ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 1, с. 75–83

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 531.49.17.19

УСТАНОВКА "ВИХРЬ" ТИПА "ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС" ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

© 2020 г. В. А. Грибков^{*a*,*,**}, И. В. Боровицкая^{*a*}, А. С. Демин^{*a*}, Е. В. Морозов^{*a*}, С. А. Масляев^{*a*}, В. Н. Пименов^{*a*}, А. В. Голиков^{*b*}, А. К. Дулатов^{*b*}, Г. Г. Бондаренко^{*c*}, А. И. Гайдар^{*d*}

^а Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 49

> ^b ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова Россия, 127055, Москва, Сущёвская ул., 22

^с Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" Россия, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

> ^d НИИ перспективных материалов и технологий Россия, 115054, Москва, ул. Малая Пионерская, 12

> > *e-mail: gribkovv@rambler.ru

**e-mail: pimval@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019 г. После доработки 17.06.2019 г. Принята к публикации 29.06.2019 г.

Описаны плазменно-пучковая установка "Вихрь" типа "плазменный фокус" (п.ф.) с энергией ~5 кДж, введенная недавно в эксплуатацию в ИМЕТ РАН, устройство ее составных элементов и параметры. Рассмотрены физические процессы, происходящие в рабочей камере п.ф.: генерация пучков быстрых электронов, ионов, кумулятивной струи горячей плазмы, жесткого рентгеновского излучения, а при использовании в качестве рабочего газа дейтерия — нейтронов. Проведены эксперименты по испытанию энергосберегающих схем п.ф. с применением новой схемы питания камеры п.ф., которая содержит кроубарный разрядник и электронную схему задержки. Установка ориентирована на испытание, диагностику и модифицирование радиационно-термической стойкости материалов, предназначенных для применения в термоядерной энергетике и аэрокосмической технике. Описаны первые эксперименты на рассматриваемой установке в области радиационного и космического материаловедения.

DOI: 10.31857/S0032816219060193

1. ВВЕДЕНИЕ

Установка "плазменный фокус" (п.ф.) [1] принадлежит к устройствам, использующим пинчэффект, т.е. сжатие плазмы магнитным полем токами мегаамперного уровня, протекающими при электрическом разряде в различных газах. После пинчевания в сжатой плазме развиваются различные магнитогидродинамические и кинетические процессы, которые приводят к генерации в пинче локализованных источников быстрых плазменных сгустков, потоков релятивистских электронов и быстрых ионов, рентгеновского излучения, нейтронов и других жестких излучений [2]. Энергия конденсаторных батарей E_c , используемых для питания таких установок, в настоящее время перекрывает диапазон от одного джоуля до нескольких мегаджоулей. Устройства п.ф. с энергозапасом E_c в несколько килоджоулей (т.е. со "средним" энергозапасом) применяются в различных областях науки и техники, например, [3–7], среди которых: радиационное материаловедение, поиск скрытой взрывчатки, скоростная съемка в рентгеновском и нейтронном излучениях внутренней структуры объектов, ядерная биология и медицина и др.



Рис. 1. Фотография установки плазменный фокус "Вихрь" в сборе.

Задачей данной работы было создание установки п.ф. "Вихрь" с целью ее использования в термоядерной энергетике и аэрокосмической технике для испытания и диагностики радиационно-термической стойкости и повреждаемости различных материалов. Имеются в виду материалы, которые перспективны для применения в указанных областях и используются в первой стенке и конструкциях реакторов управляемого ядерного синтеза (УЯС) с магнитным и инерциальным удержанием плазмы, а также в составе изделий, размещаемых на внешней поверхности аппаратов аэрокосмической техники.

2. УСТАНОВКА "ВИХРЬ" В ИМЕТ РАН

2.1. Устройство, составные элементы и параметры установки

Установка "Вихрь" (рис. 1) представляет собой плазменный фокус среднего энергозапаса с энергией E_c в интервале 2—6 кДж. В установке использована камера ПФ-7 [7] мэйзеровского типа, разработанная в ФГУП "ВНИИА им. Н.Л. Духова" и усовершенствованная для проведения материаловедческих работ.

