

УДК 53.06

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ, КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

© 2024 г. Н. П. Бобырь^a, Е. Д. Казаков^{a, b, c, *}, М. Ю. Орлов^a, А. Р. Смирнова^{a, b, c, **},
А. В. Спицын^a, М. Г. Стрижаков^a, К. А. Сунчугашев^d, С. И. Ткаченко^{a, b, c, e}

^aНИЦ “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bИнститут прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047 Россия

^cМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141701 Россия

^dРоссийский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

^eОбъединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

*e-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

**e-mail: anya4113@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Проведено экспериментальное исследование воздействия сильноточных электронных пучков на образцы из поликристаллического вольфрама и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181, а также численное моделирование процесса взаимодействия пучка с мишенью, в котором энергия электронного пучка поглощается в приповерхностных слоях исследуемых образцов. Эксперименты проводили на сильноточном электронном ускорителе “Кальмар” при средней энергии в импульсе $E \approx 100 \pm 20$ Дж (длительность импульса на полувысоте 100 нс). В ходе экспериментов образцы облучали от одного до десяти раз. При численном моделировании использовали спектры электронов, рассчитанные на основе данных (тока и напряжения в диодном зазоре), полученных в результате электротехнических измерений. Продemonстрировано отличие в характере разрушения вольфрама и стали. Показано, что вольфрам начинает растрескиваться после трех импульсов воздействия с энергией около 100 Дж, что хорошо коррелирует с испытаниями на установках других типов. На стали же незначительное растрескивание наблюдали лишь после 8–10 импульсов воздействия. На поверхности мишени из стали обнаружили многочисленные следы капель оплавления и переосаждения материала мишени. Для обоих материалов оценена удельная величина энергии, которая поглощается в области взаимодействия пучка электронов с мишенью.

Ключевые слова: сильноточные электронные пучки, конструкционные материалы, поликристаллический вольфрам, ферритно-мартенситная сталь, удельный энерговклад, математическое моделирование, метод Монте-Карло, убегающие электроны, мощные плазменные установки, материалы для термоядерных реакторов

DOI: 10.31857/S1028096024090056, EDN: EIPDKJ

ВВЕДЕНИЕ

В установках, в которых осуществляют удержание высокотемпературной плазмы и плазменно-пучковые эксперименты при высоких плотностях токов, могут возникнуть нештатные ситуации, приводящие к попаданию плазмы или пучков частиц на стенку камеры. Подобные

импульсные воздействия с суммарным энерговкладом до нескольких сотен Дж/см² и весьма значительными потоками мощности (вплоть до 10^{10} Дж/см²·с), могут приводить к серьезному повреждению материалов стенок используемых установок (например, [1–3]). Значительную опасность для первой стенки (ближайшей к потоку

частиц) мощных плазменных установок могут представлять также пучки убегающих электронов, способные перехватывать значимую долю тока в мощных установках с магнитным удержанием [4]. Электронные пучки даже с умеренной (около 100 Дж) энергией способны приводить к значимому повреждению поверхности первой стенки [5].

Большая часть экспериментальных исследований стойкости первой стенки мощных плазменных установок сконцентрирована на взаимодействии с ней потоков водородной плазмы различной интенсивности [6–9]. В то же время, было продемонстрировано, что пучки электронов с энергией от сотен кэВ и, соответственно, пробегом порядка 10 мкм в веществе, могут приводить к повреждениям и разрушениям материала [10–12], не наблюдаемым при других способах воздействия [13], а также к возникновению эффектов, обусловленных переносом большого заряда за короткие промежутки времени — порядка 100 нс [14].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования разрушения образцов, изготовленных из поликристаллического вольфрама (фирмы Goodfellow) и коррозионностойкой ферритно-мартенситной стали ЭК-181, при воздействии высокоэнергетичного электронного пучка, сформированного на сильноточном ускорителе электронов “Кальмар” [15]. Также представлены результаты моделирования взаимодействия сильноточного электронного пучка с образцами.

