

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

© 2022 г. Н. П. Бобырь^а, Е. Д. Казаков^{а, б, *}, Д. И. Крутиков^а,
А. А. Курило^а, М. Ю. Орлов^а, А. В. Спицын^а, М. Г. Стрижаков^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

^бНациональный исследовательский университет МЭИ,
ул. Красноказарменная 14, Москва, 111250 Россия

*E-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

Поступила в редакцию 28.06.21 г.

После доработки 12.07.21 г.

Принята к публикации 19.07.21 г.

Проведено экспериментальное исследование воздействия сильноточных релятивистских электронных пучков на образцы из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181. В экспериментах применялся комбинированный (молибден и сталь) катод, позволивший минимизировать осаждение катодной плазмы на исследуемые материалы. Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе “Кальмар” при средней энергии в импульсе $E \approx 100$ Дж. Были проведены серии из 1, 3, 6 и 10 импульсов срабатывания ускорителя для каждого материала. Получены зависимости уноса массы от числа импульсов. Проведено микроскопическое исследование облученных образцов.

Ключевые слова: Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом, релятивистские электронные пучки, конструкционные материалы, поликристаллический вольфрам, ферритно-мартенситная сталь

DOI: 10.56304/S2079562922010092

ВВЕДЕНИЕ

В установках, где осуществляется удержание высокотемпературной плазмы возможно возникновение нештатных ситуаций, приводящих к попаданию плазмы или пучков частиц на стенку камеры. Подобные импульсные воздействия с суммарным энерговыделением до сотен джоулей на квадратный сантиметр и весьма значительными потоками мощности, разрушают внутрикорпусные материалы (см. например [1–3]).

В данной работе проведено исследование разрушения образцов из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при воздействии высокоэнергетичного электронного пучка на сильноточном ускорителе электронов “Кальмар”, до этого успешно применявшемся для изучения стойкости полимерных и композитных материалов к мощным потокам ионизирующего излучения [4, 5]. В настоящее время исследуемые поликристаллический вольфрам и сталь ЭК-181 рассматриваются в качестве кандидатов на роль материалов первой стенки мощных плазменных установок, в

связи с чем, получение данных об их стойкости к мощному импульсному воздействию является важной и актуальной задачей. Преимуществом установки “Кальмар”, кроме относительной простоты и возможности сравнительно быстро осуществлять подготовку к экспериментам, является оснащённость диагностикой, позволяющими регистрировать уровень воздействия и влияние различных факторов [6, 7]. Диагностический комплекс можно разделить на две основные части: диагностика параметров пучка и комплекс оптической диагностики для исследования динамики плазмы, ударно-волновых и откольных процессов при облучении образцов.

Оптический диагностический комплекс позволяет регистрировать динамику плазмы в собственном свете, а также использовать методы теневых и шлирен фотография. Регистрация изображений осуществляется с помощью электронно-оптической камеры, работающей в хронографическом режиме. Также с помощью теневых методов можно исследовать процессы, приводящие к отколу части задней поверхности образцов.

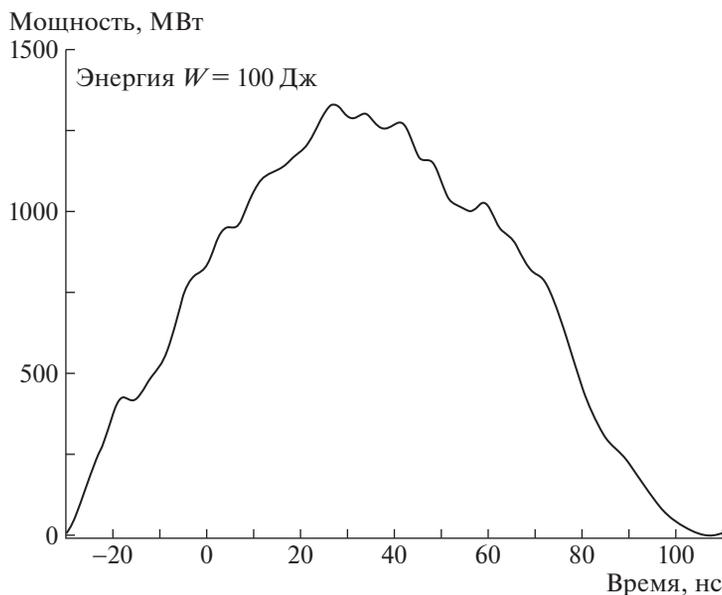


Рис. 1. Характерный ход мощности электронного пучка на установке “Кальмар”.