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 2. В устройстве использованы четыре конденсатора типа КМК-30-7 $(C_1 - C_4)$, производимые Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого (Россия). Основные параметры каждого конденсатора следующие: номинальное начальное зарядное напряжение $U_0 = 30 \text{ кB}$ (испытательное 33 кВ), емкость C = 7.6 мк Φ , собственная индуктивность L = 8 нГн и максимальный разрядный ток (ток короткого замыкания) І_{макс} = 350 кА. Масса каждого конденсатора составляет 40 кг. При максимальном напряжении зарядки конденсаторов предельно запасаемая энергия в батарее может составлять до 13.7 кДж. Однако предполагается использование этой установки с начальным зарядным напряжением U_0 в диапазоне от 12 до 20 кВ, т.е. при энергии от 2.2 до 6.1 кДж.

На рис. 1 показан токовый коллектор установки п.ф. "Вихрь", который соединяет конденсато-



Рис. 2. Принципиальная электрическая схема п.ф. "Вихрь". *PSS* – псевдоразрядники.



Рис. 3. Принципиальная схема системы поджига тиратронов.

ры с камерой п.ф. через тиратроны и кабели. Крепление коллектора к основанию позволяет поворачивать его на угол 90°, что дает возможность работать при вертикальном и горизонтальном положениях оси Z разрядной камеры. Эти два положения камеры п.ф. позволяют использовать два разных направления потока плазмы, ионов и электронов, что расширяет возможности экспериментов и обеспечивает их бо́льшую гибкость.

Камера п.ф. устанавливается внутри крепежной детали коллектора, и с помощью специальных приспособлений для нее обеспечивается симметричный "мультиконтакт" коллектора с камерой.

Для коммутации конденсаторной батареи используются тиратроны ТДИЗ-150к/25СН-П со следующими параметрами: амплитуда тока до 150 кА с фронтом до $5 \cdot 10^{12}$ A/c, напряжение до 25 кВ, коммутируемая энергия до 40000 Дж.

Передача тока от каждого из конденсаторов через токовый коллектор на камеру п.ф. осуществляется четырьмя группами по 6 коаксиальных семижильных кабелей типа RG 213/U 50-2,25/7,25TECHNOKABEL S.A. (Польша). На данной установке делитель напряжения к настоящему моменту пока не установлен. Пояс Роговского размещен в части камеры, расположенной в районе токового коллектора. Магнитные зонды имеются на каждом конденсаторе. Они смонтированы на одном из шести кабелей каждого конденсатора, в его оголенной части вблизи псевдоразрядника, и с их помощью осуществляется контроль одновременности срабатывания всех четырех коммутаторов в каждом "выстреле" п.ф. Система поджига тиратронов (рис. 3) имеет следующие характеристики: крутизна фронта импульса напряжения поджига 5 кВ/мкс, амплитуда тока поджига 70 А, длительность импульса поджига 0.2 мкс.

Вакуум в рабочем объеме установки создается с помощью насосной станции TSH 071E фирмы Pfeiffer (см. рис. 1), в состав которой входит мембранный форвакуумный насос MVP 015-2, обеспечивающий первичную откачку до 1 мбар. Это позволяет запустить основной турбомолекулярный насос TMH 071 с электронным блоком управления TC 600, который, в свою очередь, позволяет достигнуть давления до 10⁻⁶ мбар.

Для контроля глубины вакуума используется датчик давления VSM72 с электронным блоком управления VD9 фирмы Thyracont Vacuum Instruments. Диапазон его измерений до 10⁻⁹ мбар.

Для контроля давления рабочего газа в камере плазменного фокуса используется датчик Vactron model 76 фирмы Setra с электронным блоком управления ADD Active Digital Display D395-56 фирмы Edwards, который позволяет контролировать давление напуска рабочего газа в пределах 0.01–20 мбар.

В качестве высоковольтного источника питания постоянного тока в установке используется прибор инверторного типа компании LAMBDA LC1202 с водяным охлаждением. Его характеристики: напряжение 0–20 кВ, скорость зарядки до 13 кДж/с, потребляемая мощность 15 кВт. Источник питания обеспечивает работу установки с частотой от 2 Гц при начальном зарядном напряжении $U_0 = 20$ кВ вплоть до 6 Гц при $U_0 = 12$ кВ.