В настоящее время исследуемые поликристаллический вольфрам и сталь ЭК-181 рассматривают в качестве кандидатов на роль материалов первой стенки мощных плазменных установок, в связи с чем, получение данных об их стойкости к мощному энергетическому и динамическому импульсным воздействиям является актуальной задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводили на сильноточном ускорителе “Кальмар”. Установка обеспечивает возможность варьирования: тока — от 10 до 40 кА, напряжения — в диапазоне 100–350 кВ; длительность импульса электронного пучка на полувысоте ~ 100 нс. Преимуществом установки “Кальмар”, кроме относительной простоты и возможности сравнительно быстро осуществлять подготовку к экспериментам, является оснащённость средствами диагностики, позволяющими регистрировать временные зависимости тока электронного

пучка и напряжения на диоде, а также определять размер области взаимодействия пучка с образцом; с помощью полупроводникового дозиметра СКД1-02 можно регистрировать временную зависимость мощности тормозного рентгеновского излучения. Также установка оснащена системой хронографического лазерного зондирования, позволяющей определять скорость разлета плазмы с поверхности мишени [16, 17]. Диагностический комплекс можно разделить на две основные части: диагностику параметров пучка и комплекс оптической диагностики для исследования как динамики плазмы в диодном промежутке, так и ударно-волновых и откольных процессов, происходящих в образцах при их облучении сильноточным пучком электронов.

Исследовались образцы размером $10 \times 10 \times 1$ мм из поликристаллического вольфрама (Goodfellow) и ферритно-мартенситной коррозионностойкой стали ЭК-181 (RUSFER). Ускоритель был настроен на режим генерации низкоэнергетичного пучка, что обеспечило 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.

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

Суммарный поток энергии, попадающий на поверхность образца за один импульс, составлял 100 ± 20 Дж/см²; для изучения влияния многократного воздействия пучка для каждого образца было совершено 1, 3, 6 и 10 актов облучения. Типичный график временной зависимости мощности электронного пучка в одном выстреле представлен на рис. 1. Мощность вычисляли по измеренным временным зависимостям тока и напряжения в вакуумном диоде. Энергию, переданную образцу в одном импульсе, определяли как интеграл мощности по времени.

Поверхность облученных образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VERSA (FEI, USA). Изображения получали в режимах регистрации вторичных и обратно рассеянных электронов при различном увеличении. Было продемонстрировано, что уже после трехкратного воздействия на поверхность вольфрамового образца, кроме зон с характерными размерами от ~ 1 до ~ 10 мкм, в которых происходило плавление, существуют отдельные трещины длиной до ~ 10 мкм, шириной ~ 0.2 мкм

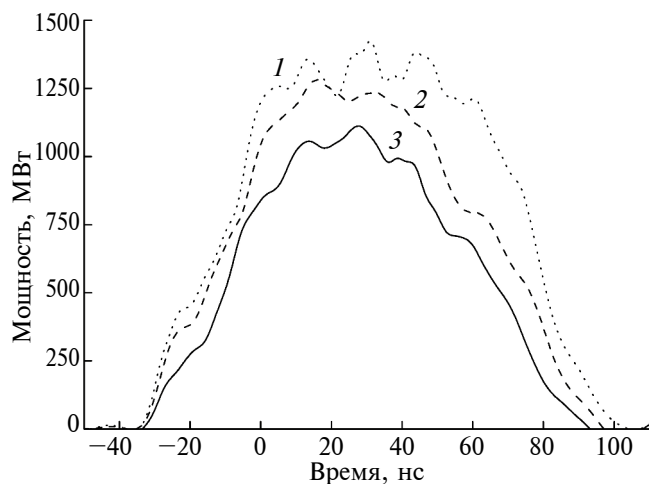


Рис. 1. Типичная временная зависимость мощности пучка электронов с энергией 120 (1); 100 (2) и 80 Дж (3), облучающего образец.

(рис. 2а) а при десятикратном воздействии ширина трещин достигает ≈ 4 мкм (рис. 2б). На рис. 2а видно, что после трехкратного воздействия формируется сеть трещин общей протяженностью более 100 мкм.

В то же время на поверхности образца, изготовленного из стали, трещины шириной ≈ 0.5 мкм появляются только после восьми воздействий пучком. На рис. 3 приведены изображения поверхности образца из стали после 6 (рис. 3а) и после 10 актов облучения (рис. 3б). На поверхности наблюдали также перекрывающиеся друг друга области оплавления с неровными краями, в которых при повторных воздействиях пучков происходят повторные процессы плавления—рекристаллизации, соответственно, область покрывается впадинами, горбами и пузырями. На поверхности появляются также капли переосажденного вещества размером до 3–5 мкм.

