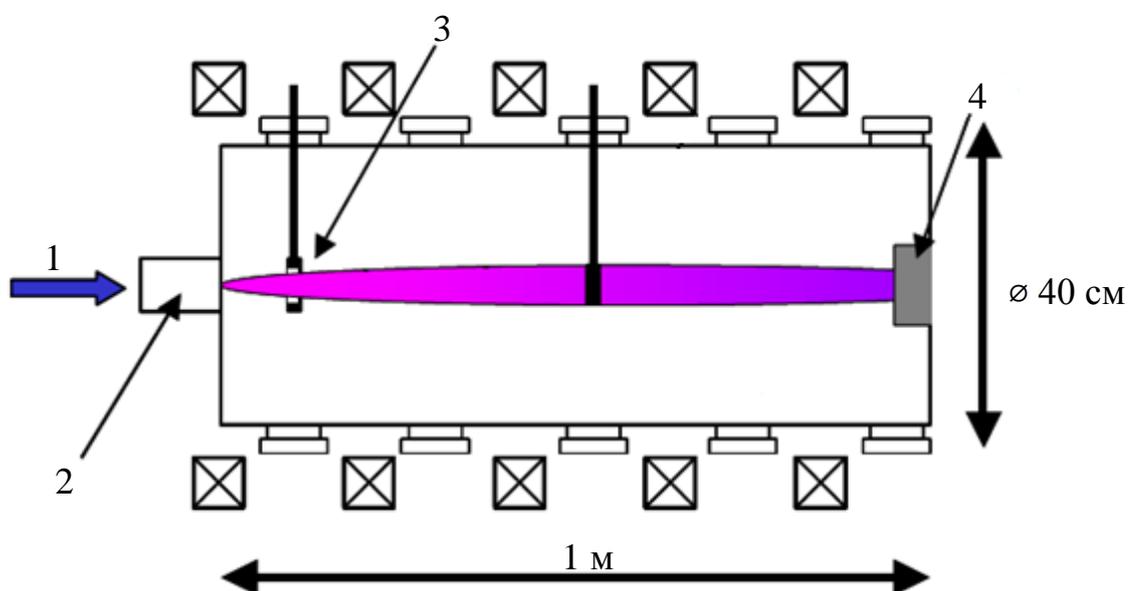


Рисунок 3 — Схематическое изображение установки Pilot-PSI. 1 – входящий поток газа, 2 – каскадный дуговой генератор плазмы, 3 – кольцевой электрод, 4 – плазмоприемник или мишень.

На основе испытаний Pilot-PSI создается установка Magnum-PSI[10]. Она представляет собой открытую ловушку на основе плазменного генератора, способную производить плазму с параметрами схожими с ИТЭР. Magnum-PSI сконструирован для как фундаментальных исследований взаимодействия плазмы и поверхности материалов, так и для реальных тестов на устойчивость компонентов реакторов. Устройство

позволяет получать нагрузки 10 МВт/м^2 в стационарном режиме. На ней также разработана система симуляции ЭЛМов с нагрузкой до 200 МВт/м^2 и частотой до 10 Гц. Также система оснащена мощным лазером, который может симулировать импульсные тепловые нагрузки.

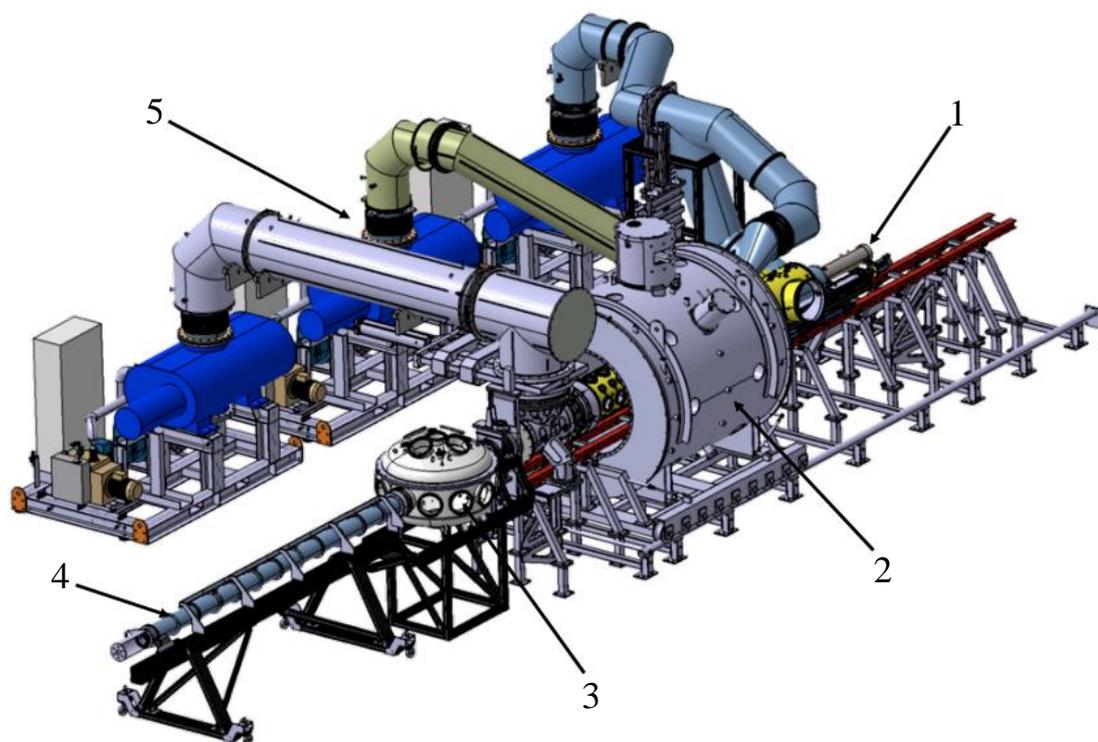


Рисунок 4 — Схематическое изображение установки Magnum-PSI. 1 – подвижный источник плазмы, 2 – сверхпроводящий магнит, 3 – камера замены и анализа образцов, 4 – манипулятор мишеней, 5 – вакуумные насосы.

3. Метод термодесорбционного анализа.

Метод термодесорбционного анализа (ТДА) используется для получения информации о концентрации адсорбированного газа и энергии его связи на поверхности какого-либо материала. В основе ТДА лежит явление испарения частиц адсорбата в вакуум за счет тепловой энергии. В наиболее упрощенном виде метод ТДА представляет собой анализ зависимости парциального давления интересующего нас газа от температуры поверхности исследуемого образца. Для этого в большинстве случаев для этого применяются масс-спектрометры. Они позволяют не только получать информацию о чистоте десорбируемого газа, но и исследовать потоки различных сложных веществ и их радикалов. Благодаря высокой чувствительности масс-спектрометров при их использовании возможна регистрация до 10^{-5} монослойного покрытия адсорбата, десорбирующегося с поверхности образца площадью около 1 см^2 .

При рассмотрении феноменологической теории метода ТДА следует различать диффузионный и кинетический режимы газовой выделения [13]. На Рис. 5 приведены кривые газовой выделения при линейном нагревании, рассчитанные для образцов различных геометрий (пластина, сфера) и различных механизмов диффузии (объемная диффузия и кинетический режим диффузии). Видно, что геометрия образца сказывается сильнее всего на низкотемпературном участке пика. При одних и тех же значениях параметров диффузии и размеров образца максимальная скорость газовой выделения из сферы достигается при более низкой температуре, пик шире и симметричнее, чем при выделении из образцов других геометрий.

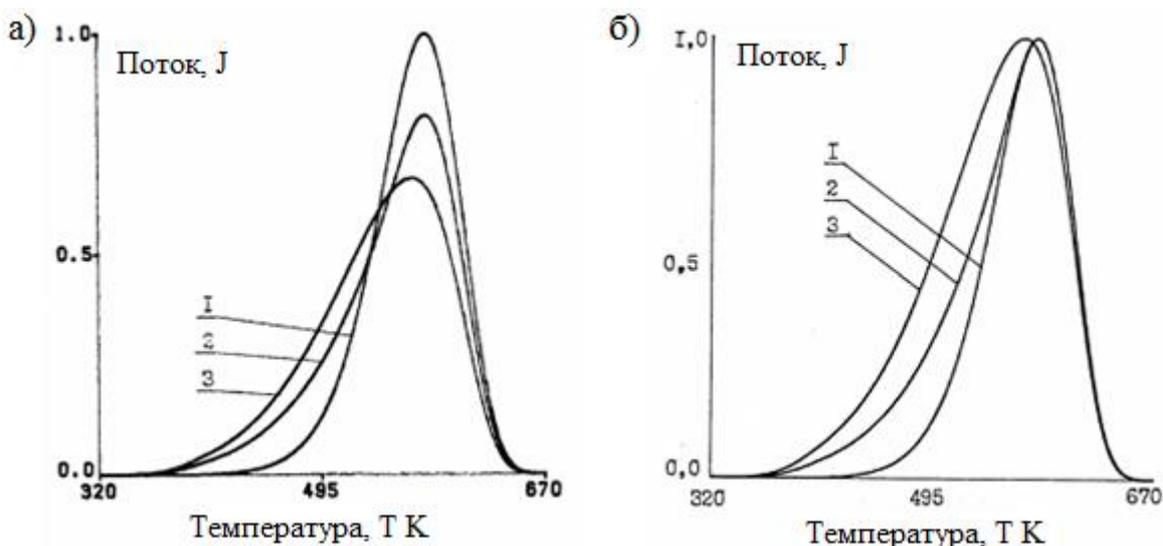


Рисунок 5 — Теоретические кривые термостимулированной десорбции в режиме линейного нагрева. а) Нормировка на площадь пика; б) Нормировка на высоту пика. 1 - кинетический режим; 2 - диффузия из пластины с равномерным распределением адсорбированного газа, 3 – то же самое из сферы.

В большинстве случаев при облучении материалов можно говорить о накоплении газа на поверхности образца. В таком случае наблюдается кинетический режим десорбции. Тогда кинетика газовыделения может быть описана кинетикой химической реакции n -го порядка[11]. В этом случае следует записать:

$$-J = N^n \cdot C \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \quad (1)$$

где N - концентрация адсорбированных частиц, J – поток десорбирующихся частиц с поверхности, C – предэкспоненциальный (энтропийный) множитель, определяющий характер изменения движения частиц при переходе из адсорбированного состояния в газовую фазу, E - энергия активации десорбции, k - постоянная Больцмана, T – температура поверхности, n - порядок десорбционной кинетики.

При десорбции частиц после диссоциации соединений или в том же виде, в котором они находятся на поверхности, то наблюдается неассоциативная десорбция ($n=1$). Десорбция двухатомных молекул называется ассоциативной и $n=1$. В некоторых случаях частицы адсорбата собираются на поверхности в объемные или плоские скопления. Если темп десорбции ограничен скоростью отрыва атомов от краев скоплений, то интенсивность десорбции пропорциональна их диаметру. В таком случае $n=1/2$ и $n=1/3$ для плоских и объемных скоплений соответственно. Если происходит испарение адсорбата послойно, то скорость десорбции не зависит от концентрации частиц и $n=0$.

Из уравнения (1) следует, что зависимость $\ln(J/N^n)$ от $1/T$, построенная из экспериментальных спектров десорбции $\Delta p(t)$ и температуры $T(t)$, при правильно подобранном порядке десорбционной кинетики n должна быть линейной, из наклона которой может быть вычислена энергия активации десорбции E , а по величине, отсекаемой от оси ординат, $-\ln C$.

Если энергия активации десорбции E зависит от концентрации адсорбированных частиц N , что характерно для большей части адсорбционных систем, то даже при правильно подобранном порядке десорбционной кинетики n зависимость $\ln(J/N^n)$ от $1/T$ нелинейна. В таком необходимо снять серию десорбционных спектров при различных скоростях нагрева адсорбента и построить графики зависимостей $\ln(J)$ от $1/T$ при фиксированном значении концентрации N . Из наклона этих прямых можно определить величину E при заданной N . Из серии различных прямых $\ln J|_{N=\text{const}}$ от $1/T$ для разных N можно найти зависимость E от N . Такая процедура нахождения величин E , C и n из экспериментальных кривых десорбции возможна при любой произвольной зависимости температуры адсорбента T от времени нагрева t .

