

ОПТИМАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ БУДУЩЕГО

О.В. Кривченко, Ю.П. Курило, А.Г. Шепелев

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: shepelev@kipt.kharkov.ua

Представлен наукометрический анализ мировых научных информационных потоков с 1970 по 2010 гг. по проблеме применения вольфрама в перспективных термоядерных реакторах на основе использования автоматизированных Баз Данных “International Nuclear Information System” (INIS) и “Materials Science Citation Index” (MSCI). Построены графики динамики публикаций во времени и их распределение по странам, выяснены типы публикаций и языки.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, материаловедческие проблемы при создании уникальных объектов новой техники являются первостепенными. К международным термоядерным реакторам (ТЯР) ITER, DEMO и др. это относится в полной мере, так как вопросы безопасности и надежности установок с радиацией особенно актуальны после катастроф на АЭС Чернобыля и Фукусимы. Наиболее нагруженной частью ТЯР является дивертор, который служит для вывода тепла, примесей и гелиевой «золы». Для него характерны такие условия работы: импульсные повторяющиеся тепловые нагрузки $5...20 \text{ МВт/м}^2$ (при срыве тока возможен тепловой удар до 140 МДж/м^2), потоки частиц плазмы до $10^{24}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ с энергией до 15 эВ, $\sim 10^{22}...10^{24}$ ионов He/ $(\text{м}^2\cdot\text{с})$ с энергией < 500 эВ, пиковая нейтронная нагрузка на дивертор $\sim 5 \text{ МВт/м}^2$ [1,2].

Вольфрам, имеющий высокую температуру плавления, хорошую теплопроводность, очень высокий порог распыления под действием частиц плазмы и малый захват трития, в последнее время рассматривается как перспективный материал термоядерных реакторов, особенно для тех их частей, где энергия ионов водорода, дейтерия и гелия меньше порога распыления. Тем самым автоматически устраняется сложная проблема «засорения» плазмы нежелательными примесями. Следует сразу отметить многолетний успешный опыт использования вольфрама в термоядерных установках JET [3] и ASDEX Upgrade [4].

Представляло интерес на основе наукометрического анализа Международных автоматизированных Баз Данных International Nuclear Information System (1970-2010 гг., МАГАТЭ) и Materials Science Citation Index (1991-2010 гг., Институт научной информации США) изучить динамику информационных потоков по наиболее опасным факторам, влияющим на работоспособность вольфрама в указанных выше условиях, а также вклад ученых стран, участвующих в этих работах, и виды публикаций.

Напомним, что проект ИТЭР, выполняемый под эгидой МАГАТЭ, ставит своей целью продемонстрировать научную и техническую осуществимость контролируемой реакции синтеза на дейтерий-тритиевой (D-T) топливной смеси. Работа термо-

ядерного реактора основана на реакции синтеза: $D + T \rightarrow \text{He} (3,5 \text{ МэВ}) + n (14,1 \text{ МэВ})$. Поступление трития в камеру ТЯР будет обеспечиваться в результате взаимодействия нейтронного потока, покидающего плазму, с литием, содержащимся в blankets в ходе реакции $n + \text{Li} \rightarrow \text{He} + T$. Такая концепция размножения трития должна обеспечить потребности топлива для будущих крупных ТЯР станций. Для ТЯР будущего – DEMO потребуется 300 г трития ежедневно для производства 800 МВт электрической мощности.

Основные требования к обращенным к плазме материалам (ОПМ) и компонентам установки (ОПК) сводятся к следующему:

- длительное время жизни;
- малое накопление топливного трития (≤ 700 г), что связано как с безопасностью, так и с нежелательностью потерь дорогого топлива;
- стойкость к нейтронному облучению.

С учётом результатов многочисленных модельных экспериментов и на основе длительного опыта работы крупных термоядерных установок JET и ASDEX Upgrade в качестве ОПМ для ИТЭР выбраны Be, C и W. Их назначение: Be – для первой стенки камеры; C – углеродно-волоконистый композит (CFC) для нижней части дивертора – экстремально энергонапряжённого участка; W – для верхней части дивертора и купола, где ожидаемые тепловые нагрузки в ИТЭР будут достигать величины $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$, а температуры – до 3000 °С.

В настоящее время рассматриваются чистый W в рекристаллизованном холоднодеформированном состоянии, сплавы на основе вольфрама (например W-1 % La_2O_3 , W-0.3 % Y_2O_3), плазменно-напылённый в вакууме W (VPS-W) [5]. Но окончательного выбора пока не сделано. Также продолжаются исследования по улучшению свойств вольфрама в виде сплавов: W-Re, W-Ti, W-V, нанодисперсных состояний.

Некоторые параметры установки ИТЭР, относящиеся к проблемам ОПМ [1, 2]:

Площадь поверхности W.....	100 м ²
Мощность внешнего нагрева плазмы....	40 МВт
Выход термоядерной мощности синтеза.	410 МВт
Средняя температура ионов плазмы.....	~ 8,1 кэВ
Мощность α (He)-частиц.....	82 МВт

Пиковая нагрузка нейтронов на дивертор 5 МВт/м²
 Продолжительность импульса ≥ 400 с

Доработку характеристик ОПМ и ОПК конструкционных материалов в условиях, близких к ИТЭР, предполагается произвести в рамках проекта JET ITER-like Wall Project (JILWP) в Великобритании в 2011 г. [6].

НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМА

Вольфрам – тугоплавкий материал с высокой точкой плавления (3680 К), низкой упругостью паров ($1,3 \cdot 10^{-7}$ Па в точке плавления) и хорошей теплопроводностью ≈ 150 Вт/мК при комнатной температуре, которая заметно не падает с ростом температуры. Однако его недостатком является температурное окно (150...400 °С) при переходе из пластичного в хрупкое состояние (DBTT), которое будет вызывать охрупчивание в системе водоохлаждения. Это означает, что высокотемпературный режим работы стенок является более предпочтительным для вольфрама в случае его применения в DEMO.

В ИТЭР использование вольфрама как структурного материала строго ограничено температурным режимом: выше температуры DBTT (т. е. ≥ 600 К) и ниже температурного предела ползучести ≈ 1000 К.

РАСПЫЛЯЕМОСТЬ ВОЛЬФРАМА

На рис. 1 представлены сравнительные данные физического распыления выбранных ОПМ (Be, C, W) для ИТЭР [1].

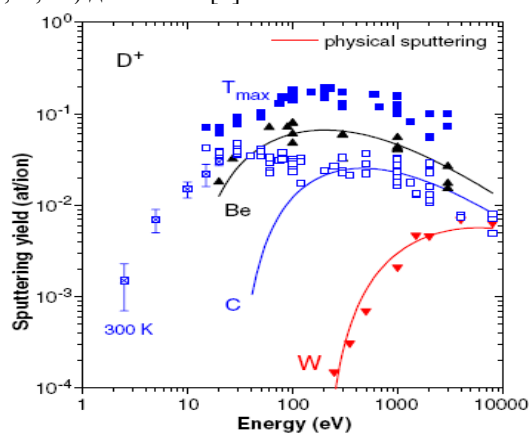


Рис. 1. Зависимость коэффициентов физического распыления Be, C, W от энергии ионов дейтерия

ЭРОЗИЯ. БЛИСТЕРИНГ. ПУЗЫРЬКИ

Эрозия вольфрама обуславливается его распылением, энергетический порог которого для H, D, T равен 447, 209, 136 эВ, соответственно. Кроме того, существенным может оказаться влияние неизбежных собственных примесей (He, Be, C, O) и вводимых искусственно (например, Ne, Ar), для охлаждения засепагатрисной области плазмы. При зарядовом состоянии $Z = 2...4$ они имеют заметно большую энергию ($\sim 3ZkTe$) и соответственно вызывают большую эрозию. Имплантированные ионы He образуют вакансионные комплексы, которые со временем превращаются в пузырьки с захватом изотопов водорода.

На рис. 2–4 показана динамика публикаций, а также вклад стран по проблеме эрозии вольфрама.

Отметим, что в публикациях по проблеме эрозии, кроме стран, представленных на рис. 3, 4 участвовали также: Англия, Китай, Австрия, Литва, Голландия, Швейцария, Италия, Беларусь, Польша, Португалия, Румыния, Канада, Испания, Ирландия, Бельгия, Мексика, Южная Корея, Греция, Израиль, Дания, Литва, Венгрия.

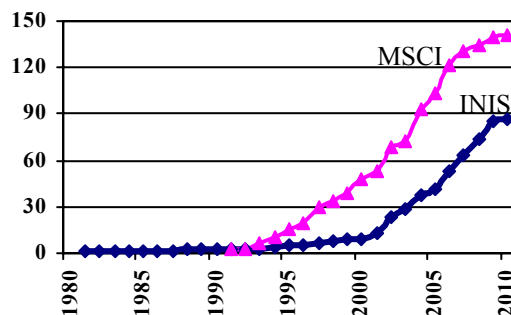


Рис. 2. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме эрозии вольфрама

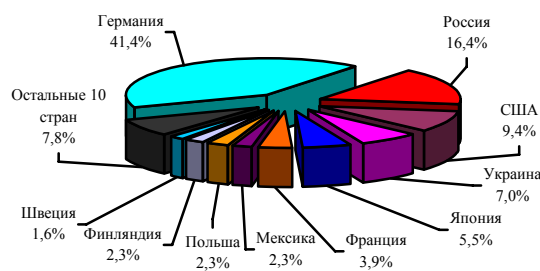


Рис. 3. Распределение публикаций различных стран по проблеме эрозии вольфрама по данным БД INIS

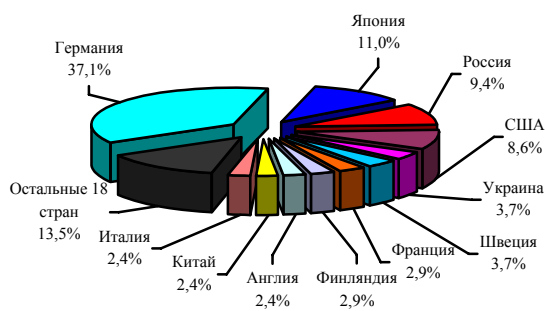


Рис. 4. Распределение публикаций различных стран по проблеме эрозии вольфрама по данным БД MSCI

Преобладающим типом публикаций являются труды конференций (76 %), журналы (23 %). Диссертации и книги занимают всего по 1 % в каждой из БД, соответственно. Основным языком публикаций является английский (~ 99 %).