Фронт ударной волны Изолятор Катод Анол Плазма Образец Плазменный лиол Пучок быстрых ионов

Рис. 4. Схематическое изображение камеры п.ф. и процессов, происходящих в рабочем объеме установки.

Для работы с данным источником питания нами было написано программное обеспечение и собрана плата управления с целью свести все манипуляции к одному персональному компьютеру (п.к.) и обеспечить безопасное расстояние до источников рентгеновского и нейтронного излучений, которыми являются камера п.ф. и тиратроны во время их работы. Плата управления преобразует цифровые команды с п.к. в аналоговые сигналы, которые подаются на источник питания. Она также считывает аналоговые сигналы с источника питания, преобразуя их в цифровой вид. Эти данные обрабатываются программой, позволяющей заранее задавать напряжение на конденсаторах с шагом 100 В, а также считывать реальное напряжение зарядки конденсаторов. Программным обеспечением также реализована отсечка зарядки конденсаторов по времени, равная 3 с. Это позволяет более точно задавать напряжение и контролировать работу установки. Все управление сведено к одному п.к.

Управление зарядным устройством посредством программного обеспечения осуществляется удаленно с помощью сетевого протокола SSH (Secure SHell - "безопасная оболочка") с использованием Wi-Fi-сети. Получение данных с осциллографа (который фиксирует производные тока на конденсаторах) выполняется с помощью системы VNC (Virtual Network Computing), обеспечивающей удаленный доступ оператора к рабочему столу компьютера.

Как следует из вышеописанного, установка "Вихрь" создана на ту же энергетику, а ее наиболее важная часть – на той же элементной базе (конденсаторы, псевдоразрядники, камера и коллектор), что и созданный нами ранее в Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза (Варшава, Польша) плазменный фокус PF-6 [8]. Поэтому временные и энергетические параметры разряда и генерируемых в данном устройстве излучений близки к получаемым на указанном устройстве данным, которые были многократно с момента публикации [8] изучены (см., например, статьи [9, 10]). Частота следования импульсов в нашем случае была 1 выстрел/мин. Но, вообще говоря, максимальная частота работы установки определяется мощностью зарядного устройства фирмы LAMBDA и при зарядном напряжении 12 кВ может составлять, как указано выше, 6 Гц.

2.2. Процессы, происходящие в п.ф.

Процессы, которые происходят в камере п.ф. (см. [1, 2]), можно описать следующим образом (рис. 4).

Сначала происходит имплозия токовоплазменной оболочки у оси камеры, и образуется кумулятивная струя горячей плазмы ($T_{nn} = 300-$ 1000 эВ). Она распространяется вдоль оси Z от анода со скоростью $v > 10^7$ см/с и толкает перед собой ударную волну в рабочем газе. Затем, через 30-60 нс, на пинче образуется плазменный диод. В нем генерируются сначала пучки быстрых электронов, направленные к аноду, а затем быстрые ионы, направленные вдоль кумулятивной струи. Пучок ионов догоняет и в некоторый момент проходит фронт ударной волны. Энергия, которая содержится в сгустке горячей плазмы и в потоке ионов, определяет эффективность их генерации в п.ф. и составляет порядка нескольких процентов от энергии, запасенной в батарее.

Установка "Вихрь" способна генерировать кумулятивную струю плазмы с начальной температурой порядка 1 кэВ, плотностью мощности до $q = 10^9 - 10^{10} \text{ Br/см}^2$ и длительностью импульса $\tau =$ = 50-100 нс, потоки быстрых электронов и ионов со средней энергией $E \approx 100$ кэВ, плотностью мощности до $q = 10^{10} - 10^{12}$ Вт/см² и длительностью импульса $\tau = 10-50$ нс, жесткое рентгеновское излучение с энергией фотонов порядка 100 кэВ, а в случае использования в качестве рабочего газа дейтерия — нейтроны с энергией 2.45 МэВ.

Регулировка плотности мощности на поверхности мишеней из различных материалов, облучаемых в рабочей камере п.ф., осуществляется с помощью изменения энергозапаса установки путем подбора напряжения и давления рабочего газа, а также удаленностью мишеней от источника излучения (пинча и плазменного диода).

2.3. Испытания энергосберегающих схем п.ф.