Если энергия активации десорбции E не зависит от концентрации адсорбированных частиц (например, при малой концентрации адсорбированных частиц по сравнению с концентрацией, соответствующей монослойному покрытию), то процедуру нахождения кинетических параметров из десорбционных спектров можно существенно упростить использованием линейного нагрева исследуемого материала, т.е. $T=a+bt$ или $1/T=a-bt$. В процессе нагрева вследствие десорбции концентрация частиц N непрерывно уменьшается, а экспоненциальный множитель $\exp(-E/(kT))$ в уравнении (1) растет с ростом T , на графике наблюдается максимум. Энергия активации десорбции при известном порядке десорбции может быть вычислена путем измерения температуры T_m в максимуме скорости десорбции J_m .

Более точный метод определения энергии активации десорбции E и предэкспоненциального множителя C основан на вычислении наклонов графиков $\ln(b/T^2)$ от $1/T$ или $\ln J_m$ от $1/T$, причем в этом случае кинетические параметры могут быть найдены без предварительных предположений о порядке десорбционной кинетики n . Для этого необходимо получить серию кривых десорбций при различной скорости нагрева адсорбента dT/dt , которая для приемлемой точности определения E должна изменяться, по крайней мере, на два порядка величины.

4. Описание установки ГОЛ-3.

Установка ГОЛ-3 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН предназначена для создания, нагрева и удержания термоядерной плазмы в многопробочном магнитном поле[14]. Схема ловушки показана на Рис. 6.

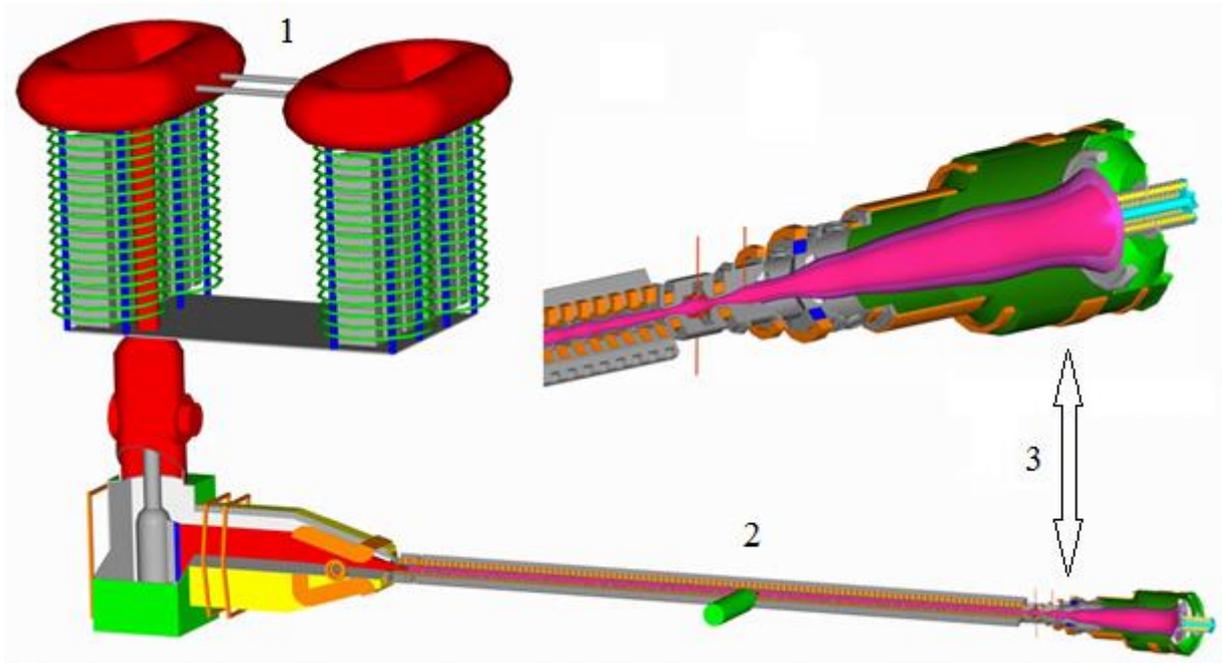


Рисунок 6 — Схема многопробочной ловушки ГОЛ-3. 1 - генератор РЭП У-2, 2 - многопробочный соленоид, 3 - выходной узел.

Основная часть ГОЛ-3 – 12-метровый соленоид с количеством ячеек гофрировки около 50. Релятивистский электронный пучок (РЭП) используемый для нагрева плазмы создается ускорителем У-2. В нем электроны вытягиваются из взрывоэмиссионного катода и ускоряются до энергии около 1 МэВ. Ток пучка составляет 50 кА, что позволяет достигать мощности в 50 ГВт. При длительности пучка около 8 мкс в нем содержится до 200 кДж.

При пролете пучка через многопробочный соленоид в предварительно созданной дейтериевой плазме с плотностью около 10^{14} частиц/см³ вследствие развития двухпотоковой неустойчивости

возникает большой уровень микротурбулентности, в результате которой пучок теряет до 40% своей энергии, передавая ее электронам плазмы. За 3-4 мкс они нагреваются до температуры 2-4 кэВ и за время удержания, которое составляет около 1 мс, передают часть своей энергии ионам.

После пролета основного соленоида пучок электронов попадает в выходной узел установки. Он сконструирован таким образом, что может выдерживать сильные тепловые нагрузки от пучка и потока плазмы и не разрушиться. Для этого магнитное поле в нем уменьшается в 50 раз, так что плотность потока энергии уменьшается. Но даже при этом мощность электронного пучка и потока плазмы позволяет проводить эксперименты по облучению различных материалов для термоядерных реакторов будущего. Кроме того сам плазмоприемник состоит из графита, основными чертами которого является отсутствие жидкой фазы и его низкая плотность. Это приводит к тому, что энергия от пучка электронов выделяется в большем относительно металлов по толщине слое материала, и в результате этого графит не разрушается взрывным образом. Испарение материала плазмоприемника составляет около 1 мкм за выстрел.

Основная идея многопробочного удержания плазмы состоит в том, что при движении вдоль силовых линий магнитного поля ионы, попавшие в конус потерь для одного пробкотрона, вылетают в соседний. И хотя пробочное отношение для них одинаково, расстояние между областями сильного магнитного поля (22 см) составляет порядка длины пробега частицы. Это приводит к тому, что, пролетая через следующий пробкотрон, ион с высокой вероятностью испытает столкновение и выйдет из конуса потерь. После этого он будет захвачен внутри ячейки и вылетит только после нескольких столкновений, при этом он уже «забудет» про то откуда он прилетел в прошлый раз. Благодаря этому механизму разлет ионов плазмы вдоль ловушки существенно снижается.

5. Описание станда для ТДА.

Структурная схема станции термодесорбционного анализа показана на Рис.7. Станция состоит из вакуумного поста, включающего в себя средства создания и контроля вакуума, узел нагрева образцов и масс-спектрометр, и стойки питания с набором блоков питания и управления, необходимых для обеспечения работы станции.

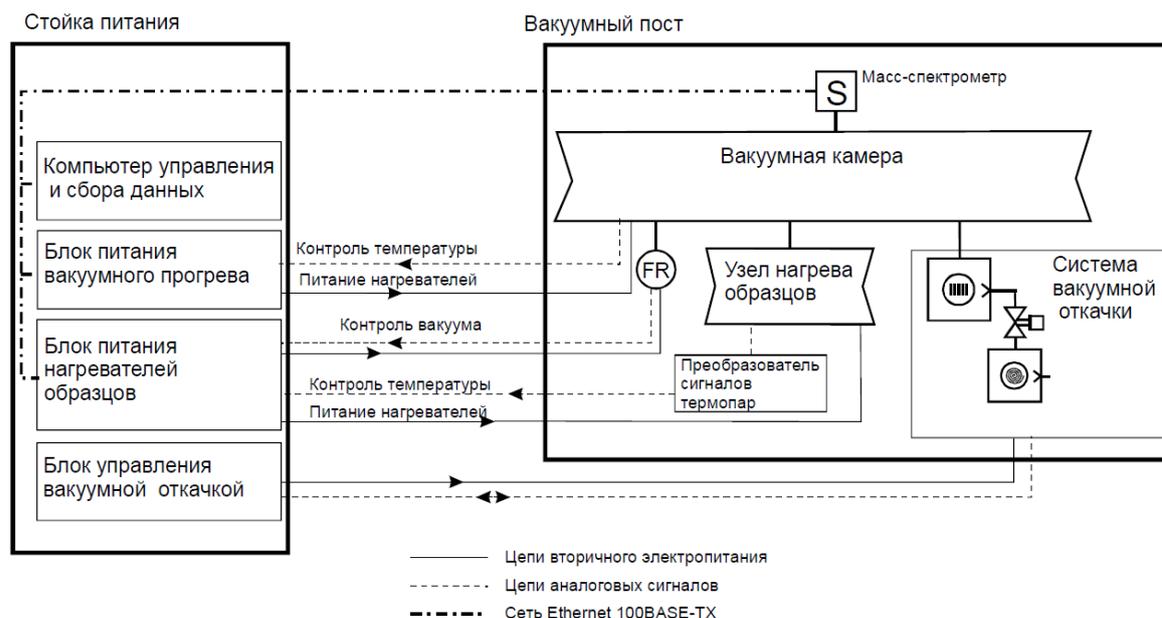


Рисунок 7 — Структурная схема станции термодесорбционного анализа.

Исследуемый образец помещается в узел нагрева образцов, представляющий собой вакуумную камеру, показанную на Рис. 8. Образец (1) находится в центре камеры на стальной подложке, которая является верхней крышкой кожуха для нагревателя (2). Для фиксации образца во время его замены в подложке сделано небольшое углубление по форме мишени. Ток к нагревателю подводится по танталовым проводам сечения 2 мм^2 . Непосредственно сам нагреватель представляет собой нихромовую проволоку диаметром 0,8 мм уложенную «змейкой» на стальное основание и придавленную сверху подложкой для образца. Для предотвращения замыкания по стальному кожуху между проволокой и сталью проложены

пластинки слюды, а в местах входа проволоки вставлены керамические трубки. При подаче большого тока на нагреватель внешняя часть проволоки перегорала, поэтому ее сечение было увеличено путем приваривания нескольких коротких отрезков на точечную сварку. Танталовые токовводы соединяются с нихромом при помощи никелевых трубок. В камеру ток вводится через вакуумные токовводы 2РМГ, приваренные к фланцу через дополнительную трубку. Такая конструкция позволила использовать сварку без риска повреждения стекла токоввода. Температура мишени измеряется при помощи хромель-алюмелевой термопары (3). Для уменьшения потерь тепла на излучение используются экраны из нержавеющей стали (4). Узел нагрева образцов соединен с вакуумным объемом стенда с помощью вентиля, позволяющего проводить смену исследуемых образцов без напуска воздуха внутрь объема вакуумного поста. Для визуального наблюдения и последующего использования пирометра для измерения температуры образца в камере предусмотрен патрубок со стандартным разъемом CF-40, к которому присоединён переходник с вакуумно-уплотненным окном (5).