На рис. 5–7 приведены данные динамики публикаций по проблеме блистеринга вольфрама стран, участвующих в этих исследованиях, а на рис. 8–10 – аналогичные данные по проблеме пузырьков на поверхности вольфрама.

Основным типом публикаций по проблеме блистеров в БД INIS являются труды конференций (66 %), журналы (30 %), а в БД MSCI они составля-

ют – 51 и 49 %. В БД INIS по проблеме пузырьков на поверхности вольфрама – 50 и 46 %, соответственно, а в БД MSCI – 56 и 44 %. Диссертации, отчеты и книги характеризуются несколькими процентами. Основным языком публикаций является английский (~ 90 %).

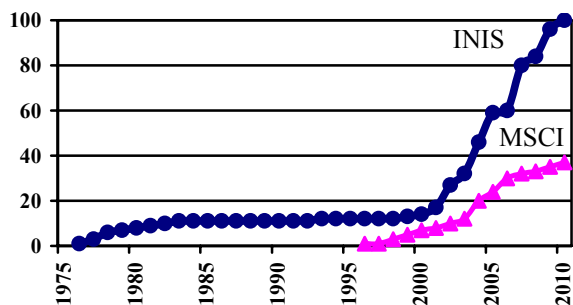


Рис. 5. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме блистеринга вольфрама

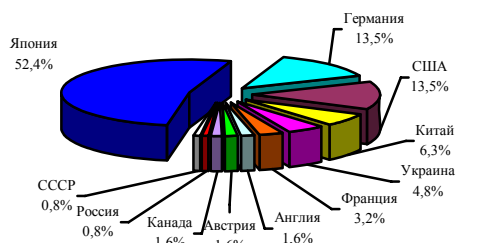


Рис. 6. Распределение публикаций стран по проблеме блистеринга вольфрама по данным БД INIS

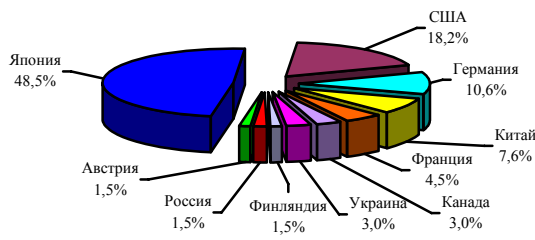


Рис. 7. Распределение публикаций стран по проблеме блистеринга вольфрама по данным БД MSCI

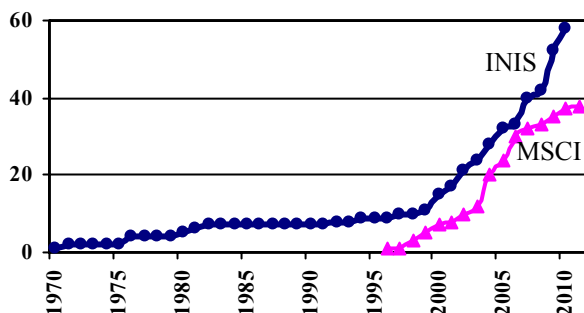


Рис. 8. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме пузырьков на поверхности вольфрама

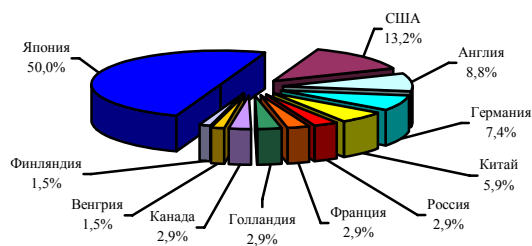


Рис. 9. Распределение публикаций различных стран по проблеме пузырьков на поверхности вольфрама по данным БД INIS

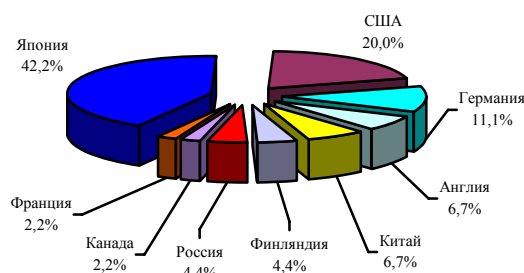


Рис. 10. Распределение публикаций различных стран по проблеме пузырьков на поверхности вольфрама по данным БД MSCI

Отметим, что недавно получены интересные данные о влиянии гелия на блистерообразование при бомбардировке пучком смеси ионов водорода и углерода (0,8...1,0 %) [7]. Установлено, что добавка в пучок 0,1 % гелия существенно снижает количество блистеров при температуре 473 К. Блистерообразование полностью подавляется при 653 и 723 К (рис. 11).