Разряд батареи в п.ф. носит колебательный характер. Обычно число осцилляций тока при разряде в п.ф. достигает 4-7 периодов. Ясно, что основная энергия батареи расходуется на омические и другие потери во время колебаний, следующих за



первым полупериодом. Если бы удалось прервать (разомкнуть) после первого полупериода разрядный ток батареи при его нулевом значении, то значительная часть энергии осталась бы в конденсаторах. При этом к.п.д. установки в целом по отношению к генерации жестких излучений резко бы возрос, так как эти излучения создаются в максимуме тока именно в первом полупериоде разряда.

Несмотря на то что после разрыва тока в конце первого полупериода батарея конденсаторов оказывается заряженной отрицательно, применение двух п.ф. с одной батареей позволяет использовать оставшуюся в ней энергию. Действительно, схема, в которой во время второго полупериода отрицательное напряжение подается на катод второго п.ф. при заземленном аноде (авторское свидетельство № 1026439 СССР "Гибридный термоядерный источник энергии", заявка № 3347500 с приоритетом изобретения от 16 октября 1981 г.), решает указанную задачу энергосбережения (разумеется, с некоторой небольшой дополнительной подзарядкой).

В дальнейшем циклы размыкания тока на первом п.ф. и замыкания его на вторую камеру с указанными полярностями могут повторяться с любой частотой, не превышающей частоту разрядного контура. Такие тандемные схемы с двумя камерами п.ф. были предложены ранее другими авторами, правда, для иных целей (см., например, работы [11, 12]). Однако они легко могут быть адаптированы к решению данной проблемы.

Основная сложность выполнения такой задачи заключается в том, что в момент нуля тока напряжение в разрядном контуре достигает максимума и попытка разрыва цепи в это время затруднена возможными пробоями размыкающего промежутка.

Кроме того, во время затухающих колебаний разряда после первого полупериода внутри камеры п.ф. в каждом последующем полупериоде создается относительно низкотемпературная плазма, имеющая свою динамику и воздействующая на стенки камеры и расположенные в ней функциональные материалы и облучаемые образцы. Эта плазма оказывает сглаживающее влияние на произведенные мощные эффекты радиационного воздействия на материал. Однако для ряда приложений желательно иметь установку п.ф., работающую на одном полупериоде колебательного разрядного контура без последующих осцилляций и, соответственно, без долгоживущей низкотемпературной плазмы в прианодном (в зоне мишени) пространстве.

Вообще говоря, такая проблема была уже нами решена [9] при использовании специального режима эксплуатации псевдоразрядников, т.е. с тиратронами типа ТДИ150, применяемыми в установке PF-6 (обеднение плотности носителей иницииру-



Рис. 5. Принципиальная схема питания установки п.ф. с нагрузкой (заглушкой либо камерой п.ф.). C – конденсаторы батареи п.ф.; R_{3ap} – зарядные сопротивления, ограничивающие ток заряда батареи; L – индуктивная нагрузка (например, камера п.ф.); K_1 – основной разрядник-включатель батареи; K_2 – кроубарный разрядник.

ющего разряда в псевдоразряднике). Однако найденный режим эксплуатации псевдоразрядника не был устойчивым.

С целью осуществления такого режима разряда в принудительном порядке нами были проведены эксперименты с новой схемой питания камеры п.ф. Схема содержит кроубарный разрядник и электронную схему задержки, позволяющую включать этот разрядник в заданное время полного разряда. Идея заключается в создании противотока в цепи разряда в нужный момент времени.

Принципиальная схема новой системы питания установки показана на рис. 5. В этой принудительной схеме величина емкости батареи должна удвоиться, если мы хотим сохранить величину разрядного тока. Однако это обстоятельство не сильно влияет на изменение к.п.д. установки. Действительно, при тех же временных параметрах разрядного тока, эффективном (также переменном) напряжении и длительности первого полупериода энергия, циркулирующая в разрядном контуре, E(t) = U(t)I(t)t почти та же, что и в обычной схеме. При этом омические потери для обеих половин батареи в этом полупериоде разряда очень малы по сравнению с указанной величиной, так как основное "изъятие" энергии из контура относится к магнитогидродинамическому движению токовоплазменной оболочки (≈5%) и к преобразованию энергии магнитного поля в ускорение быстрых частиц (также ≈5%). Это примерно равно указанным величинам, имеющим место при обычном разряде.