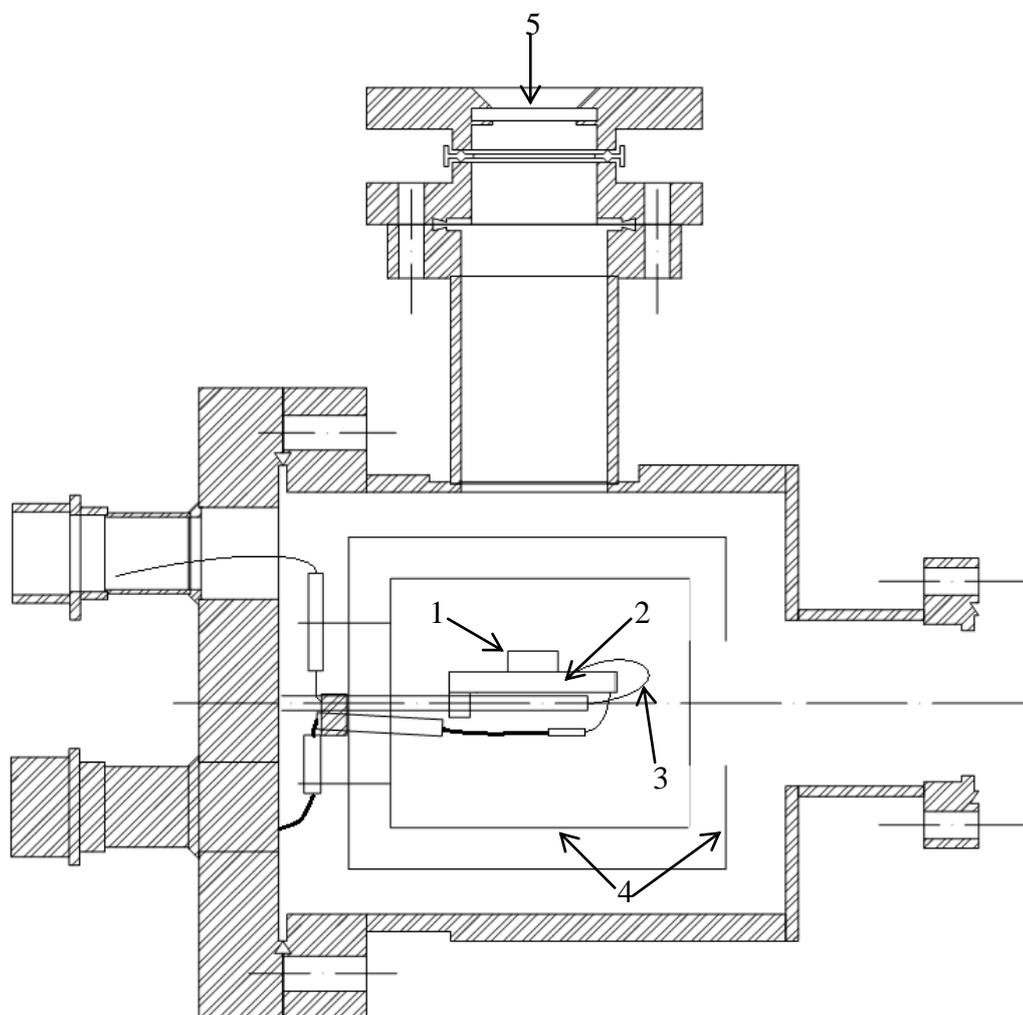


Рисунок 8 — Схема рабочего объема камеры для ТДА. 1 – мишень, 2 – стальная подложка с нихромовым нагревателем, 3 – хромель-алюмелевая термопара, 4 – экраны из нержавеющей стали, 5 – окно для пирометра.

При нагреве образцов термо-ЭДС термопар переводится в напряжение, пропорциональное температуре образца в преобразователе сигналов термопар (ОВЕН ТРМ-201). Этот же преобразователь осуществляет визуальную индикацию температуры образца. Напряжение, пропорциональное температуре, измеряется блоком питания нагревателей образцов (БПНО) и используется в системе обратной связи для поддержания требуемой температуры.

БПНО содержит два управляемых источника тока с током до 30 А и мощностью до 800 Вт (ЭЛИМ EL-AS27-300А), используемых для питания нихромового нагревателя. Управление блоком осуществляется с компьютера по сети Ethernet 100Base-TX через установленный в блоке контроллер ввода-вывода ADAM-6024.

Схема вакуумного поста показана на Рис. 9. Пост состоит из двух соединенных высоковакуумных объемов С1 и С2, прогреваемых до температуры 300°С и вспомогательного объема С3, прогреваемого до температуры 150°С. К высоковакуумным объемам пристыкован узел нагрева образцов (V), масс-спектрометр Pfeiffer Prisma QMG220 (S) и магниторазрядный вакуумметр Pfeiffer PKR261. Откачка поста производится с помощью турбомолекулярного насоса Shimadzu TMP-203 с форвакуумным спиральным насосом Anest Iwata ISP-250.

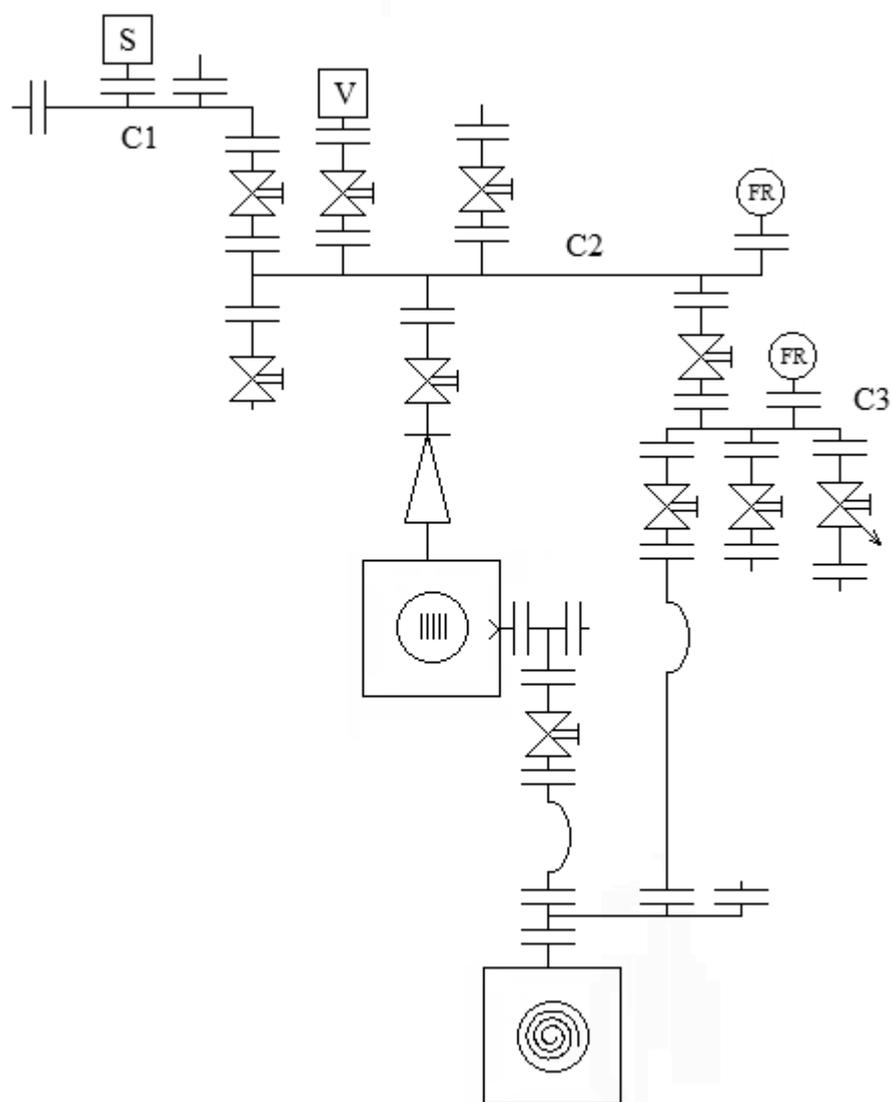


Рис 9 — Схема вакуумного поста станции термодесорбционного анализа. C1, C2 – высоковакуумные объемы, C3 – низковакуумная часть, V – камера ТДС, S – масс-спектрометр, FR – вакуумметры.

Вакуумная камера поста оборудована нагревателями, служащими для вакуумного прогрева после напуска атмосферы.

Измерение парциального давления десорбирующихся газов при нагреве образцов осуществляется с помощью квадрупольного масс-спектрометра Pfeiffer Prisma QMG-220, подключаемого к управляющему компьютеру по сети Ethernet 100Base-TX, при помощи специализированного программного обеспечения Quadera.

6. Описание стенда с многоапертурным инжектором электронов.

Экспериментальный стенд с мультиапертурным источником электронов с плазменным эмиттером используется для создания мощного пучка электронов с низкой угловой расходимостью[15]. Схематический вид установки показан на Рис. 10.

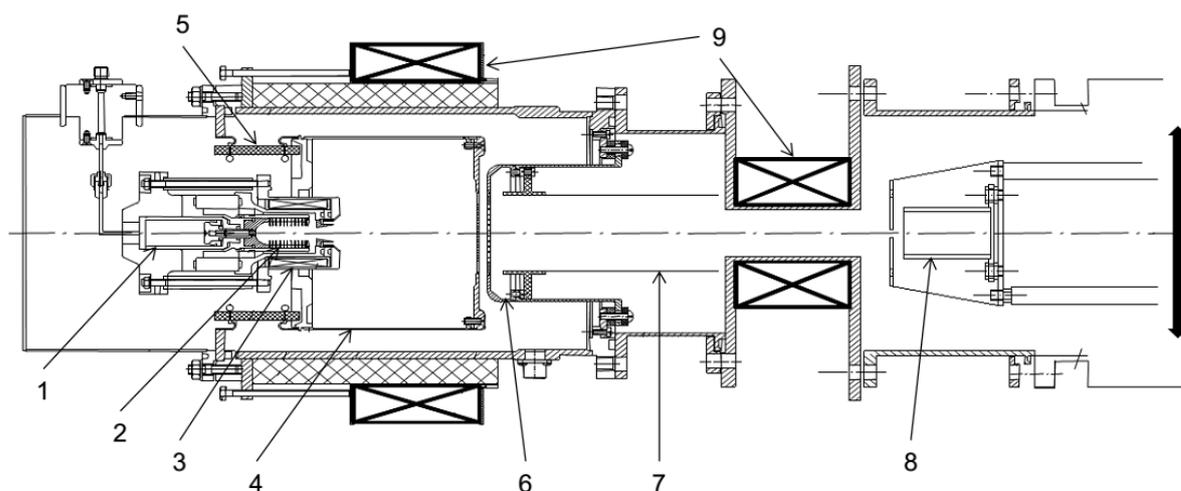


Рисунок 10 — Схема стенда: 1 – импульсный клапан, 2 – дуговой канал, 3 – катушка магнитной изоляции дуги, 4 – экспандер дугового разряда, 5 – керамический изолятор, 6 – анод диода, 7 – труба дрейфа, 8 – цилиндр Фарадея, 9 – катушки магнитного поля.

Рабочий газ (водород) количеством до $2 \cdot 10^{18}$ молекул напускается импульсным клапаном (1) в дуговой канал (2), образованный набором медных шайб, находящихся под плавающим потенциалом. Дуговой разряд зажигается с задержкой 800 мкс от подачи импульса тока на клапан, за время которой большая часть газа не успевает выйти из внутреннего объема генератора дуги. Стабилизация дугового разряда осуществляется катушкой магнитной изоляции (3), которая создает поле до 0,1 Тл. Ток дуги регулируется изменением напряжения зарядки накопителя в пределах от 10 до 40 ампер. Система питания позволяет производить выстрелы в автоматическом режиме с периодом 22 секунды. Во время импульса в

генераторе дуги создается плазма с плотностью около 10^{14} - 10^{15} частиц/см³ с температурой электронов 5-10 эВ. Анод разряда (4), являющийся одновременно экспандером плазмы, представляет собой полый цилиндр из нержавеющей стали. Противоположный его торец также является катодом электронно-оптической системы (ЭОС) и содержит молибденовую вставку с 121 эмиссионным отверстием диаметром 2,4 мм. Генератор дуги и цилиндр экспандера плазмы крепится на высоковольтном керамическом изоляторе (5). На расстоянии в 7,5 мм от катода ЭОС расположен анод (6), также содержащий 121 отверстие диаметром уже 4 мм и находящийся под земляным потенциалом. В этом диоде происходит вытягивание и ускорение электронов в режиме открытой плазменной границы потенциалом -32 кВ с длительностью до 300 мкс, подаваемым на экспандер. Пучок транспортируется в трубе дрейфа (7) в магнитном поле, создаваемом двумя катушками (9), проходит через магнитную пробку и попадает на цилиндр Фарадея (8).