Появление трещин на поверхности образцов может быть связано с возникновением в области

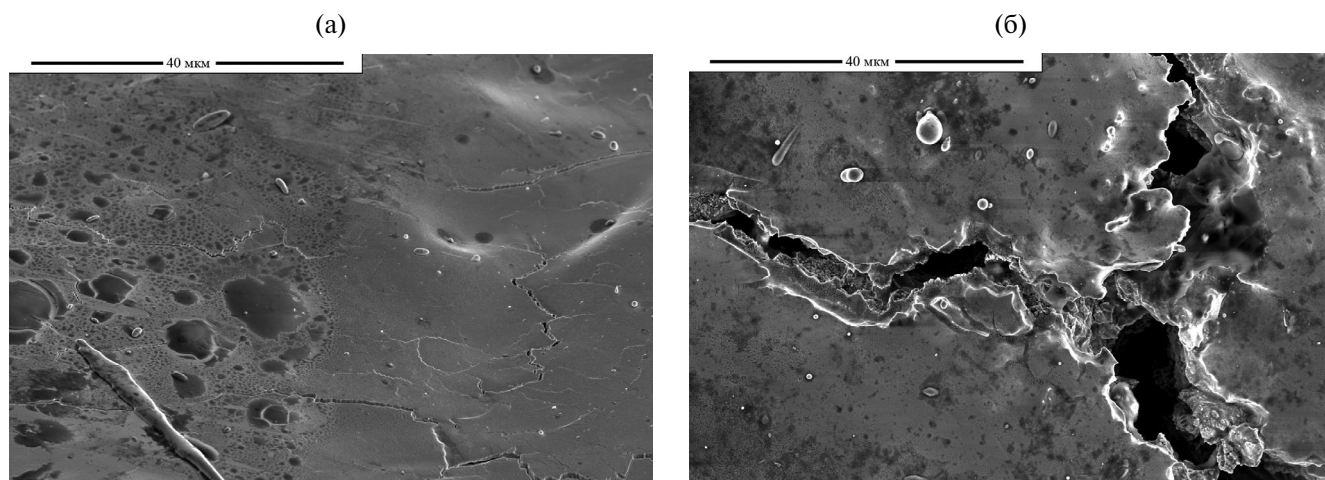


Рис. 2. Изображения поверхности мишеней из вольфрама после 3 (а) и 10 (б) воздействий пучка электронов.

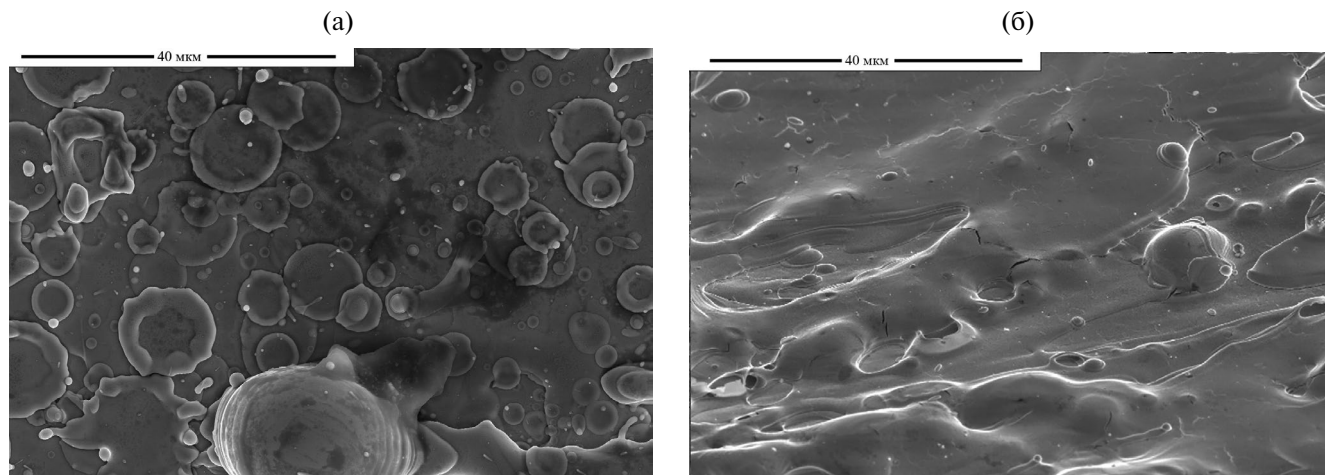


Рис. 3. Изображения поверхности мишеней из стали после 6 (а) и 10 (б) воздействий пучка электронов.