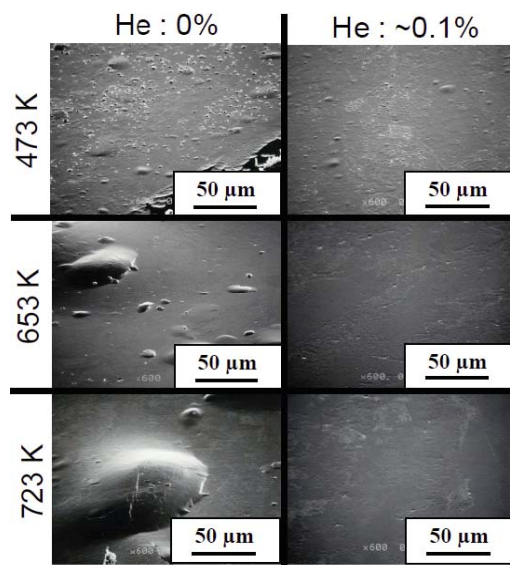


Рис. 11. Температурная зависимость морфологии W, облучённого пучком смеси ионов H, C, He с энергией 1 кэВ. Концентрация C ~ 1,0 %

Схема, поясняющая образование гелиевых блистеров и их «барьерные» свойства для водорода показана на рис. 12.

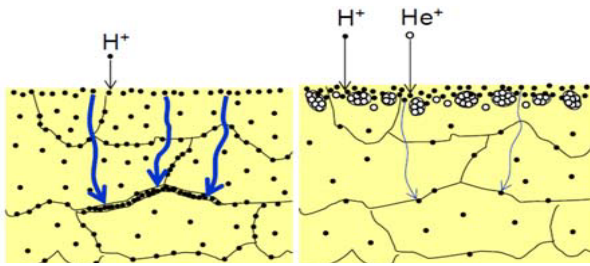


Рис. 12. Влияние пузырьков He на блистеринг W: слева – без пузырьков He; справа – с пузырьками [8]

При бомбардировке гелием при температуре 1000...1500 К образуется пушистая пористая структура масштаба нанометров. При температуре выше 1500 К образуются большие пузырьки, рост которых приводит к формированию перфорированной структуры поверхности [8].

ЗАХВАТ ВОДОРОДА, ДЕЙТЕРИЯ, ТРИТИЯ

На рис. 13–15 показаны результаты информационного анализа по проблеме захвата водорода, а также вклад различных стран в решение этой проблемы.

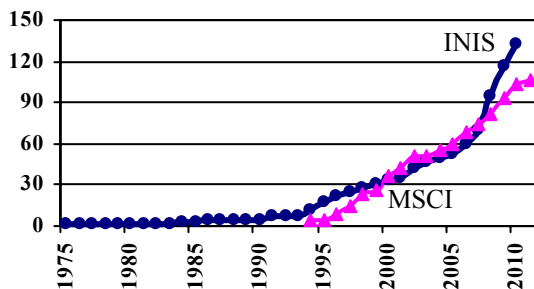


Рис. 13. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме захвата водорода вольфрамом

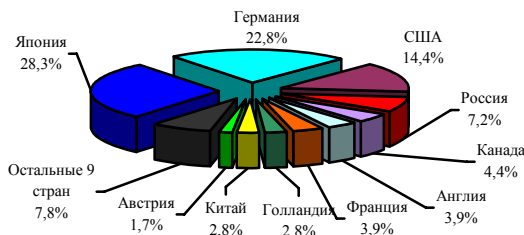


Рис. 14. Распределение публикаций стран по проблеме захвата водорода вольфрамом по данным БД INIS

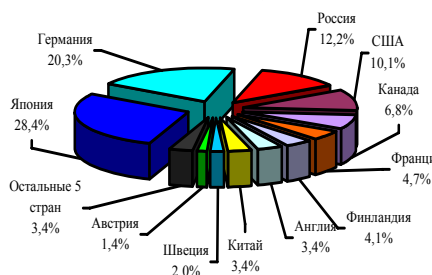


Рис. 15. Распределение публикаций стран по проблеме захвата водорода вольфрамом по данным БД MSCI

Кроме публикаций стран, приведенных на рис. 14, 15, в этих работах участвовали: Бельгия, Италия, Португалия, Финляндия, Румыния, Швеция, Болгария, Испания, Индия, Польша.

Основным типом публикаций по этой проблеме в БД INIS являются труды конференций (60 %), журналы (34 %), а в БД MSCI – они составляют 64 и 36 %. Отчеты и книги в БД INIS составляют 5 и 1 % соответственно. Основным языком публикаций является английский (~ 95 %).

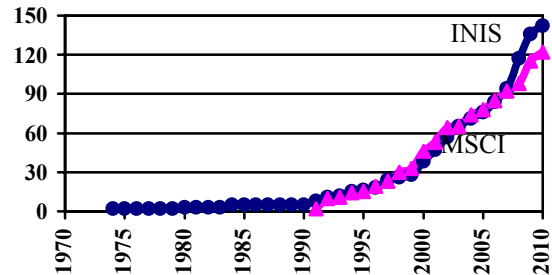


Рис. 16. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме захвата дейтерия вольфрамом

На рис. 16–18 изображены результаты информационного анализа и вклад публикаций участвующих стран по проблеме захвата дейтерия вольфрамом.