7. Эксперименты с нагретыми мишенями.

Для облучения предварительно нагретых мишеней был сконструирован мишенедержатель с нагревателем. Его схематическое изображение показано на Рис. 11. Нагреватель состоит из основания, на котором уложена нихромовая проволока, придавленная сверху подложкой для мишеней. Мишени прижаты к подложке при помощи маски с отверстиями для облучения. Нагреватель состоит из восьми секций нихромовой проволоки 0,8 мм в диаметре по 0,8 Ом каждая. Для предотвращения короткого замыкания по основанию или подложке, состоящих из немагнитной нержавеющей стали, используются пластинки из слюды внутри нагревателя и керамические трубки в местах входа проволоки. Измерение температуры производилось при помощи хромель-алюмелевой термопары, термо-ЭДС которой считывалось с помощью контроллера ADAM.

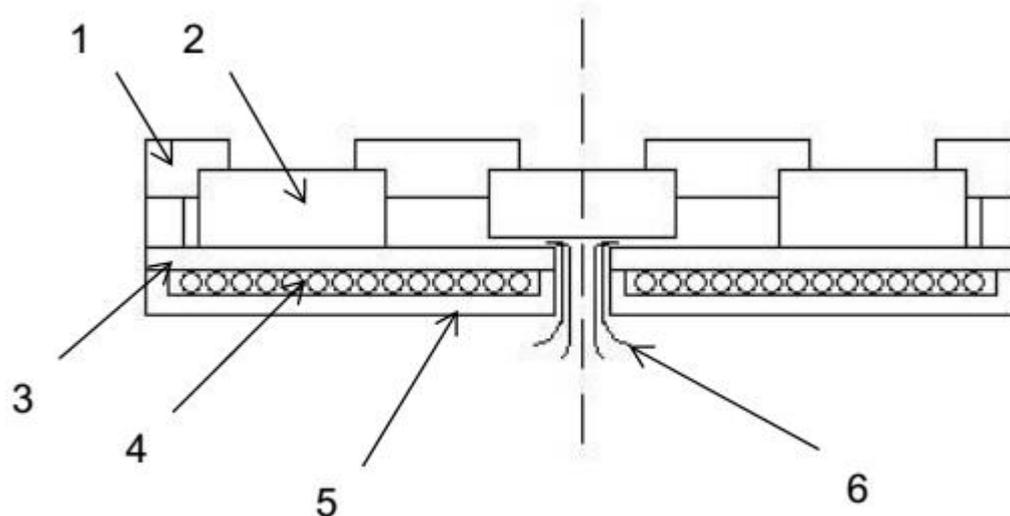


Рисунок 11 — Схема мишенедержателя с нагревателем. 1 – маска, 2 – мишень, 3 – подложка, 4 – нихромовый нагреватель, 5 – основание, 6 – термопара.

Внешний вид нагревателя с маской и мишенями показан на Рис. 12:

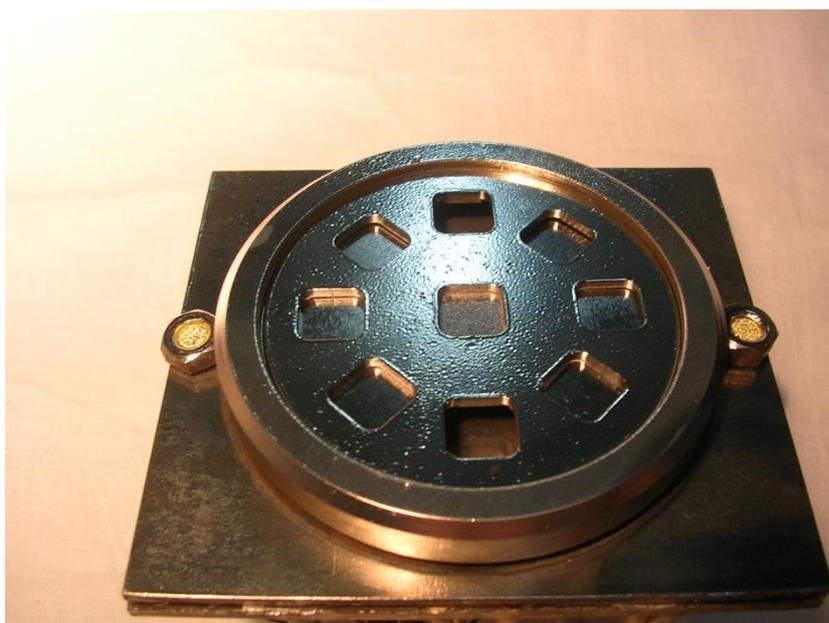


Рисунок 12 — Фотография нагревателя с маской и мишенями.

Мишенедержатель устанавливался в выходном узле ГОЛ-3 на шпильках как показано на Рис. 13 и 14. Все восемь секций нагревателя были соединены параллельно при помощи медных трубок. В этих экспериментах использовались вольфрамовые мишени 12x12 мм и толщиной 5 мм. Питание осуществлялось от сети через регулируемый трансформатор с гальванической развязкой.

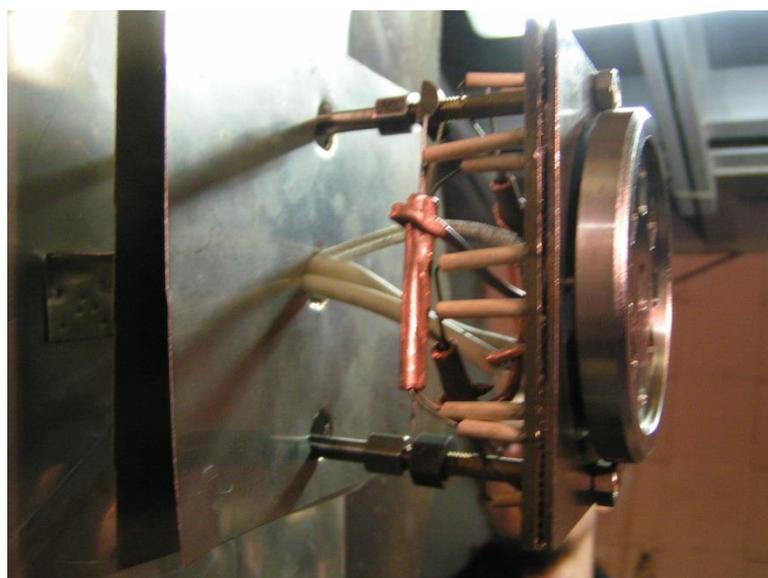


Рисунок 13 — Фотография мишенедержателя в выходном узле ГОЛ-3.

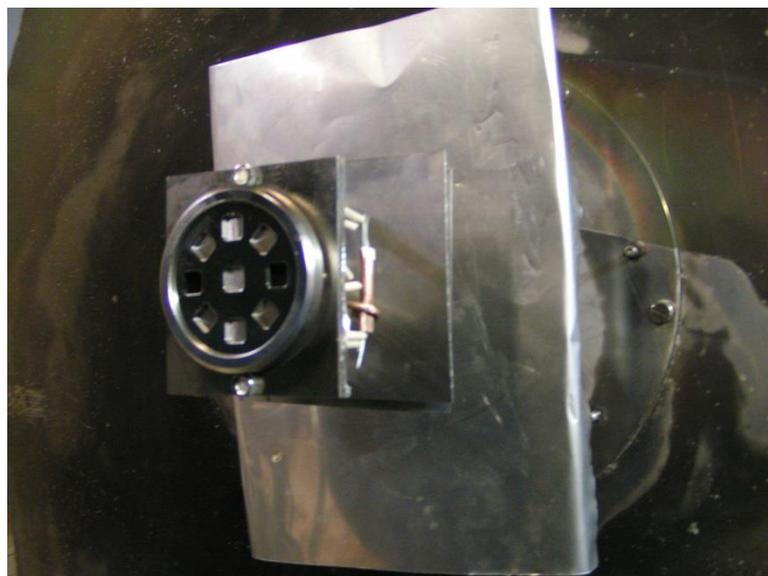
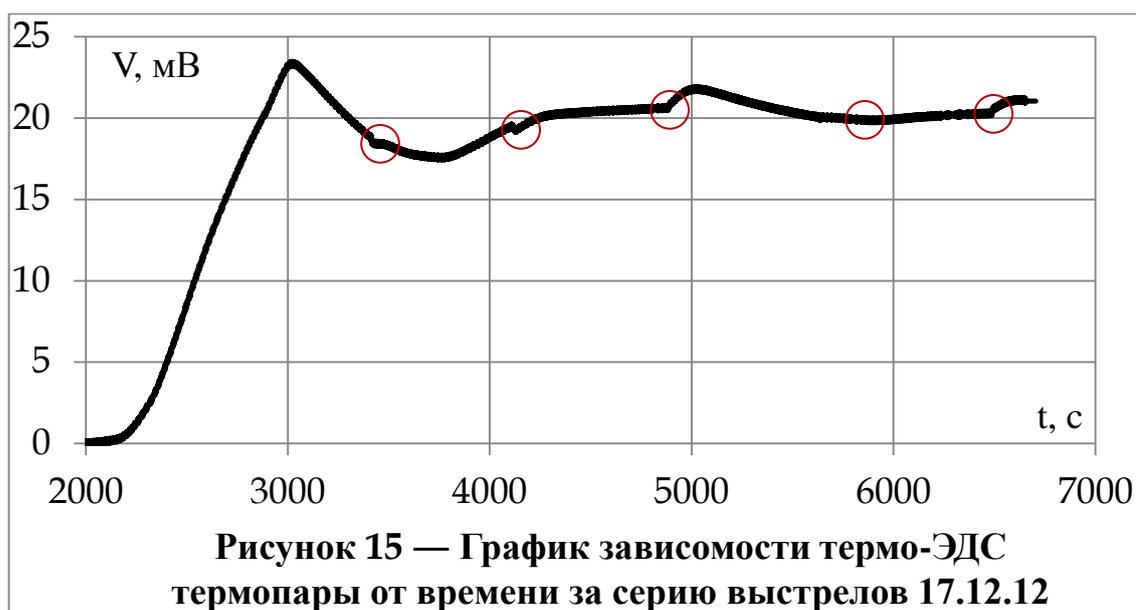
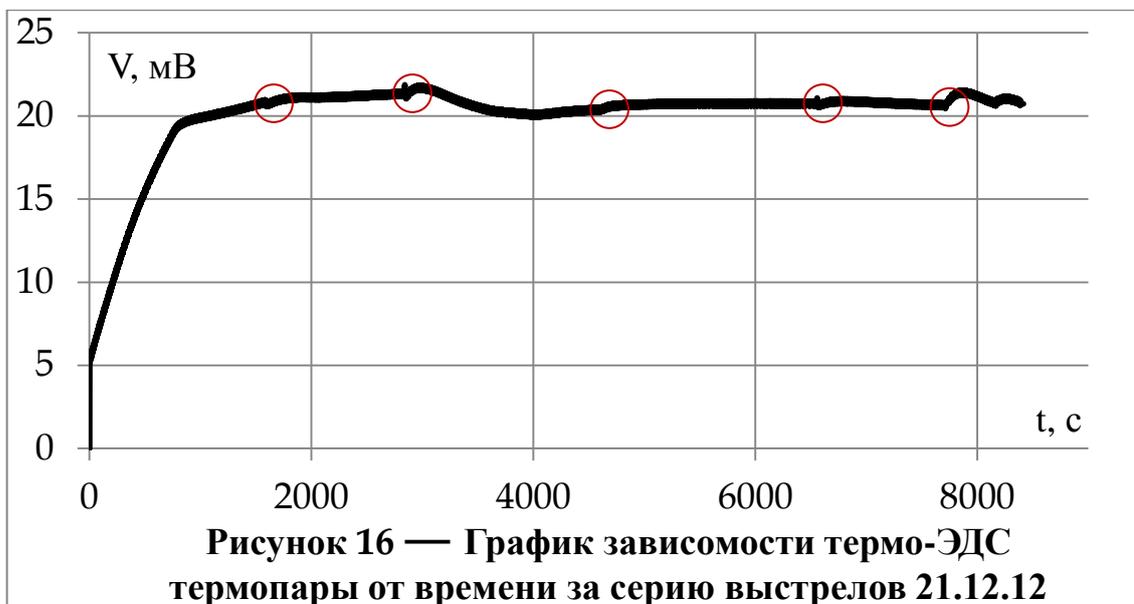


Рисунок 14 — Фотография мишенедержателя в выходном узле ГОЛ-3.