воздействия пучка достаточно высоких растягивающих давлений — на уровне 1 ГПа [18]. При скорости деформации $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$, соответствующей характерным временам, которые наблюдали экспериментально, откольная прочность вольфрама составила $1.4 \pm 0.1 \text{ ГПа}$ [19], стали ЭК-181 — $3.6 \pm 0.3 \text{ ГПа}$ [20]. Такой разницей в прочности при растяжении исследуемых материалов и можно объяснить тот факт, что на поверхности образцов, изготовленных из стали, признаки разрушения (трещины) появлялись после воздействия на них большего количества импульсов сильнотоочного электронного пучка, чем в опытах с вольфрамовыми образцами.

Также провели взвешивание образцов на прецизионных весах для определения потерь массы образцом в зависимости от количества импульсов облучения. Было продемонстрировано, что при использовании молибденового катода потери массы линейно возрастают с увеличением числа выстрелов как в случае мишени, изготовленной из стали: от (7.4 ± 0.1) до (81.4 ± 0.1) мг, так и из вольфрама — от (3.7 ± 0.1) до (45.0 ± 0.1) мг [5].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование процессов поглощения энергии, происходящих в экспериментах по облучению поверхности мишеней, изготовленных из стали и вольфрама, сильнотоочным пучком электронов проводили с помощью программы расчета линейных характеристик полей электронов, позитронов и γ -квантов. Расчет производили методом Монте-Карло с помощью программы “Каскад” [21] в неоднородной среде, представляющей собой цилиндр, разбитый на однородные по составу зоны различных радиусов и толщины. Применяли два основных метода расчета полей электронов: модель отрезков [22] и модель катастрофических столкновений [23]. Для моделирования пробега между катастрофическими столкновениями использовали алгоритмы группировки малых передач энергии для электронов. А рождение вторичных заряженных частиц и квантов моделировали так же, как в модели катастрофических столкновений, представленной в [24].

Во всех расчетах диаметр пучка принимали равным 1 см. Начальные координаты электронов в плоскости катода моделировали с помощью выбора случайных чисел с нормальным распределением вероятности. Начальные энергии электронов задавали случайным образом в диапазоне значений 0–0.2 МэВ с вероятностью присвоения конкретного значения энергии, распределенной по Гауссу. Для такого распределения, функцию

зависимости количества электронов от их начальной энергии, масштабированную на максимальное значение количества электронов, аппроксимировали функцией Гаусса. Шаг в распределении электронов по энергии составлял 30 кэВ.

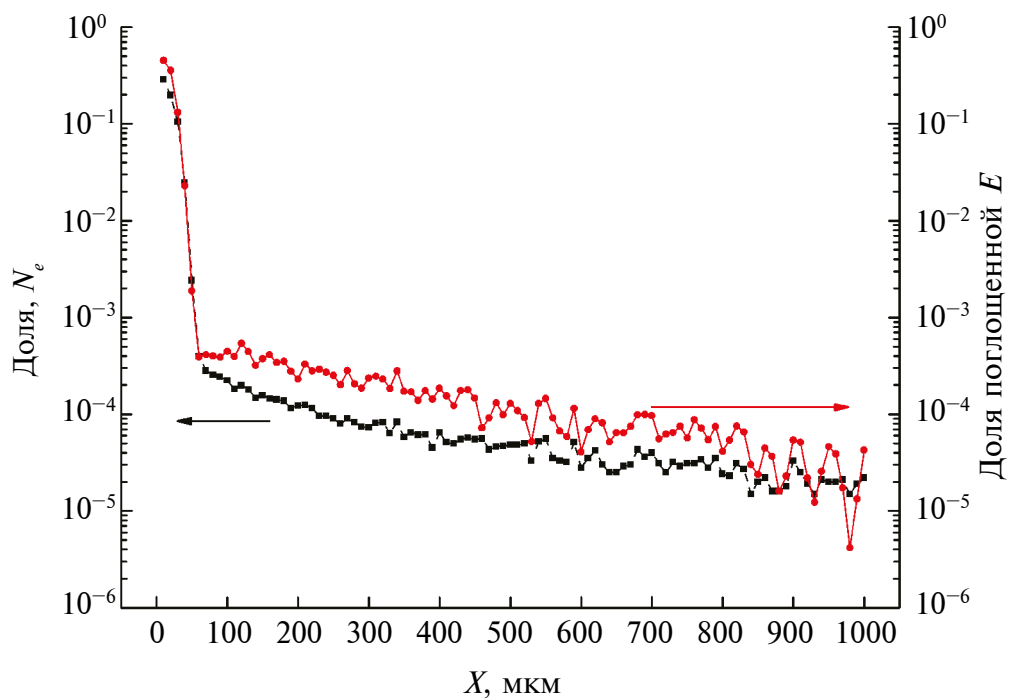
Были рассчитаны зависимости процентного соотношения поглощенной образцом энергии в зависимости от энергии всего пучка, а также процентного соотношения количества электронов, энергия которых опустилась ниже порога (0.01 МэВ) прослеживания (т.е. фактически поглощенных материалом мишени электронов), в зависимости от глубины прохождения электронов внутри мишени. На рис. 4 представлены графики указанных зависимостей для мишеней, изготовленных из стали (рис. 4а) и вольфрама (рис. 4б).