На первом этапе в качестве индуктивной нагрузки *L* была использована заглушка в коллекторе п.ф., представляющая собой медный цилиндр, диаметр которого равен диаметру камеры п.ф. Заглушка накоротко замыкала две пластины токового коллектора установки. На рис. ба показана обычная осциллограмма напряжения разряда установки, подаваемого на осциллограф с делителя напряжения, в случае, когда кроубарный разрядник не включался. Рис. 66 представляет такую



Рис. 6. Осциллограммы напряжения разряда установки, подаваемого на осциллограф с делителя напряжения, при использовании заглушки в коллекторе п.ф.: **a** – при срабатывании одного коммутатора K_1 ; **б** – при срабатывании коммутатора K_2 с задержкой 4.5 мкс относительно K_1 . Развертка по горизонтали – 2 мкс/деление, чувствительность по вертикали – 2 кВ/деление.



Рис. 7. Осциллограммы напряжения разряда установки, подаваемого на осциллограф с делителя напряжения, при использовании разрядной камеры ПФ-7 и срабатывании коммутатора K_2 с задержкой 4.5 мкс относительно K_1 : **a** – зарядные напряжения $U_1 = 6.7$ кВ, $U_2 = 3.3$ кВ; **б** – зарядные напряжения $U_1 = 6.7$ кВ, $U_2 = 4.3$ кВ. Развертка по горизонтали – 4 мкс/деление, чувствительность по вертикали – 1 кВ/деление.



Рис. 8. Схема токовоплазменных контуров, образующихся в рабочей камере п.ф. после "обрыва тока": $T\Pi K_1$ – в правой части камеры вокруг анода и $T\Pi K_2$ – в левой части камеры у изолятора.

же осциллограмму, но снятую при срабатывании коммутатора K_2 с задержкой 4.5 мкс относительно K_1 и при зарядном напряжении во второй цепи C, равном 2/3 от напряжения, подаваемого в первую цепь. В этих экспериментах собственная индуктивность нагрузки была минимальной — много меньше индуктивности всей внешней электрической цепи, и она составляла порядка нескольких наногенри.

Из сравнения рисунков видно, что при такой схеме системы питания и указанных условиях в разрядном контуре нам удалось практически полностью подавить осцилляции напряжения на на-грузке после первого полупериода разряда.

На втором этапе были проведены эксперименты в соответствии со схемой на рис. 5 при использовании реальной разрядной камеры типа $\Pi \Phi$ -7 и при различных значениях начального напряжения, подаваемого во вторую цепь. В этих экспериментах происходило пинчевание плазмы внутри камеры, а нагрузка оказывалась практически чисто индуктивной, причем изменяющейся во время разряда.

Максимальная величина этой индуктивности достигалась при полном пинчевании плазмы в камере п.ф. и была порядка 30 нГ, причем ее значение было существенно больше величины внешней индуктивности цепи разряда. Полученные осциллограммы приведены на рис. 7.

Согласно приведенным рисункам, желаемый эффект хотя и имеет место, но подавить вторичные осцилляции до такой высокой степени, как в случае с заглушкой, здесь не удается. Это является следствием того факта, что индуктивность нагрузки (плазменный пинч) начинает играть роль индуктивного накопителя и, меняя фазу разряда, подпитывает полный разрядный контур после первого полупериода.

При этом следует отметить, что в камере п.ф. происходит перезамыкание токовых контуров [9], а именно: в момент "особенности тока" (т.е. в период так называемого явления "обрыва тока") и скачка напряжения на пинче до мегаэлектронвольтных значений между верхней кромкой анода и катодом по остаточной плазме происходит вторичный пробой (рис. 8). При этом в правой части камеры п.ф. образуется тороидальная плазменно-токовая структура (токовоплазменный контур $T\Pi K_1$). Здесь и происходит разряд плазменного индуктивного накопителя на нагрузку в виде пинча с характерным временем τ разряда энергии магнитного поля:

$$\tau = L/R$$

где L – индуктивность пинча, а R – его активное сопротивление.