Облучение нагретых мишеней производилось в две серии по пять выстрелов в каждой серии. Для симуляции температуры материала дивертора образцы подвергались предварительному нагреву до 500°C . Зарегистрированная с термопары термо-ЭДС показана на Рис. 15 и 16. Во время выстрелов, отмеченных красными кружками, происходило пере замыкание тока, идущего по виткам нагревателя, поэтому приходилось каждый раз проводить подстройку подаваемого тока питания. В среднем мишени были нагреты до $510 \pm 20^{\circ}\text{C}$.





Энерговыделение на мишенях составило 1 МДж/м^2 в каждом выстреле, что соответствует ЭЛМам типа 1 в диверторе ИТЭР, которые будут происходить до 1000 раз за разряд. После облучения мишени исследовались на сканирующем электронном микроскопе Jeol JCM 5700. Ниже на Рис. 17 и 18 представлены снимки двух образцов облучённые без предварительного нагрева.

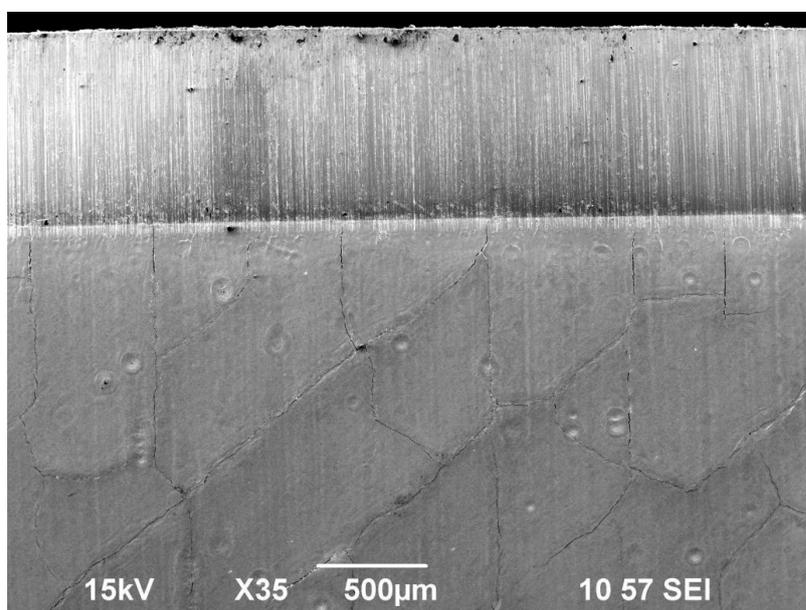


Рисунок 17 — Снимок поверхности мишени, облученной электронным пучком и потоком плазмы без предварительного нагрева

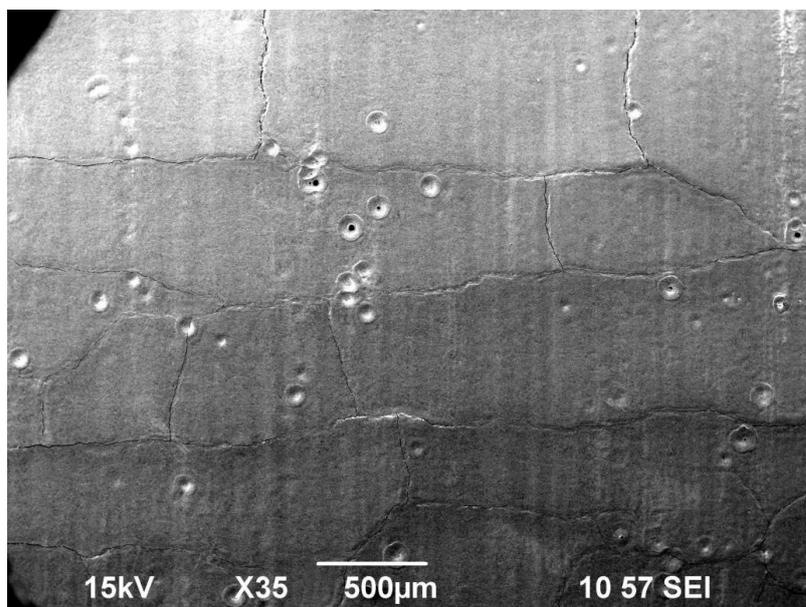


Рисунок 18 — Снимок поверхности мишени, облученной электронным пучком и потоком плазмы без предварительного нагрева

На данных образцах наблюдалось образование сети трещин. Поверхностная плотность кратеров составила около 5 штук на мм^2 . Кроме того стоит отметить, что мощность энерговыделения уже на этих мишенях была выше порога плавления, так как произошла рекристаллизация, которая видна при большем увеличении:

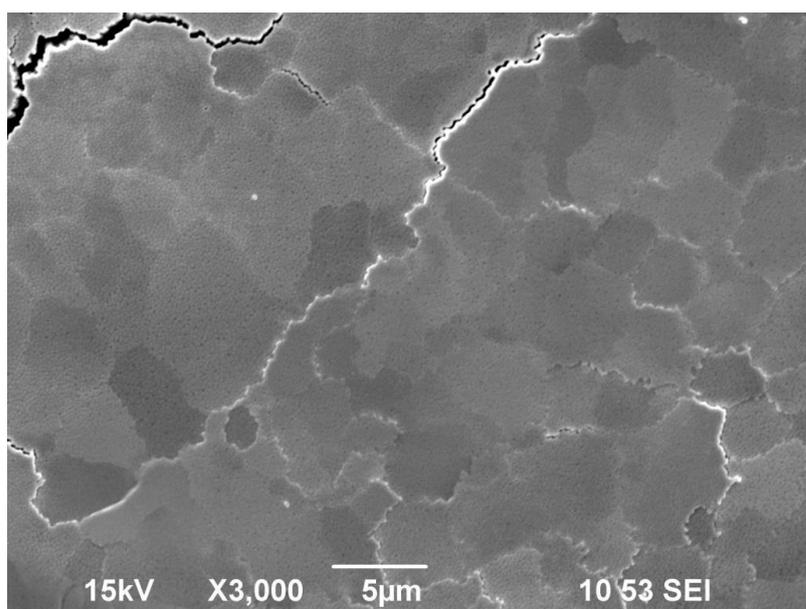


Рисунок 19 — Снимок поверхности облученного при комнатной температуре вольфрама со свидетельством его рекристаллизации.

Мишени, облученные при температуре 500 °С, также исследовались на СЭМе. На Рис. 20 и 21 показаны полученные снимки поверхности:

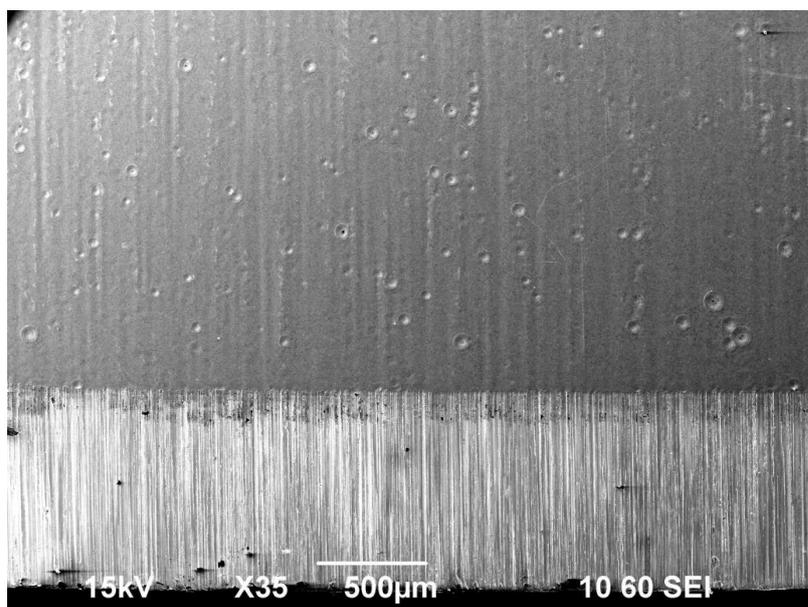


Рисунок 20 — Снимок поверхности мишени, облученной электронным пучком и потоком плазмы с предварительным нагревом до 500 °С