Можно отметить, что основное поглощение энергии пучка (более 96% — сталь, более 98% — вольфрам) происходит в поверхностном слое мишени толщиной 100 мкм; большая часть энергии первичных электронов (более 61% — сталь, более 94% — вольфрам) опускается ниже порога прослеживания в этом слое. В связи с этим наиболее интересной областью для изучения процесса выделения энергии пучка в мишени, является тонкий приповерхностный слой, для которого был произведен отдельный расчет. На рис. 5 представлены графики, показывающие долю электронов, энергия которых опустилась после взаимодействия с образцом ниже порога прослеживания, и долю поглощенной энергии в приповерхностной области мишени толщиной 100 мкм.

Также в ходе анализа результатов расчетов было отмечено, что взаимодействие гамма-квантов приводит к появлению вторичных электронов внутри мишени. Это объясняет наличие электронов на рис. 4, энергия которых ниже порога прослеживания, на расстояниях от поверхности мишени, больших, чем пробег электронов в соответствующих материалах. На рис. 5 видно, что вклад энергии электронов на глубине более 60 мкм стальной и более 50 мкм в вольфрамовой мишенях достаточно мал по сравнению с вкладом энергии пучка, взаимодействующего с поверхностью мишени.

Приведенные расчеты позволяют оценить удельный вклад энергии пучка электронов в отдельном импульсе облучения мишени пучком. Так, с учетом того, что для вольфрама более 99% энергии пучка поглощается слоем образца толщиной приблизительно 30 мкм, удельный вклад энергии в таком поверхностном слое составляет приблизительно $(1.0 \pm 0.3) \times 10^6 \text{ Дж/кг}$.

(а)



(б)

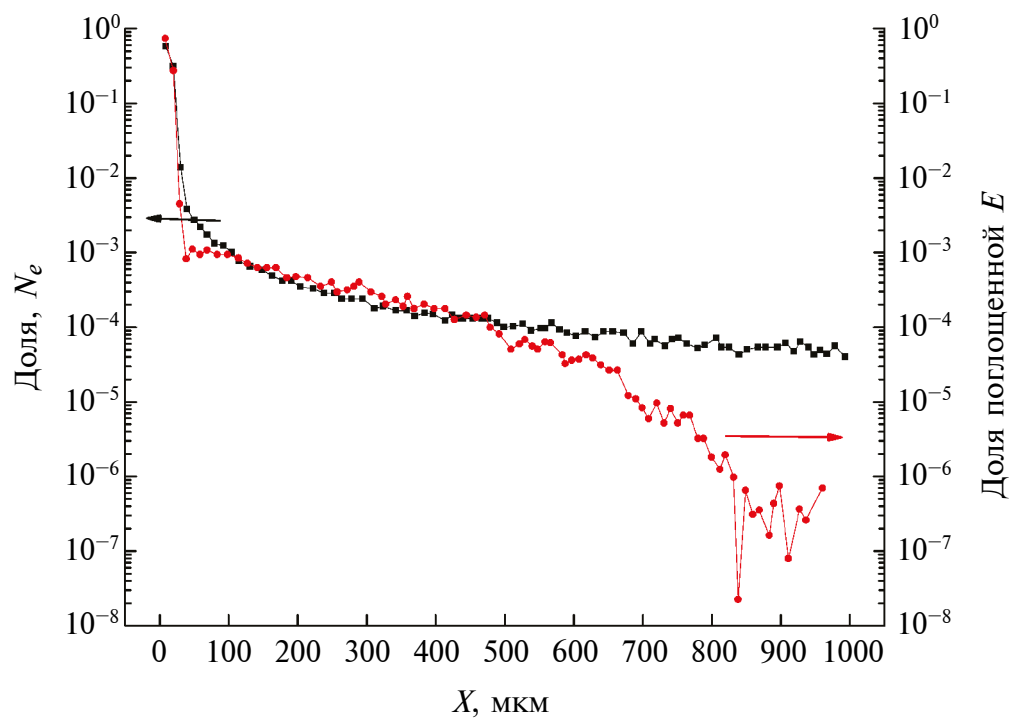


Рис. 4. Доля электронов N_e , энергия которых опустилась ниже порога прослеживания после взаимодействия с мишенью, и доля поглощенной мишенью энергии пучка E в зависимости от расстояния до облучаемой поверхности мишени X в образцах из стали (а) и вольфрама (б) толщиной 1 мм.