Для прозрачных материалов реализована возможность исследования распространения ударных волн в лазерной тени [6].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Основным элементом установки “Кальмар” является двойная формирующая линия (ДФЛ) с коаксиальным трансформатором, питается от генератора импульсных напряжений (ГИН), который состоит из конденсаторов, купоросных резисторов и воздушных разрядников [8]. Коаксиальный трансформатор оканчивается вакуумным диодом, в промежутке которого находятся мишень (анод) и катод, закрепляемый на резьбовом соединении. Перед вакуумной камерой диода на установке расположен низкоиндуктивный шунт из фольги для измерения тока. Напряжение определяется по показаниям высоковольтного емкостного делителя смонтированного в корпусе установки. Для определения размера области взаимодействия пучка с мишенью применяется камера обскура с расширенным динамическим диапазоном [9] для оценки области взаимодействия пучка с мишенью. Сам процесс взаимодействия электронного пучка с мишенью дополнительно контролируется с помощью калиброванного рентгеновского дозиметра, регистрирующего тормозное рентгеновское излучение. Плазма регистрируется в зазоре между электродами через диагностические окна вакуумной камеры диода. Электрическая длина линии — 70 нс; ГИН собран по схеме Аркадьева—Маркса.

Ранее было продемонстрировано, что при применении электронных ускорителей с взрывоэмиссионными катодами для исследования радиационной стойкости тугоплавких конструкцион-

ных материалов необходимо минимизировать распыления катодного вещества, чтобы предотвратить осаждение испаренного материала катода на поверхности исследуемых образцов [10]. В рассматриваемых экспериментах использована оригинальная конструкция составного катода из молибдена и нержавеющей стали, обеспечивающая низкий уровень испарения катодного вещества при сохранении достаточного уровня механической надежности.

Исследовались образцы размером $10 \times 10 \times 1$ мм³ из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (RUSFER). Ускоритель был настроен на режим низкоэнергетичного пучка, обеспечивая напряжение в диодном зазоре (а соответственно и энергию электронов) 150–200 кэВ. По оценке при таких условиях средний пробег электронов в образцах составлял порядка 100 мкм, а основная энергия выделялась в приповерхностном слое.

Образцы устанавливались в отверстие, расположенное в центре анодной пластины диодного узла, перед этим исследуемые материалы закреплялись на молибденовой подложке. Зазор между электродами в данном случае составлял 10 ± 1 мм.

Суммарное поток энергии за одно срабатывание установки составляло 100 ± 20 Дж/см². По каждому образцу было совершено 1, 3, 6 и 10 “выстрелов”. Типичный график зависимости хода мощности электронного пучка в одном выстреле представлен на рис. 1. Ход мощности вычислялся по измерениям тока и напряжения в вакуумном диоде. Энергия, переданная образцу в одном импульсе, определялась как интеграл мощности по времени.

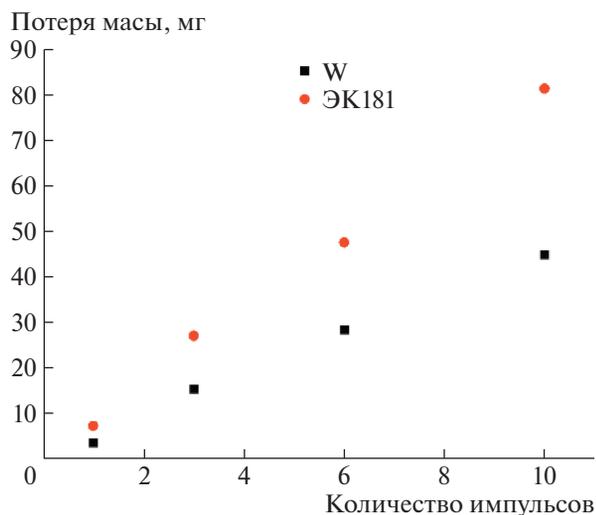


Рис. 2. Зависимость унесенной с образца массы от числа облучений.

До и после облучения масса образцов измерялась с помощью прецизионных цифровых весов AND с точностью 0.1 мг. На рис. 2 представлена зависимость унесенной массы от количества облучений. Для исследованного диапазона зависимость близка к линейной.