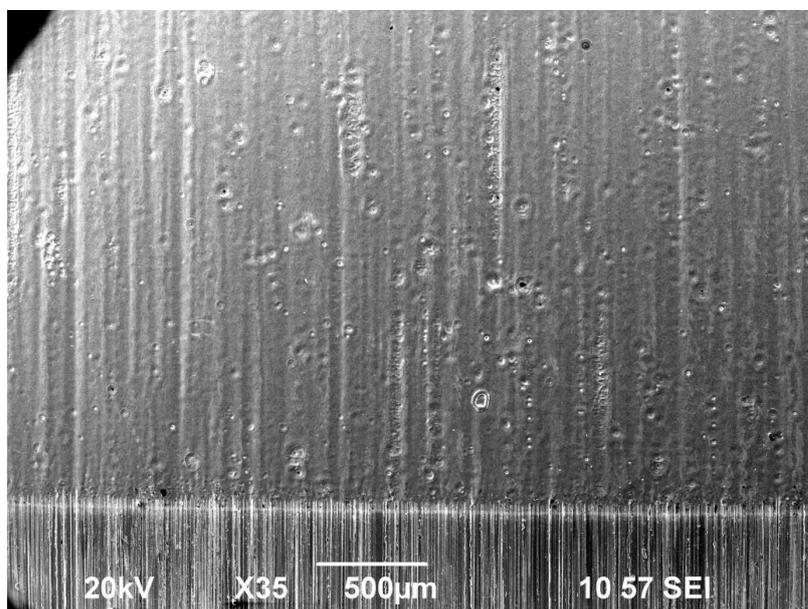


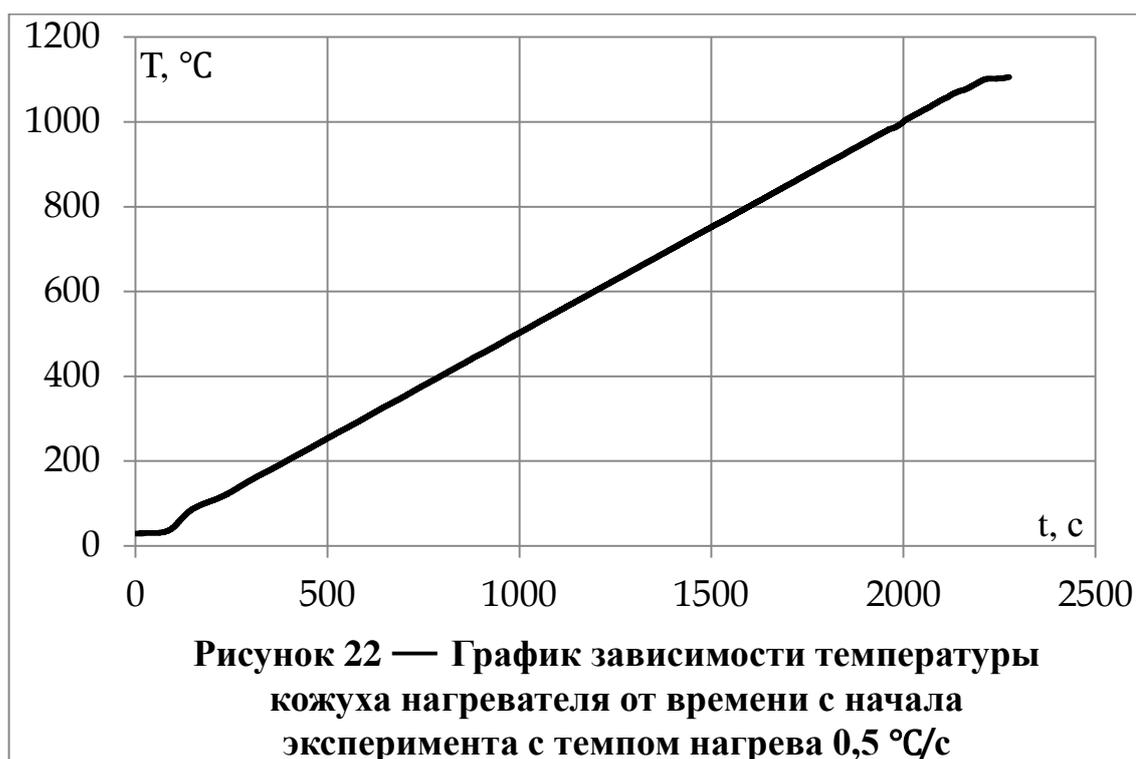
Рисунок 21 — Снимок поверхности мишени, облученной электронным пучком и потоком плазмы с предварительным нагревом до 500 °С

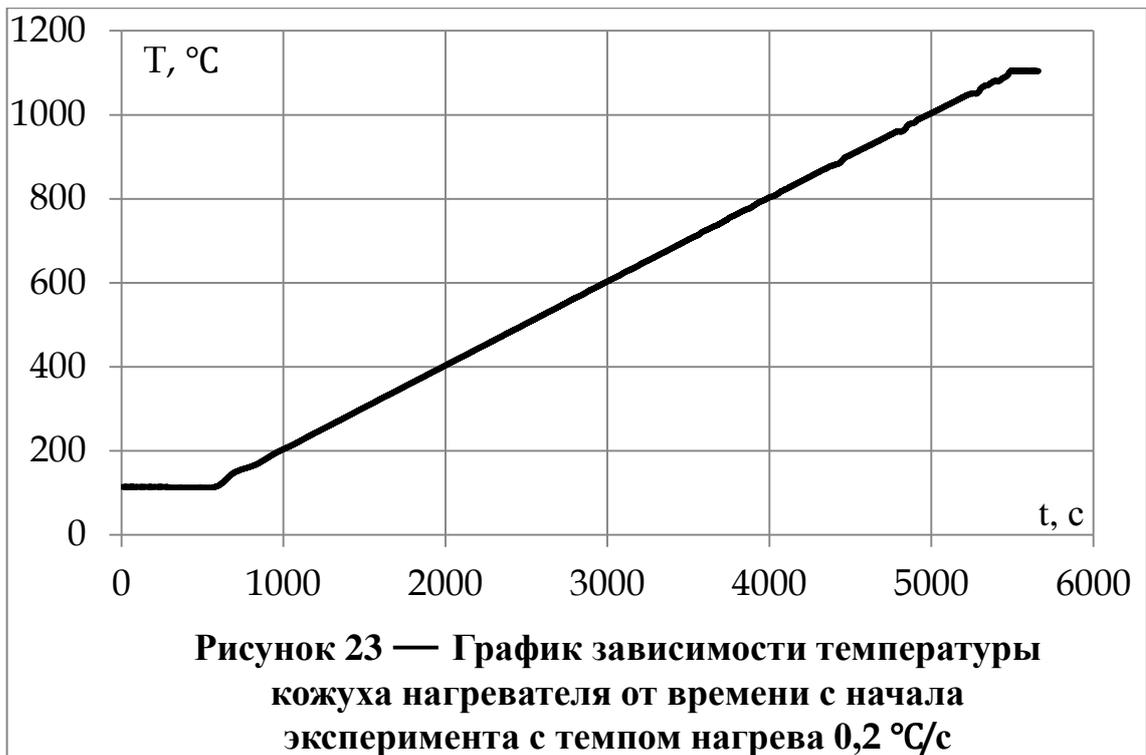
На образцах, облученных при температуре 500 °С, не наблюдалось образование трещин. При этом поверхностная плотность кратеров составила 17 штук на мм².

Таким образом, было обнаружено явное различие в модификации поверхности в зависимости от изначальной температуры мишени. Без нагрева на вольфраме образуется сеть трещин, а при 500 °С – нет. Кроме того на нагретых мишенях наблюдается повышенное в 3-4 раза кратерообразование, по сравнению с ненагретыми мишенями. Такая разница в модификации объясняется наличием хрупко-вязкого перехода (температура которого ниже 500 °С), после преодоления которого нагретый вольфрам становится более устойчивым к хрупкому разрушению, возникающему от температурного растяжения, вызванного попадающей на образец энергией.

8. Предварительные испытания стенда для термодесорбционного анализа.

Предварительные работы на стенде для ТДА включали в себя эксперименты по нагреву камеры без мишеней. Так как после модернизации камеры изменился тип нагревателя (предыдущий графлекс грел излучением, текущий – теплопроводностью по металлу), то необходимо было произвести калибровку управляющей программы, а именно изменить времена интегрирования и дифференцирования. Были проведены испытания нихромового нагревателя по осуществлению линейного нагрева. Полученные зависимости с различными темпами нагрева представлены на Рис. 22 и 23:





Из графиков выше видно, что после 200 °C обеспечивается приемлемая линейность нагрева. Была достигнута температура в 1100 °C, что выше энергии связи водорода на поверхности вольфрама.

9. Многоимпульсное облучение электронным пучком.

Для исследования механизмов усталости материала было произведено многоимпульсное облучение вольфрама в многоапертурном источнике электронов с плазменным эмиттером. Перед непосредственным облучением необходимо было снять профиль плотности энерговыведения пучка. Для этих целей был сконструирован подвижный детектор на основе цилиндра Фарадея, показанный на Рис. 24. Подвижная шпилька (1) длиной закреплялась на штанге уплотнения Вильсона и позволяла перемещать всю конструкцию вдоль ее оси. Несущие шпильки (2) длиной 310 мм и сечением S10 фиксировались на подвижной шпильке при помощи двух гаек и лежали на поддерживающей шпильке (3). Так как ось пучка электронов не совпадала с геометрической осью дрейфового канала, можно было менять высоту крепления поддерживающей шпильки на специальной раме (4). На несущих шпильках держалась стальная пластина (5), на которой был собран датчик.

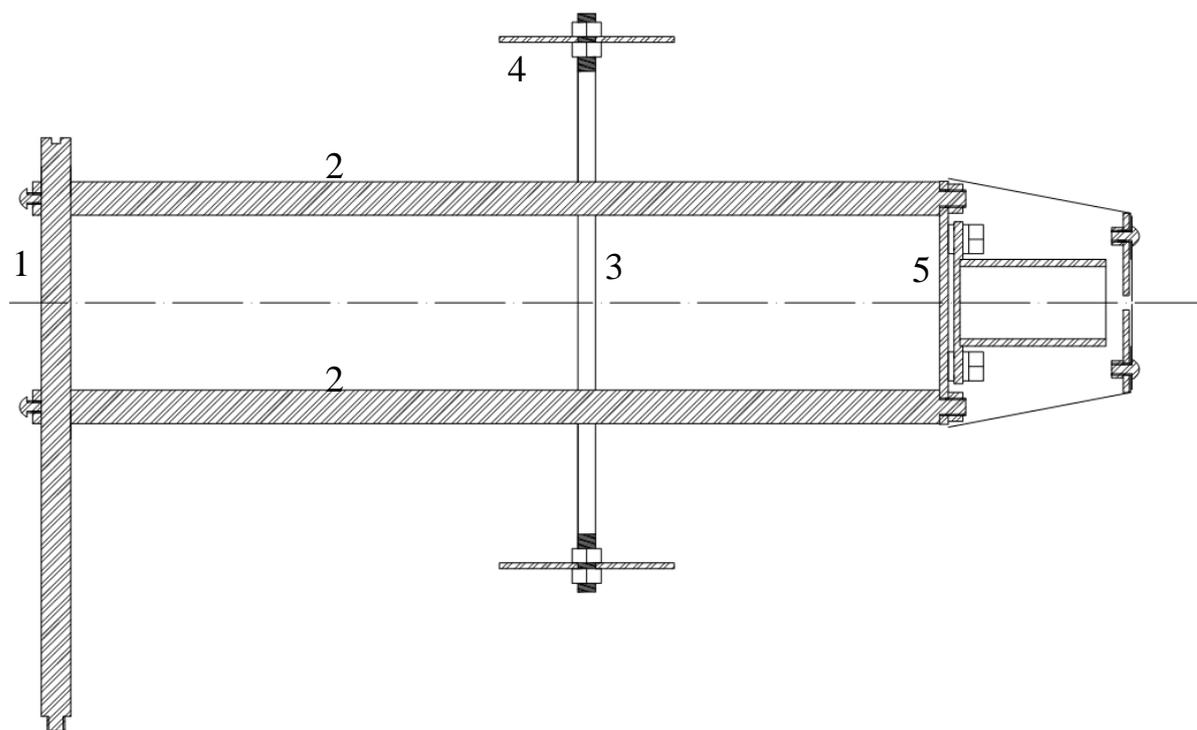


Рисунок 24 — Схематическое изображение подвижного детектора. 1 – подвижная шпилька, 2 – несущие шпильки, 3 – поддерживающая опора, 4 – рама для фиксации вертикального положения, 5 – основание датчика.

Более подробно строение датчика показано на Рис. 25. Цилиндр (1) внешнем диаметром 40 мм и длиной 50 мм приваривался к квадратному основанию (2), которое крепилось болтами к стальной пластине (3). Для обеспечения изоляции использовались фторопластовые вставки (4). Сепарация пучка осуществлялась молибденовой пластиной (5) с отверстием диаметром 0,8 мм, прикрепленной к переднему экрану (6), на котором также были установлены боковые экраны (7).

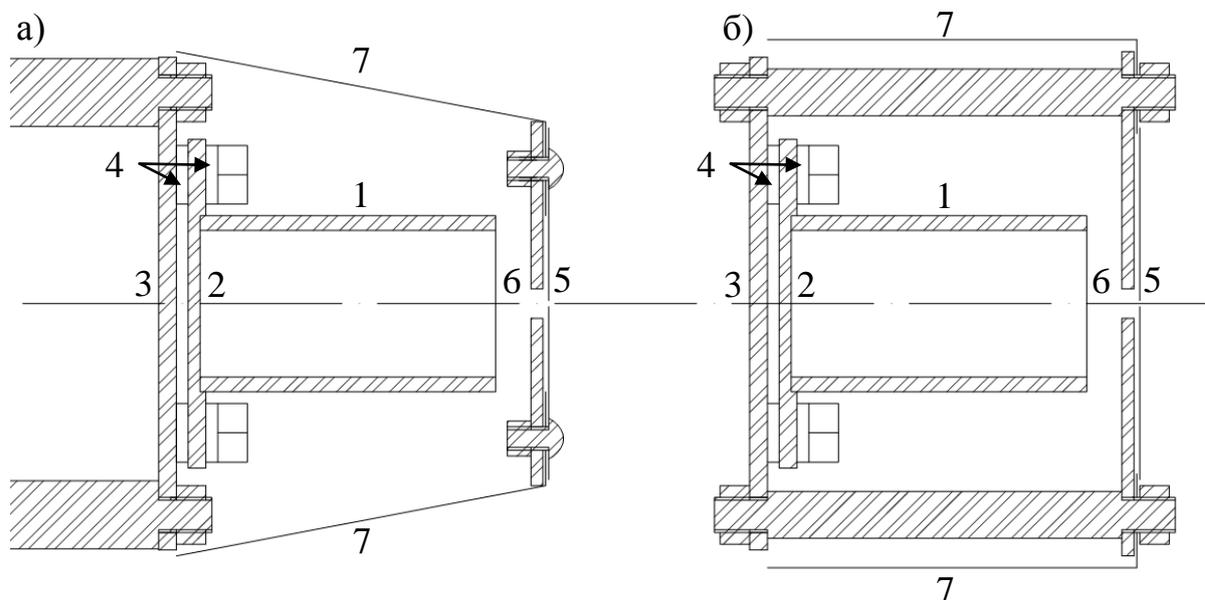


Рисунок 25 — Схема строения датчика тока пучка. а) горизонтальное сечение, б) вертикальное сечение. 1 –стальной цилиндр, 2 – основание цилиндра, 3 – основание датчика, 4 – фторопластовые изоляторы, 5 – молибденовая пластина, 6 – передний экран, 7 – боковые экраны.