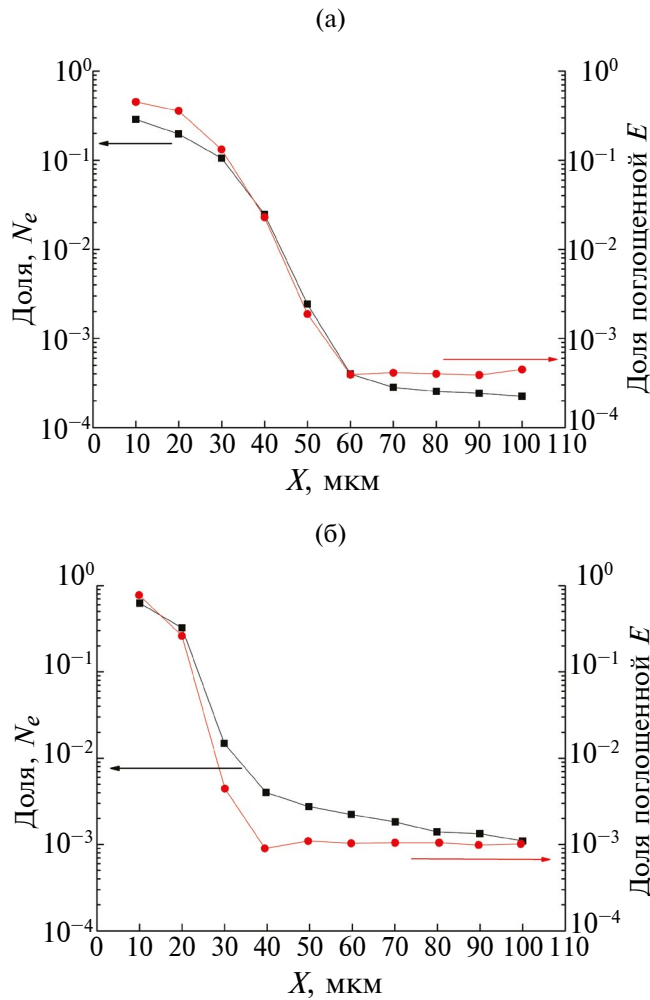


Рис. 5. Доля электронов N_e , энергия которых опустилась ниже порога прослеживания после взаимодействия с мишенью, и доля поглощенной мишенью энергии пучка E в зависимости от расстояния до облучаемой поверхности мишени X в приповерхностном слое толщины 100 мкм образцов из стали (а) и вольфрама (б).

Для мишени, изготовленной из стали, можно сделать аналогичную оценку, с учетом того, что при прохождении пучком 40 мкм по глубине мишени поглощается более 95% энергии пучка электронов. Таким образом, удельный вклад энергии в этом слое составит приблизительно $(3.0 \pm 0.6) \times 10^6$ Дж/кг. Полученные значения удельной энергии на порядок больше удельной теплоты плавления вольфрама (0.19×10^6 Дж/кг) и стали (0.08×10^6 Дж/кг) и в несколько раз меньше удельной теплоты сублимации (4.68×10^6 и 7.43×10^6 Дж/кг соответственно). Поэтому в зоне взаимодействия с пучком электронов небольшая доля вещества испаряется, на большей части области взаимодействия поверхность оплавляется.