Одновременно левая часть токовоплазменной оболочки ($T\Pi K_2$) "отсоединяется" от правой ча-



Рис. 9. Фотографии образцов монокристалла кремния: исходного (а) и облученных при 7 кВ (б) и 12 кВ (в). Диаметр образцов 28.5 мм.

сти ($T\Pi K_1$), и слабозатухающий колебательный процесс разряда энергии, оставшейся в батарее конденсаторов, продолжается (см. [9]). Этот процесс и фиксируется поясом Роговского, расположенным в нижней части камеры п.ф. (см. рис. 7а и 76 и рис. 8).

Ясно, что наилучшим выходом здесь было бы достижение полного размыкания тока в обоих ключах в конце первого полупериода. Борьба с "внутренним кроубаром", т.е. с образованием вторичных токовоплазменных контуров внутри рабочих камер п.ф., представляется важной задачей, которая может решаться, в частности, путем совершенствования внутренней геометрии их электродов.

Работы по вышеописанным схемам (с размыканием за счет обеднения плотности носителей в псевдоразряднике и принудительным схемам питания с кроубарным разрядником) будут продолжены.

3. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА П.Ф. "ВИХРЬ" В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

3.1. Эксперименты по облучению и анализ образцов

На рис. 9 приведены фотографии, помимо исходного (рис. 9а), двух образцов монокристаллов кремния, облученных импульсными потоками ионов гелия и гелиевой плазмы соответственно в "мягком" (при $q \approx 10^7$ Вт/см², $\tau = 100$ нс) и "жестком" ($q \approx 10^9$ Вт/см², $\tau = 50$ нс) режимах. Число импульсных воздействий в обоих случаях составляло соответственно N = 10 и N = 50.

Эти фотографии иллюстрируют возможности установки по регулировке плотности мощности на поверхности облучаемого образца, что приводит к различной степени повреждаемости поверхности импульсными потоками разной интенсивности — от растрескивания без оплавления (рис. 9б) до полностью оплавленного поверхностного слоя (рис. 9в).

На рис. 10 представлены фотоснимки типичной микроструктуры различных участков поверхности образцов сплава Инконель 718 после ее облучения потоками гелиевой плазмы и быстрых ионов гелия (N = 50). Анализ морфологии облученной поверхности показал, что, наряду с участками поверхностного слоя, которые не претерпели расплавления (рис. 10а), содержатся локальные области со следами затвердевшего расплава, имеющие волнообразный рельеф (рис. 10б).



Рис. 10. Полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии изображения микроструктуры сплава Inconel 718 после воздействия импульсной гелиевой плазмы и ионов гелия ($q \approx 10^7 \text{ Br/cm}^2$, $\tau = 100 \text{ нc}$, N = 50).

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 1 2020



Рис. 11. Локальный рентгеноспектральный анализ частицы (выделенная квадратом область на рис. 10г).

Наличие оплавленных участков указывает на то, что при импульсных разрядах в камере п.ф. имело место неоднородное распределение плотности падающего потока энергии по сечению пучка. Расплавленные в локальных областях облученного сплава очень тонкие поверхностные слои приобретают в жидком состоянии волнообразный рельеф. Он образуется под действием давления на фронте ударной волны, движущейся перед кумулятивной струей высокотемпературной гелиевой плазмы, и фиксируется процессом сверхбыстрой закалки расплава [13, 14].

Похожая ситуация имеет место при воздействии на материал плазменных потоков, характерных для переходных процессов, протекающих на поверхности материалов первой стенки в современных крупномасштабных установках с магнитным удержанием плазмы типа токамака JET [15] и стелларатора Wendelstein 7X [16].

Следует также отметить, что на поверхности облученного сплава присутствует тонкая пленка, представляющая собой, по-видимому, соединения остаточных газов камеры п.ф. с компонентами облучаемого сплава и материалами, испаряемыми в процессе импульсного разряда с конструкционных и функциональных деталей рабочей камеры (визуально пленка имеет в основном синий цвет). В состав пленки, согласно результатам анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии [17], входили ниобий (элемент исходного состава сплава), медь (материал анода) и углерод (элемент примеси рабочего газа). На рис. 10г квадратом выделен участок разрыва в этой пленке.