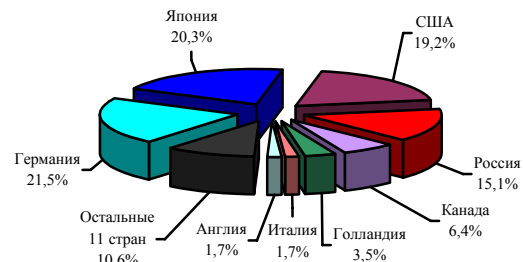


Рис. 17. Распределение публикаций стран по проблеме захвата дейтерия вольфрамом по данным БД INIS

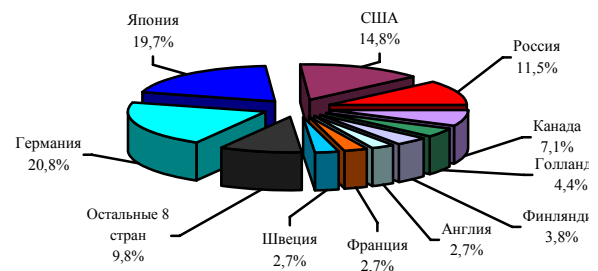


Рис. 18. Распределение публикаций стран по проблеме захвата дейтерия вольфрамом по данным БД MSCI

Кроме публикаций стран, приведенных на рис. 17, 18, в этих работах участвовали: Франция, Финляндия, Австрия, Бельгия, Испания, Швеция, Китай, Польша, Словения, Узбекистан, Португалия, Голландия, Италия, Мексика, Южная Корея.

Основным типом публикаций по проблеме захвата дейтерия в БД INIS являются: труды конфе-

ренций (61 %), журналы (34 %), отчеты (3 %), книги и диссертации – по 1 %. В БД MSCI – труды конференций (63 %), журналы (36 %), книги (1%). Основным языком публикаций является английский (~ 95 %).

Исследования блистерообразования и захвата дейтерия вольфрамом в интервале температур 315...1000 К при флюенсе 10^{26} D/m² показали, что наиболее интенсивное блистерообразование наблюдается при 500 К [9]. Блистеры не обнаружены при T = 1000 К. Результаты исследований по захвату дейтерия при флюенсе 10^{26} D/m² представлены в табл. 1.

Таблица 1

T, K	Захват, D/m ²	Относительный захват
315	$6.4 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
375	$8.7 \cdot 10^{19}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$
480	$3.4 \cdot 10^{20}$	$6.8 \cdot 10^{-6}$
500	$1.9 \cdot 10^{20}$	$3.7 \cdot 10^{-6}$
1000	$1.0 \cdot 10^{19}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$

Интересные сведения о блистерообразовании и накоплении дейтерия в нескольких разновидностях вольфрама:

- 1) фольга f-W толщиной 50 мкм,
- 2) поликристаллический Pc-W с размером зерна ~ 3 мкм,
- 3) рекристаллизованный Re-W с размером зерна 50 мкм,
- 4) вакуумно-плазменно-напылённый VPS-W показали, что для зернистых структур Pc-W и Re-W образование блистеров происходит внутри границ зёрен [10].

Для слоистой структуры f-W характерно образование низкокопальных блистеров, обусловленных накоплением молекул D₂ вдоль слоистой структуры. Для VPS-W характерны пористость и редко разбросанные малые блистеры.

На рис. 19 показаны результаты исследований захвата дейтерия в зависимости от величины флюенса [10]. Видно, что накопление дейтерия происходит без признаков насыщения при указанных условиях эксперимента. Интересным является результат для однородно поцарапанного образца (Pc-W-s).

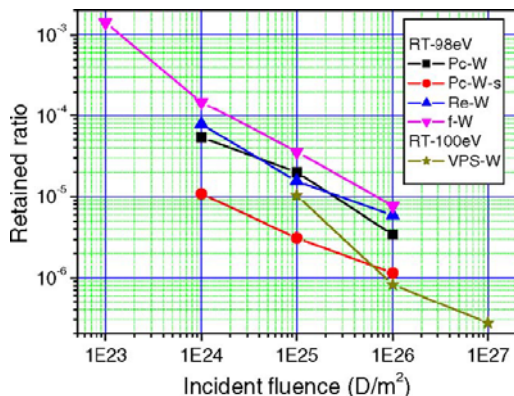


Рис. 20. Относительный захват дейтерия в зависимости от флюенса

На рис. 20 для тех же образцов представлены результаты температурных исследований.