Пролетая через отверстие в молибденовой пластине, электроны попадают на цилиндр Фарадея, откуда снимается их ток на землю через балластное сопротивление $11,7 \text{ Ом}$ при помощи осциллографа. Характерный для экспериментов сигнал показан на Рис. 26. Желтым каналом отмечено ускоряющее напряжение с коэффициентом перевода $1,67 \text{ кВ/В}$, синим – ток в цепи высокого напряжения с коэффициентом перевода 100А/В , а фиолетовым – сигнал с датчика. После усреднения по времени и деления на площадь отверстия и балластное сопротивление можно найти плотность тока пучка в данной точке.

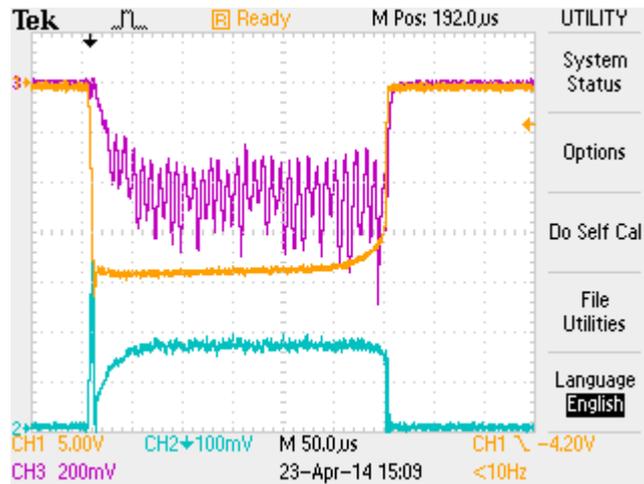


Рисунок 26 — Характерный сигнал, получаемый осциллографом во время экспериментов по измерению плотности тока пучка электронов. Желтый канал – ускоряющее напряжение, синий канал – ток дугового разряда, фиолетовый канал – сигнал с датчика.

Меняя положение датчика вдоль его оси движения можно произвести измерение профиля плотности тока пучка. Из этих данных, энергии электронов (32 кэВ) и времени работы источника (280 мкс) можно найти профиль плотности энерговыделения на мишени.

В результате испытаний стенда был найден стабильный режим работы источника с хорошими параметрами плотности энерговыделения и низкой частотой пробоев. Магнитное поле катушки основного поля составило 115 Гс в максимуме, в то время как пробка была установлена на 2900 Гс. Таким образом, пробочное отношение составило ~ 25 . Ток пучка достигал значения в 14 А. На Рис. 27 представлена полученная зависимость плотности энерговыделения от расстояния на оси движения датчика (в виде красных крестиков) и ее аппроксимация гауссовым профилем (синяя линия). Из параметров полученной кривой установлено, что в данном режиме работы источника максимум составил $0,75 \text{ МДж/м}^2 \text{ с}$ характерным радиусом 5 мм (расстояние на полувысоте)

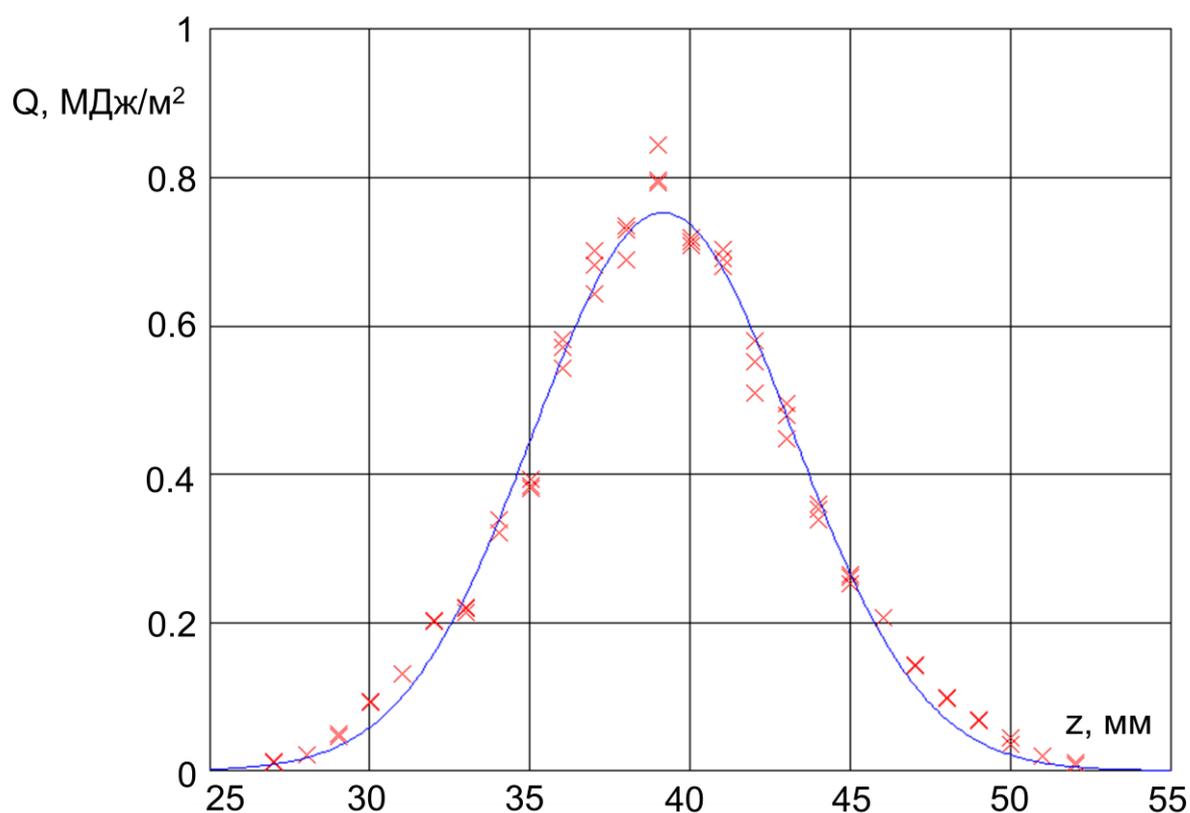


Рисунок 27 — График зависимости плотности энерговыведения пучка электронов от расстояния на оси движения датчика, экспериментальные результаты и их аппроксимация.

На Рис. 29 показана фотография использованной молибденовой пластины. Оплавленные следы в виде центральных отверстий ЭОС на ней были получены в другом режиме работы инжектора, для того, чтобы удостовериться, что датчик попал на центральную ось пучка. Для этого было увеличено основное и пробочное магнитные поля, что препятствовало перемешиванию разных струй, выходящих из многоапертурной ЭОС.



Рисунок 29 — Фотография молибденовой пластины, используемой в качестве сепаратора пучка после экспериментов.

После измерения плотности энерговыделения передний экран датчика был заменен на мишенедержатель с образцом, придавленным маской с отверстием для облучения. Мишени представляли собой кусочки вольфрама 12x12 мм и толщиной 8 мм. Материал был облучен в измеренном режиме с разным количеством выстрелов: 10, 100 и 1000. Следует отметить, что при облучении 1000 выстрелами количество пробоев составило менее 1%, а время работы инжектора определялось с точностью до минуты, что дает погрешность всего 3 выстрела. После этого мишени исследовались на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 5700. Внешний вид облученных образцов показан на Рис. 30:



Рисунок 30 — Внешний вид облученных мишеней.

Были получены снимки мишеней, облученных 10, 100 и 1000 выстрелами. Следует отметить, что нагрузка была ниже порога плавления, т.к. первоначальный рельеф поверхности вольфрама после шлифования не был изменен. На Рис. 31, 32 и 33 показаны снимки центральной части образцов, облученных 10, 100 и 1000 раз соответственно.

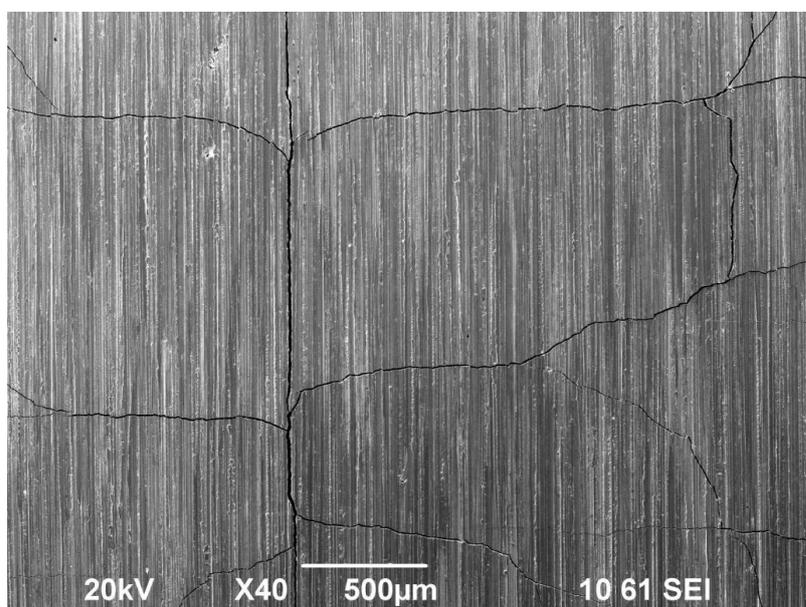


Рисунок 31 — Снимок центральной части мишени, облученной 10 выстрелами.

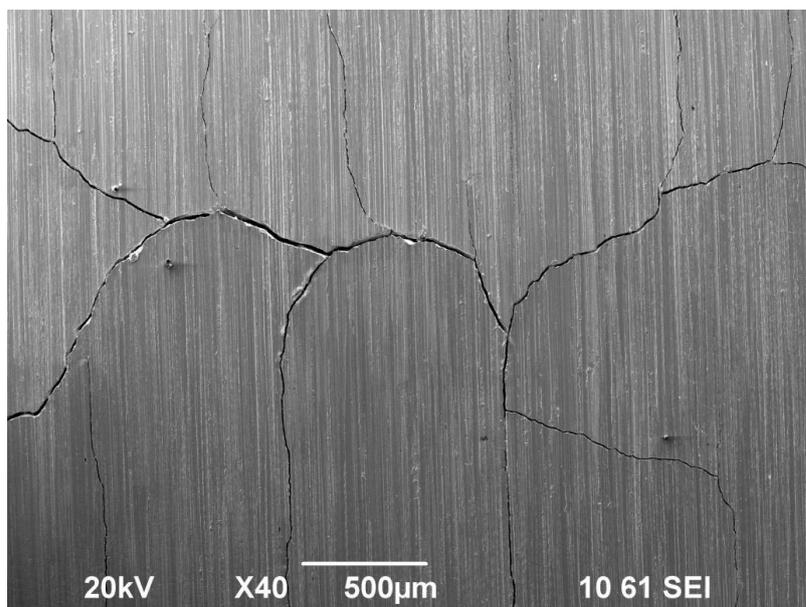


Рисунок 32 — Снимок центральной части мишени, облученной 100 выстрелами.