Согласно проведенным экспериментам, отношение потерь массы с поверхности мишеней из стали и вольфрама примерно равно 2 [5]. С учетом молярных масс стали (56 г/моль) и вольфрама (184 г/моль), можно оценить отношение количества атомов, вылетевших с поверхности мишени, изготовленной из стали (N_{st}), к количеству атомов, вылетевших с поверхности мишени, изготовленной из вольфрама (N_w), в результате воздействия одного импульса облучения $\frac{N_{st}}{N_w} \approx 6.6$. Энергия сублима-

ции одного моля стали — $E_{st} = 350$ кДж/моль, вольфрама — $E_w = 770$ кДж/моль [25]. Тогда отношение энергий, необходимых для сублимации атомов стали и вольфрама с соответствующих поверх-

$$\text{ностей мишеней составит } \frac{E_{st}}{E_w} = \frac{N_{st} 350 \times 10^{-3}}{N_A} : \frac{N_w 770 \times 10^{-3}}{N_A} = \frac{35}{77} \frac{N_{st}}{N_w} \approx 3. \text{ Такое}$$

же соотношение удельных вкладов энергии пучка электронов в приповерхностный слой мишени может быть получена при использовании данных, приведенных выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования эрозии поликристаллического вольфрама и ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при воздействии сильнофокусированного электронного пучка продемонстрировали, что зависимость потери массы образцом от числа воздействий близка к линейной. Из этого можно сделать следующие выводы: величина энерговыделения в отдельных импульсах облучения мишени пучком электронов близка; состояние поверхности мишени в исследуемых режимах не влияет на величину удельного энерговыделения в ее приповерхностном слое, а следовательно, и на потерю массы ее поверхностью. Можно отметить также, что потери массы поверхностью образца из стали примерно в два раза больше потерь массы образцом из вольфрама при однократном воздействии пучком электронов.

В то же время поверхность стали даже после многократного воздействия пучком электронов не имеет трещин, тогда как вольфрам, как показывают исследования методом растровой электронной микроскопии, растрескивается уже после трех воздействий, а после 10 воздействий имеет на поверхности трещины макроскопического масштаба (ширина трещин достигает ≈ 4 мкм). Это может быть обусловлено более чем в два раза меньшим значением откольной прочности у вольфрама в исследуемом диапазоне параметров.

Результаты математического моделирования выделения энергии электронного пучка в ми-

шениях, изготовленных из стали и вольфрама, продемонстрировали, что поглощение энергии электронного пучка происходит в очень тонком приповерхностном слое (≈ 50 мкм). А в случае стали энергия пучка выделяется в приповерхностном слое во многом за счет неупругого отражения значительной части электронов пучка от поверхности материала. В связи с этим можно считать, что воздействие электронного пучка с энергией электронов в диапазоне 100–120 кэВ для стали и вольфрама близко к тепловому. Таким образом, продемонстрировано, что в наших экспериментах могут эффективно моделироваться как воздействие ионизирующего излучения, так и поверхностное тепловое воздействие

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Математическое моделирование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00248).