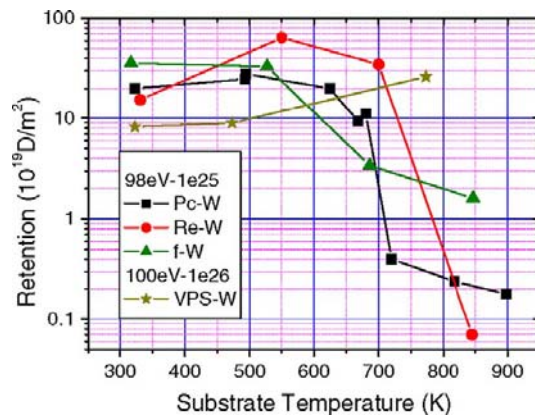


Рис. 20. Захват дейтерия в зависимости от температуры подложки

Захват трития в пересаживаемых слоях эродированного W составляет $\sim 10^{-4}$ по сравнению с С и Ве [9].

На рис. 21 приводятся известные расчётные данные И. Рота [11] динамики захвата трития в материалах, которые могут использоваться в ИТЭР. Следует отметить, что по данным [12] в районе малых энергий даже при большем флюенсе наблюдается меньшее накопление.

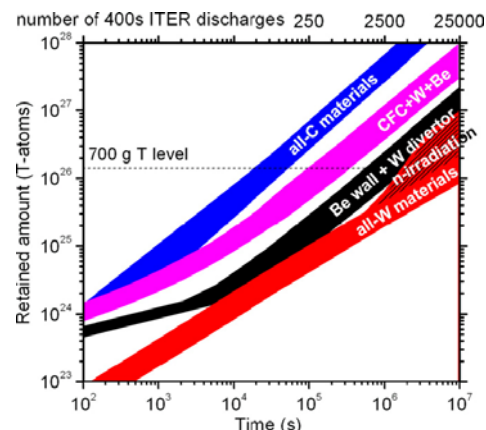


Рис. 21. Оценки захвата трития по мере нарастания количества импульсов длительностью 400 с

Из рис. 1 и 21 виден заметный выигрыш при использовании ОПМ из вольфрама.

ЭФФЕКТЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК. РАСТРЕСКИВАНИЕ

Режим улучшенного удержания плазмы (H-мода) в ИТЭР будет сопровождаться локализованными модами неустойчивости краевой плазмы – ЭЛМами (ELM – Edge Localized Mode), которые представляют собой короткие периодически повторяющиеся импульсы выброса тепла и частиц. При этом тепловая нагрузка на экраны дивертора возрастает на 2...3 порядка. В течение импульса $\sim 0,1...0,5$ мс тепловая нагрузка достигнет величины в пределах $0,5...1,2$ МДж/м². Температура поверхности вольфрама может превысить температуру плавления (3422 °C) – это так называемые ЭЛМы первого типа. В результате воздействия такого теплового удара возникают огромные температурные градиенты, сопровождающиеся температурными напряжениями, образованием расплава поверхностного слоя, рекри-

сталлизацией и неизбежным образованием трещин и пыли. Ослабление действия этого типа ЭЛМов – важная задача в проекте ИТЭР. В последнее время обнаружено, что и при более слабых ЭЛМах второго типа, когда не наблюдается расплавления вольфрама, проблемы остаются. Так при многократных повторяющихся импульсах наблюдалась усталость металла и его растрескивание [13].

На рис. 22–24 приведены данные о динамике информационного потока по проблеме растрескивания, а также вклад стран, участвующих в этих работах.

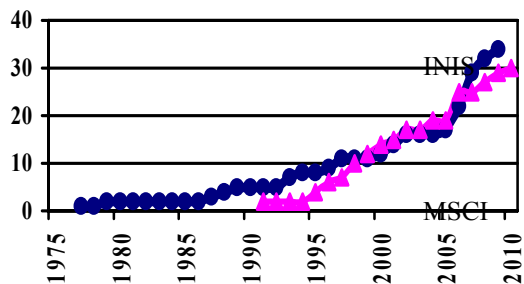


Рис. 22. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме растрескивания вольфрама

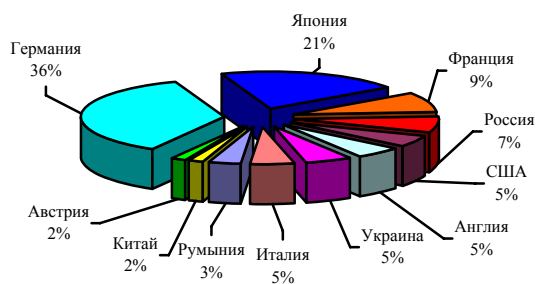


Рис. 23. Распределение публикаций стран по проблеме растрескивания вольфрама по данным БД INIS

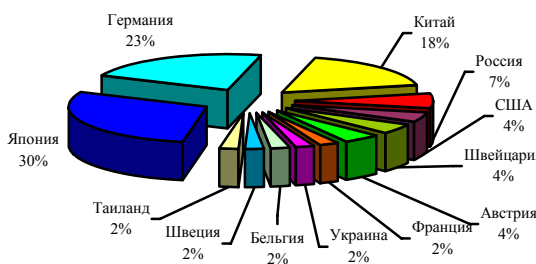


Рис. 24. Распределение публикаций стран по проблеме растрескивания вольфрама по данным БД MSCI

Основным типом публикаций по проблеме растрескивания вольфрама в БД INIS являются: труды конференций (74 %), журналы (23 %), отчеты (3 %), а в БД MSCI имеются только труды конференций – 62 % и журнальные статьи 38 %. Основным языком публикаций является английский (более 90 %).