Облученные образцы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VERSA (FEI, USA). Изображения получали во вторичных и обратно рассеянных электронах при различных увеличениях, при 0° и, в ряде случаев, при 52° к электронной колонне. На образце выбирались три рассматриваемые области.

Ранее в работе [10] было продемонстрировано, что при однократном облучении на поверхности образцов из ферритно-мартенситной стали появлялось небольшое количество микротрещин протяженностью порядка 10 мкм и субмикронной толщены. На рис. 3 представлены микрофотографии стали ЭК-181 после трехкратного облучения. Растрескивание на поверхности образцов отсутствует, что вероятно обусловлено ее заплавлением. При этом наблюдается типичная для мощных тепловых нагрузок капельная эрозия и переосаждение материала образца [1].

Эти эффекты усиливаются при десятикратном облучении, как видно из микрофотографий на рис. 4.

Элементный анализ поверхности демонстрирует, что даже при 10 кратном облучении количество напыленного молибдена весьма незначительно (<1% по количеству атомов).

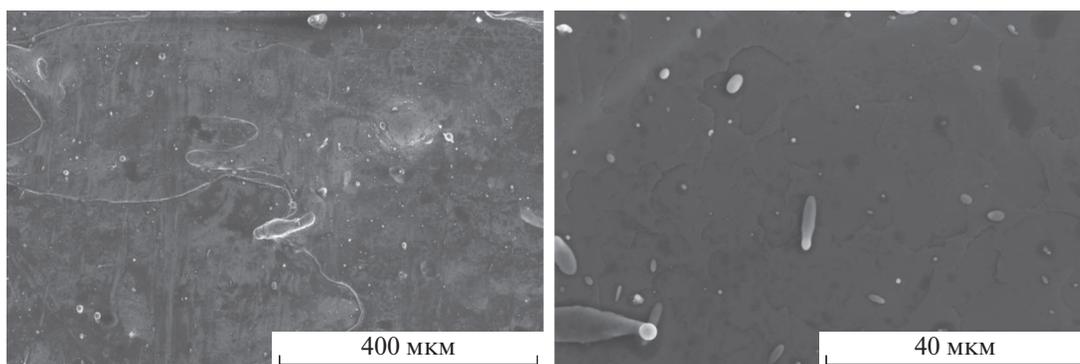


Рис. 3. Микрофотографии образцов стали ЭК-181 после 3-х кратного облучения.

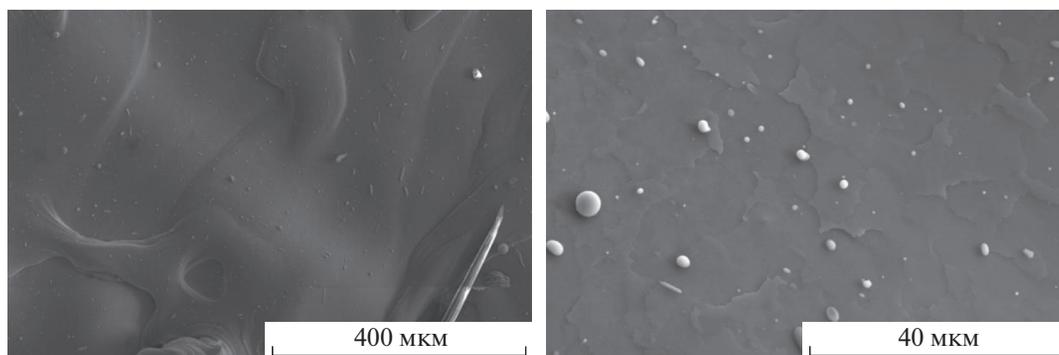


Рис. 4. Микрофотографии образцов стали ЭК-181 после 10-ти кратного облучения.