Включения, присутствующие в структуре исходного сплава, сохраняются и после облучения (рис. 10г и 11). При этом крупные включения на основе ниобия в результате термического травления выявляются более четко. В этих включениях наблюдаются микротрещины, образующиеся под действием термических напряжений, возникающих в поверхностном слое на стадии его охлаждения.

3.2. Оценка эволюции температуры в облученном поверхностном слое сплава

Расчет изменения температуры в поверхностном слое в направлении, перпендикулярном облучаемой поверхности, выполненный в работе [17] для рассматриваемого сплава на основе одномерной модели, описанной в работе [18], показал следующее. При реализованных параметрах эксперимента ($q = 10^7 \text{ Bt/cm}^2$, длительность импульса $\tau = 100$ нс) максимальная температура, достигаемая непосредственно на плоскости облучения, составляла около $T_{\text{пов}} = 1200^{\circ}\text{C}$, т.е. была ниже температуры плавления сплава $T_0 = 1260 - 1320^{\circ}\text{C}$. При возрастании q вследствие флуктуаций до значений ~10⁸ Вт/см² происходило плавление поверхностного слоя, наблюдаемое в локальных областях (рис. 10б). Численные оценки показали, что заметные температурные изменения происходили в очень тонком поверхностном слое, на глубине примерно до $L \approx 100$ нм. В этом слое температура падала от максимальной на поверхности $(T_{\text{пов}} \approx 1200 - 1300^{\circ}\text{C})$ до $T \approx 700^{\circ}\text{C}$ при L = 100 нм. На глубине L = 400 нм температура сплава снижалась ло $T \approx 200^{\circ}$ C.

Таким образом, расчеты показали, что при реализованных условиях облучения сплава Инконель 718 в установке п.ф. "Вихрь" импульсными потоками ионов гелия и гелиевой плазмы радиационно-термические воздействия ограничены очень тонкими поверхностными слоями субмикронного масштаба. Поэтому модифицирование структурного состояния облученного сплава также следует ожидать преимущественно в поверхностных слоях наноразмерной толщины.

4. ВЫВОДЫ

Возможность генерации одновременно мошных потоков высокоскоростной плотной плазмы $c v = (2-3) \cdot 10^7 \text{ см/с и быстрых ионов с энергиями в}$ мегаэлектронвольтном диапазоне, малые времена воздействия (в наносекундном диапазоне) импульсных потоков энергии и относительно большие плотности мощности излучений (до 10¹² Вт/см²) выгодно характеризуют установки п.ф., обладающие относительно дешевым и гибким устройством. по сравнению с классическими ускорителями частиц и плазмы. Установки п.ф. позволяют моделировать процессы, происходящие в термоядерных реакторах (особенно условия, реализующиеся в камерах с инерциальным удержанием плазмы), исследовать физику плазмы, решать прикладные задачи в радиационном материаловедении применительно к проблемам УТС и космической отрасли, в медицине, военной сфере и других направлениях науки и техники. В сравнении с импульсными ядерными реакторами, делящимися материалами и классическими ускорителями эти устройства экологически гораздо более безопасны и недороги.

Введенная в строй в ИМЕТ РАН установка п.ф. "Вихрь" находится на уровне лучших установок этого энергозапаса. Она позволяет решать задачи в указанных фундаментальных и прикладных областях. Существенным преимуществом установки является тот факт, что она обеспечивает работу в весьма широком диапазоне плотности мощности излучения, охватывающем примерно шесть порядков величины. Это делает рассматриваемую установку эффективным инструментом лля тестирования и лиагностики ралиационнотермической стойкости материалов, работающих как в жестком режиме импульсных воздействий потоков энергии в термоядерных реакторах с магнитным и инерциальным удержанием плазмы, так и в более мягком режиме, характерном для изделий аэрокосмической техники.

Применение в данной установке энергосберегающих схем позволило подавить в значительной степени вторичные колебательные процессы в разрядном контуре. Однако работы в этом направлении должны быть продолжены.

5. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию № 007-00129-18-00 при поддержке Международного агентства по атомной энергии (гранты IAEA CRP № 19248 и № 22745), а в части аналитических исследований — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00189).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bernard A., Bruzzone H., Choi P., Chuaqui H., Gribkov V., Herrera J., Hirano K., Krejci A., Lee S., Luo C., Mezzetti F., Sadowski M., Schmidt H., Ware K., Wong CS., Zoita V. // Journal of the Moscow Phys. Soc. 1998. V. 8. № 2. C. 93.
- Gribkov V.A., Banaszak A., Bienkowska B., Dubrovsky A.V., Ivanova-Stanik I., Jakubowski L., Karpinski L., Miklaszewski R.A., Paduch M., Sadowski M.J., Scholz M., Szydlowski A., Tomaszewski K. // Journal of Physics D: Applied. Physics. 2007. V. 40. P. 3592. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/12/008
- Vilémová M., Pala Z., Jäger A., Matějíček J., Chernyshova M., Kowalska-Strzęciwilk E., Tonarová D., Gribkov V.A. // Phys.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 1 2020

Scr. 2016. V. 91. P. 034003. https://doi.org/10.1088/0031-8949/91/3/034003

- Paju J., Väli B., Laas T., Shirokova V., Laas K., Paduch M., Gribkov V.A., Demina E.V., Prusakova M.D., Pimenov V.N., Makhlaj V.A., Antonov M. // Journal of Nucl. Mater. 2017. V. 495. P. 91. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.03.003
- Gribkov V.A., Latyshev S.V., Miklaszewski R.A., Chernyshova M., Drozdowicz K., Wiącek U., Tomaszewski K., Lemeshko B.D // Phys. Scr. 2010. V. 81. P. 035502. https://doi.org/10.1088/0031-8949/81/03/035502
- Gribkov V.A., Miklaszewski R.A., Chernyshova M., Scholz M., Prokopovicz R., Tomaszewski K., Drozdowicz K., Wiacek U., Gabanska B., Dworak D., Pytel K., Zawadka A. // JINST. 2012. V. 7. C07005. https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/07/C07005
- Yurkov D.I., Dulatov A.K., Lemeshko B.D., Golikov A.V., Andreev D.A., Mikhailov Yu.V., Prokuratov I.A., Selifanov A.N. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. P. 1. https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012019
- Gribkov V.A., Dubrovsky A.V., Scholz M., Jednorog S., Karpiński L., Tomaszewski K., Paduch M., Miklaszewski R., Pimenov V.N., Ivanov L.I., Dyomina E.V., Maslyaev S.A., Orlova M.A. // Nucleonika. 2006. V. 51. № 1. P. 55.
- Gribkov V.A., Scholz M., Bochkov V.D., Dubrovsky A.V., Miklaszewski R., Karpinski L., Strzyzewski P., Lee P., Lee S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 2107. https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/15/009
- Gribkov V.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2015. V. 57. № 6. P. 065010. https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/6/065010
- 11. *Mather J.W.* // The Physics of Fluids. 1965. V. 8. P. 366. https://doi.org/10.1063/1.1761231
- Lee J.H., McFarland D.R., Hohl F. // The Physics of Fluids. 1977. V. 20. P. 313. https://doi.org/10.1063/1.861869
- Pimenov V.N., Maslyaev S.A., Ivanov L.I., Dyomina E.V., Gribkov V.A., Dubrovsky A.V., Scholz M., Miklaszewski R., Ugaste Yu.E., Kolman B. // Nukleonika. 2006. V. 51. № 1. P. 71.
- Грибков В.А., Демин А.С., Демина Е.В., Дубровский А.В., Масляев С.А., Пименов В.Н., Прусакова М.Д., Сасиновская И.П., Шольц М., Карпинский Л. // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 4. С. 5.
- 15. http://www.ccfe.ac.uk/jet.aspx
- 16. http://www.ipp.mpg.de/16900/w7x
- Боровицкая И.В., Грибков В.А., Григорович К.В., Демин А.С., Масляев С.А., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Спрыгин Г.С., Цепелев А.Б., Гусаков М.С., Логачев И.А., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. // Металлы. 2018. № 5. Р. 39.
- Морозов Е.В., Демин А.С., Пименов В.Н., Грибков В.А., Рошупкин В.В., Масляев С.А., Латышев С.В., Демина Е.В., Казилин Е.Е., Кольцов А.Г., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 4. Р. 5.