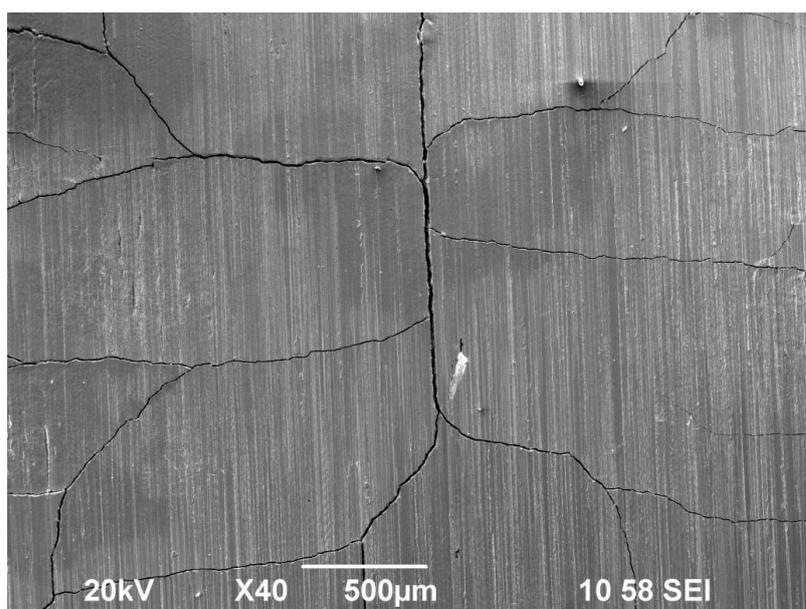


Рисунок 33 — Снимок центральной части мишени, облученной 1000 выстрелами.

Одно из основных различий между мишенями состоит в толщине трещин. На образце с наименьшим числом выстрелов образуется сеть тонких трещин. На 100 и 1000-импульсном образованные трещины в 2-3 раза толще. После 100 выстрелов усталость материала такова, что не приводит к существенному уширению трещин на 1000 циклах. На Рис. 34

и 35 показаны снимки трещин, образовавшихся недалеко от максимума облучения.

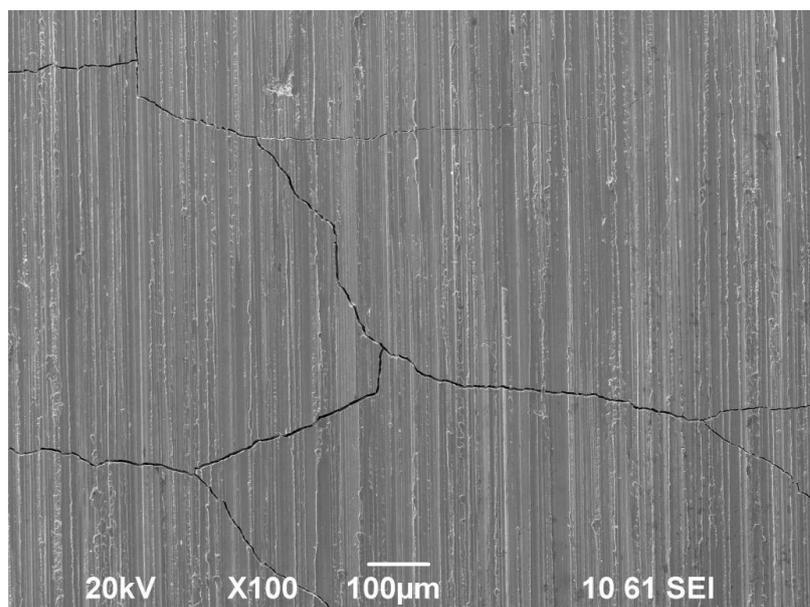


Рисунок 34 — Снимок поверхности вольфрама, облученного 10 выстрелами, с сетью тонких трещин.

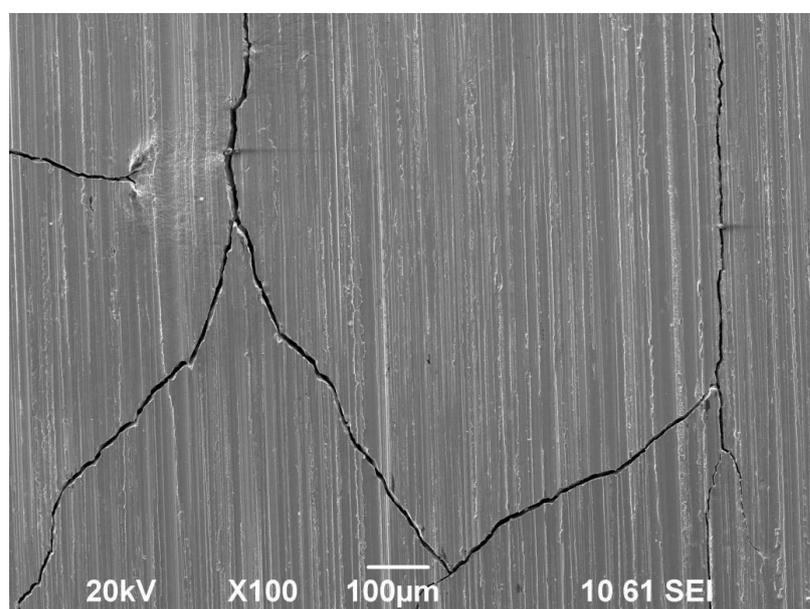


Рисунок 35 — Снимок поверхности вольфрама, облученного 100 выстрелами, с сетью крупных трещин.

Также на образце с 1000 выстрелов было обнаружено плавление небольшого приповерхностного слоя материала вдоль границ трещин. На

Рис. 36 показано место плавления. Это происходит в результате снижения теплопроводности вглубь и в стороны при возникновении глубоких трещин, проходящих внутри материала

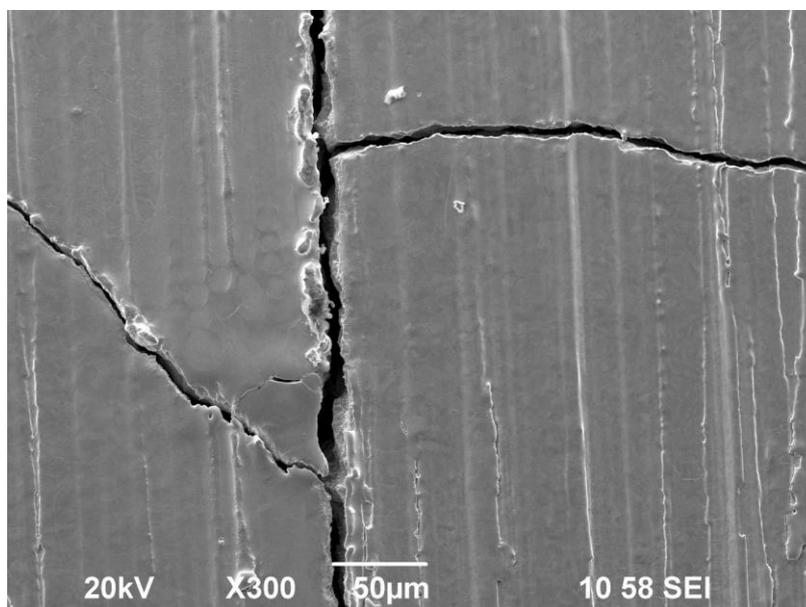


Рисунок 36 — Снимок поверхности вольфрама, облученного 1000 выстрелами, с областью плавления приповерхностного слоя вдоль трещин.

10. Выводы и заключения.

Были проведены эксперименты по облучению мишеней электронным пучком и потоком плазмы в установке ГОЛ-3 при комнатной температуре и с предварительным нагревом. Было произведено многоимпульсное облучение образцов вольфрама пучком электронов на стенде с мультиапертурным инжектором с количеством выстрелов 10, 100 и 1000. Также были проведены предварительные испытания модернизированного стенда для термодесорбционного анализа.

1. При облучении с мощностью выше порога плавления:

- На мишенях, облученных при комнатной температуре, образуется сеть крупных трещин, которые не наблюдаются на предварительно нагретом вольфраме.
- На образцах после облучения при температуре 500°C обнаружено увеличение количества кратеров в 3-4 раза.

2. При облучении с мощностью ниже порога плавления:

- Было обнаружено, что с ростом числа выстрелов растет толщина трещин при сравнении 10 и 100 выстрелов. После 100 импульсов на 1000 существенного уширения трещин обнаружено не было.
- На поверхности материала после 1000 выстрелах наблюдалось оплавление тонкого приповерхностного слоя вольфрама вдоль краев трещин из-за подавления теплопроводности в результате их распространения вглубь материала.

3. Предварительные испытания модернизированного стенда для ТДА показали:

- Изменение конструкции нагревателя позволило достичь температуры в 1100°C с приемлемой линейностью нагрева.

4. Библиографический список.

1. C. Thomser, A. Buerger, J. Linke, Material challenges for plasma facing components in future fusion reactors, 5th International conference on the frontiers of plasma physics and technology, 18-22 April 2011.
2. M. Rieth, S.L. Dudarev, S.M. Gonzalez de Vicente, et al, Recent progress in research on tungsten materials for nuclear fusion applications in Europe, Journal of Nuclear Materials, 2013, vol. 432, pages 482-500.
3. M. Wirtz, J. Linke, G. Pintsuk, G. De Temmerman, G.M. Wright, Thermal shock behavior of tungsten after high flux H-plasma loading, Journal of Nuclear Materials, 2013, vol. 443, pages 497-501.
4. J. Linke, High heat flux performance of plasma facing materials and components under service conditions in future fusion reactors, Transaction of Fusion Science and Technology, vol. 53, 2008, pages 497-501.
5. I.E. Garkusha, A.N. Bandura, O.V. Byrka, Damage to preheated tungsten targets after multiple plasma impacts simulating ITER ELMs, Journal of Nuclear Materials, vol. 386–388, 2009, pages 127–131.
6. В.П. Будаев, Ю.В. Мартыненко, А.В. Карпов и др., Рекристаллизация и растрескивание вольфрама при тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР, ВАНТ, 2013, серия Термоядерный синтез, стр. 53-60.
7. И.М. Позняк, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы, ВАНТ, 2012, серия Термоядерный синтез, стр. 23-33.
8. H. Greuner, Ch. Linsmeier, H. Maier, High Heat Flux Facility GLADIS at IPP Garching, PMTS Workshop, Aug.31 –Sep.2 2010.
9. W.J. Goedheer, G.J. van Rooij, V. Veremiyenko, et al, MAGNUM-PSI, a Plasma Generator for Plasma-Surface Interaction Research in ITER-like Conditions, 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004, FT/P7-21.

10. G. De Temmerman, M.A. van den Berg, J. Scholten, et al, High heat flux capabilities of the Magnum-PSI linear plasma device, Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, pages 483-487.
11. С. Ф. Борисов, Межфазная граница газ–твердое тело: структура, модели, методы исследования, Учебное пособие, Екатеринбург, 2001.
12. В. Балек, Ю. Тельдеши, Эманационно-термический анализ, Применение в химии твердого тела, аналитической химии и технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1986 г.
13. И.Н. Бекман, Эманирование твердых тел (Феноменологическая теория), Москва, 2008.
14. А.А. Шошин, А.В. Аникеев, Ловушка для термояда // Наука из первых рук, №5 (17), 2007, стр. 6-19.
15. И.В. Кандауров, В.В. Куркучеков, Ю.А. Трунев, Формирование интенсивного электронного пучка в мультиапертурном источнике с плазменным эмиттером и его транспортировка в магнитном поле пробочной конфигурации, 2012.