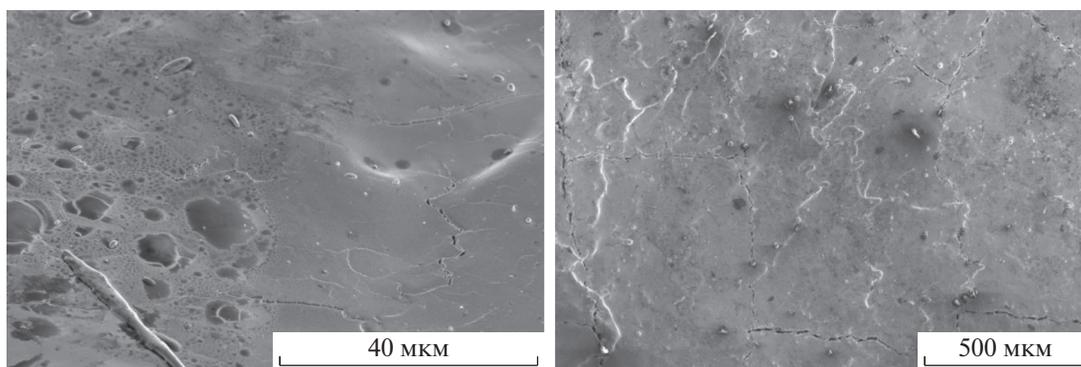


Рис. 5. Микрофотографии образцов поликристаллического вольфрама после 3-х кратного (а) и 10-ти кратного (б) облучения.

В то же время, как видно из микрофотографии, представленной на рис. 5а, на образцах из вольфрама уже при трехкратном облучении наблюдается значительное растрескивание поверхности с протяженностью трещин на уровне десятков микрометров. При этом после десяти облучений поверхность покрывается трещинами миллиметровой протяженности (рис. 5б) шириной до 10 мкм. Растрескивание образцов также сопровождается капельной эрозией.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные микроскопические исследования не выявляют наличия трещин на поверхности (возможно частичное или полное заплывание) на стали ЭК-181. Что само по себе не исключает возможности их развития – в дальнейшем будет проведено исследование объемной структуры материала. Отметим, что сталь ЭК-181 склонна к низкотемпературному охрупчиванию и ее свойства сильно зависят от технологического процесса термической обработки (ТО). Оптимально подобранный режим ТО может снизить порог хладноломкости [11]. Добавим, что в работе [11] отмечается рост температуры хрупко-вязкого перехода при радиационных воздействиях у данной стали. Это свойство играет, возможно, более заметную роль в “быстрых” реакторах, нежели в мощных плазменных установках, но его так же необходимо учитывать. Температуру хрупко-вязкого перехода возможно снизить при подборе ТО.

На поверхности образцов из вольфрама микротрещины видны уже после первых импульсов. Принимая во внимание технологию изготовле-

ния и высокую температуру плавления вольфрама, наблюдаемые поверхностные явления представляются вполне логичными и хорошо коррелирует с другими подобными исследованиями [1–3].

Обнаружена линейная зависимость унесенной массы с поверхности облучаемых образцов от количества облучений. Линейность соблюдается для обоих исследованных материалов. При этом скорость убыли массы для вольфрама ниже, чем для стали ЭК-181, что объясняется существенной разницей в температуре плавления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 1953 от 29.09.2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Будаев В.П. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5–33.
2. Martynenko Y.V., Budaev V.P., Grashin S.A., Shestakov E.A. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2017. V. 44 (6). P. 182–186.
3. Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I. et al. // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. P. 301.
4. Милёхин Ю.М. и др. // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 159–163.
5. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Курило А.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 2. С. 73–77.
6. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 90–95.
7. Ананьев С.С., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А. и др. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 608–615.
8. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. № 2. С. 101–116.
9. Demidov B.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653. P. 012009.
10. Bobyr N.P. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012066.
11. Тюменцев А.Н. и др. // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 1. С. 52.

Study of Properties of Structural Materials of Powerful Pulsed Plasma Facilities under Extreme Loads

N. P. Bobyr¹, E. D. Kazakov^{1, 2, *}, D. I. Krutikov¹, A. A. Kurilo¹,
M. Yu. Orlov¹, A. V. Spitsyn¹, and M. G. Strizhakov¹

¹National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

²National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

Received June 28, 2021; revised July 12, 2021; accepted July 19, 2021

Abstract—The effect of high-current relativistic electron beams on samples made of polycrystalline tungsten (Goodfellow) and corrosion-resistant ferrite-martensitic steel EK-181 was studied experimentally. In the experiments, a combined (molybdenum and steel) cathode was used, which made it possible to minimize the deposition of the cathode plasma on the materials under study. The experiments were carried out on a Kalmar high-current electron accelerator with an average pulse energy of $E \approx 100$ J. A series of 1, 3, 6, and 10 pulses of accelerator operation were carried out for each material. The dependences of the ablation on the number of pulses were obtained. The microscopic examination of irradiated samples was carried out mass.

Keywords: interaction of ionizing radiation with matter, relativistic electron beams, structural materials, polycrystalline tungsten, ferrite-martensitic steel