Эксперименты на установке “Кальмар” проведены в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаев В.П. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 4. С. 5. <https://www.doi.org/10.21517/0202-3822-2015-38-4-5-332>
2. Martynenko Y.V., Budaev V.P., Grashin S.A., Shestakov E.A. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. V. 44(6). P. 182. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335617060070>
3. Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I., Linke J., Loarte A., Merola M., Podkovyrov V., Federici G., Bazylev B., Pestchanyi S., Safronov V., Hirai T., Maynashev V., Levashov V., Muzichenko A. // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. P. 301. <https://www.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.027>
4. Martín-Solís J.R., Loarte A., Lehnen M. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. № 6. P. 066025. <https://www.doi.org/10.1088/1741-4326/aa6939>
5. Бобырь Н.П., Казаков Е.Д., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Спицын А.В., Стрижаков М.Г. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13. № 2. С. 113. <https://www.doi.org/10.56304/S2079562922010092>
6. Посакалов А.Г., Климов Н.С., Гаспарян Ю.М., Огородникова О.В., Ефимов В.С. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. термоядерный синтез. 2018. Т. 41. № 1. С. 23. <https://www.doi.org/10.21517/0202-3822-2017-41-1-23-28>
7. Гаркуша И.Е., Малыхин С.В., Махлай В.А., Пугачев А.Т., Баздырева С.В., Аксенов Н.Н. // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 11. С. 41.
8. Позняк И.М., Сафронов В.М., Цыбенко В.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. термоядерный синтез. 2016. Т. 39. № 1. С. 15. <https://www.doi.org/10.21517/0202-3822-2016-1-15-21>
9. Голубева А.В., Коваленко Д.В., Лиджигорьев С.Д., Барсук В.А., Бобырь Н.П., Медников А.А., Климов Н.С., Хуанг К., Терентьев Д., Ашикава Н., Чернов В.М. // Поверхность. Рентген. синхротрон. и нейтрон. исслед. 2022. № 1. С. 30. <https://www.doi.org/10.31857/S102809602201006X>
10. Демидов Б.А., Мартынов А.И. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. Т. 80. № 2. С. 738.
11. Аккерман А.Ф., Бушман А.В., Демидов Б.А., Ивкин М.В., Ни А.Л., Петров В.А., Рудаков Л.И., Фортнов В.Е. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1986. Т. 91. № 3. С. 1762.
12. Демидов Б.А. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 7. С. 670.
13. Демидов Б.А., Ефремов В.П., Петров В.А., Мещеряков А.Н. // Поверхность. Рентген. синхротрон. и нейтрон. исследования. 2009. № 9. С. 18.
14. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Лавров Г.С., Шереметьев К.Ю. // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 2. С. 88. <https://www.doi.org/10.15372/FGV20220210>
15. Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. с. 101.
16. Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Шереметьев К.Ю., Калинин Ю.Г., Казаков Е.Д., Марков М.Б. // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 159.
17. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И., Курило А.А., Орлов М.Ю., Стрижаков М.Г., Ткаченко С.И., Чукбар К.В., Шапков А.Ю. // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 90. <https://www.doi.org/10.31857/S003281622003009X>
18. Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д. // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 11. С. 1243. <https://doi.org/10.1070/PU1999v042n11ABEN000471>
19. Молодец А.М., Савиных А.С., Голышев А.А., Гаркушин Г.В., Шилов Г.В., Некрасов А.Н. // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 5. С. 554.
20. Павленко А.В., Малюгина С.Н., Майорова А.С., Мокрушин С.С., Казаков Д.Н., Филатов С.Ю. Температурно-скоростные зависимости прочностных характеристик стали ЭК-181. // Труды “Забабахинских научных чтений”. 2019. С. 141.
21. Кириллов А. К., Лаппа А. В., Пляшешников А. В., Шербакова Л. В. Программа расчета методом Монте-Карло электронно-фотонных полей в гетерогенных осесимметричных средах. 80/6 “Каскад”. Челябинск: ЧГУ, 1982.
22. Berger M.J. Methods in Computational Physics. V. 1. New York: Academic Press, 1963. P. 135.
23. Аккерман А.Ф., Никитушев Ю.М., Ботвин В.А. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: Наука, 1972. С. 166.
24. Пляшешников А. В., Кольчужкин А. М. // Атомная энергия. 1976. Т. 41. Вып. 6. С. 415.
25. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Experimental and Numerical Study of Damage Caused by High-Current Electron Beam of Construction Materials Intended for the First Wall of Powerful Plasma Installations

N. P. Bobyr¹, E. D. Kazakov^{1, 2, 3, *}, M. Yu. Orlov¹, A. R. Smirnova^{1, 2, 3, **}, A. V. Spitsyn¹,
M. G. Strizhakov¹, K. A. Sunchugashev⁴, S. I. Tkachenko^{1, 2, 3, 5}

¹NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047 Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research Institute), Dolgoprudny, 141701 Russia

⁴Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia

⁵Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: Kazakov_ED@nrcki.ru

**e-mail: anya4113@gmail.com

An experimental study of the effect of high-current electron beams on crystals made of polycrystalline tungsten and corrosion-resistant ferritic-martensitic steel EK-181 was carried out, as well as a numerical simulation of the process of interaction of the beam with the target, in which the energy of the electron beam is absorbed in the near-surface layers of the samples under study. The experiments are carried out on the Kalmar high-current electron accelerator at an average pulse energy of $E \approx 100 \pm 20$ J (pulse duration at half maximum 100 ns). During the experiments, samples were irradiated from one to ten times. In the numerical modeling, electron spectra were used, calculated on the basis of data (currents and voltages in the diode gap) obtained as a result of electrical measurements. The difference in the nature of destruction of tungsten and steel was demonstrated. It has been shown that tungsten begins to crack after three-pulse exposure with an energy of about 100 J, which correlates well with tests on other types of installations. On steel, minor cracking was observed only after 8–10 pulses of exposure. Numerous traces of droplets of melting and redeposition of the target material were found on the surface of the steel target. For both materials, the specific amount of energy that is absorbed in the region of interaction of the electron beam with the target is estimated.

Keywords: high-current electron beams, structural materials, polycrystalline tungsten, ferritic-martensitic steel, specific energy input, mathematical modeling, Monte-Carlo method, runaway electrons, high-power plasma installations, materials for thermonuclear reactors