Последствия воздействия ЭЛМоподобных потоков водородной плазмы первого типа на вольфрамовую поверхность, проведенные на модельных экспериментах QSPA Kh-50 [14], представлены на рис. 25. Тепловая нагрузка составляла 1,1 МДж/м².

Длительность импульса равна 0,25 мс. (Порог плавления наблюдался при нагрузке 0,57 МДж/м²).

В работе [15] приводятся сравнительные результаты воздействия ЭЛМоподобных разрядов в водороде и гелии. Состояние поверхности показано на рис. 26. Для гелия характерна ячеистая блистероподобная структура поверхности. На рис. 26,в показано состояние поверхности после 10 импульсов разряда в He при 0,4 МДж/м².

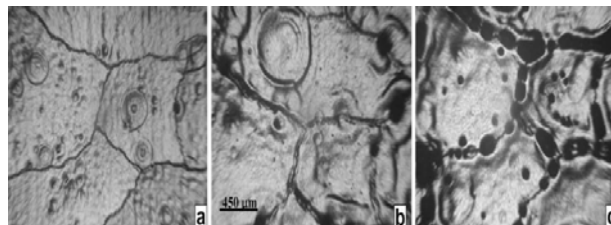


Рис. 25. Пузырьковообразное вскипание поверхности вольфрама при нарастании количества импульсов: 5 (а), 25 (б), 80 (с). Эволюция состояния поверхности для одной и той же области образца

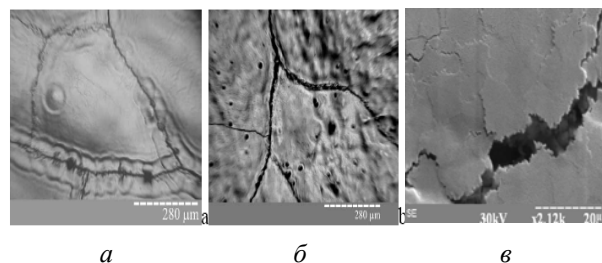


Рис. 26. Изображение поверхности вольфрама, облученного He (а) и H (б) при тепловой нагрузке в 0,4 МДж/м² (в)

Модельные исследования воздействия ЭЛМов второго типа (до точки плавления W) изучались на той же установке QSPA Kh-50 в недавней работе [16]. Исследования одного и того же участка поверхности W с помощью оптического микроскопа показали, что при комнатной температуре (КТ) уже после 5 импульсов наметилась сетка трещин. С ростом количества импульсов (до 270) возрос только контраст изображения поверхности. На рис. 27 показан снимок поверхности W, выполненный с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) после 270 импульсов при КТ.

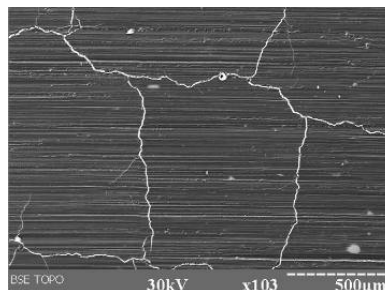


Рис. 27. Поверхность вольфрама после 270 импульсов при тепловой нагрузке 0,45 МДж/м² при КТ

В работе [17] для моделирования воздействия ЭЛМов на вольфрамовые образцы использовался мощный электронный пучок. На рис. 28 представлены результаты испытаний для 100 импульсов дли-

тельностью 1 мс образца высокочистого вольфрама (W-UHP) с тепловой нагрузкой до порога поврежденных, равного 0,16 ГВт/м² при 400 °С и послепороговых – до 0,63 ГВт/м² при 400 °С и КТ. При КТ наблюдались трещины двух типов: около 500 мкм и глубже и несколько десятков микрометров, глубина которых соответствует распространению теплового фронта ЭЛМа и связана с термострессом, обусловленным расширением материала.

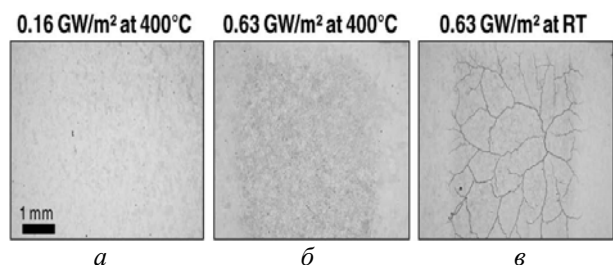


Рис. 29. Повреждения W-UHP при указанных нагрузках; а – без повреждений; б – появление шероховатости поверхности; в – интенсивная сетка трещин

Деградация свойств материалов в случае стационарных тепловых нагрузок ТЯР должна ещё исследоваться. Трудности этих исследований состоят в том, что на действующих установках флюенс ограничивается величиной $\sim 10^{28}/\text{м}^2$ в год, в то время как на диверторных пластинах ТЯР эта величина будет $\sim 10^{31}/\text{м}^2$ в год. Планов на реализацию этих условий пока нет [13].

НЕЙТРОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ. ОХРУПЧИВАНИЕ И РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ

При нейтронном облучении возникают радиационно-стимулированные дефекты, происходит изменение микроструктуры, генерация продуктов трансмутации и, как результат, изменение физических и механических свойств. В табл. 2 приведены данные для различных ОПМ [18].

Таблица 2

Повреждения (дозы) и продукты трансмутации при n-флюенсе, равном 1 МВт/м² в год

Материал	сна	He атомов/10 ⁶	H, D, T атомов/10 ⁶	Другие (%)
Be	3,5	3500	~ 50 (Т)	-
C	4,5	1500	0,2	-
W	3,5	2	0,1	Re: 3,0; Ta: 0,8; Os: 0,2
Ферритная сталь	8,3	150	300	
V	8,5	50	160	

В ИТЭР воздействие нейтронного облучения с энергией 14 МэВ будет определяться флюенсом $\leq 0,3$ МВт/м² в год, в ДЕМО – 10 МВт/м² в год. В условиях ДЕМО W будет трансмутировать с большой скоростью в Re, который эффективно преобразуется в Os. После 5 лет работы фракции Re и Os

будут составлять 10...12 %. Результатом станет изменение механических и термических свойств. Достоинством вольфрама является очень низкий выход гелия при трансмутации под действием нейтронных потоков. В работе [19] показано, что при наработке 10 ат.% Re в W его теплопроводность снижается на 30 % при 1000 К. Этот уровень будет достигнут в течение двух лет эксплуатации.

Процессы охрупчивания вольфрама связаны с влиянием переменных тепловых нагрузок, рекристаллизацией и повреждениями при нейтронном облучении.

На рис. 29-31 показана динамика публикаций, а также вклад стран по проблемам нейтронных повреждений вольфрама.

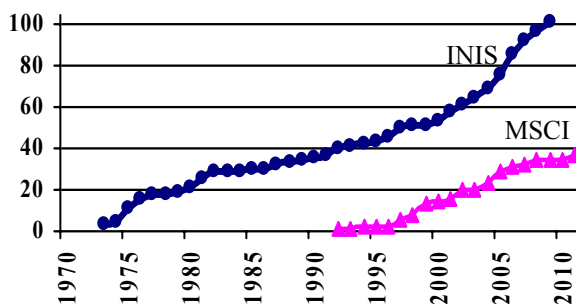


Рис. 29. Кумулятивный рост числа публикаций по нейтронным повреждениям вольфрама

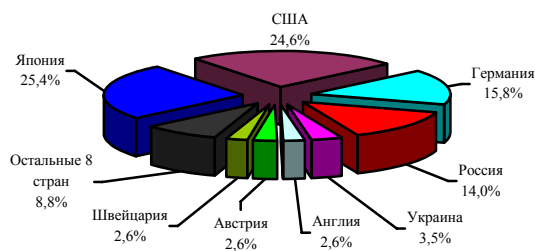


Рис. 30. Распределение публикаций стран по нейтронным повреждениям вольфрама по данным БД INIS

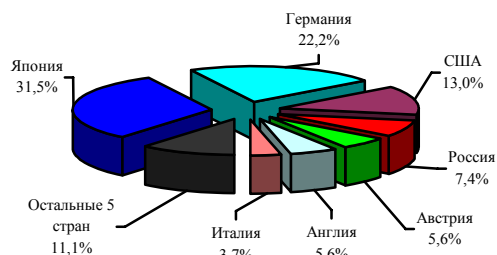


Рис. 31. Распределение публикаций стран по нейтронным повреждениям вольфрама по данным БД MSCI

Кроме указанных на рис. 30, 31 стран в исследованиях этой проблемы принимали участие: Китай, Испания, Франция, Бельгия, Финляндия, Голландия, Италия, Южная Корея, Канада, Украина, Швейцария, Болгария.

Основным типом публикаций по нейтронным повреждениям вольфрама для БД INIS являются: труды конференций (58 %), журнальные статьи (23 %), отчеты (16 %), диссертации и книги (2 и

1 %). Для БД MSCI публикации распределены таким образом: труды конференций – 63 %, журнальные статьи – 37 %. Основной язык публикаций – английский – 76 % (БД INIS) и 99 % (БД MSCI).

На рис. 32–34 показана динамика публикаций, а также вклад стран по проблеме охрупчивания и радиационного упрочнения вольфрама.

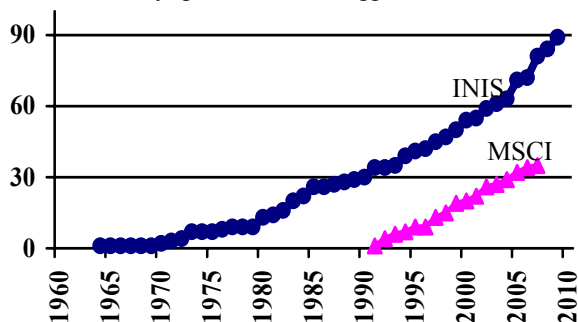


Рис. 32. Кумулятивный рост числа публикаций по проблеме охрупчивания и радиационного упрочнения вольфрама

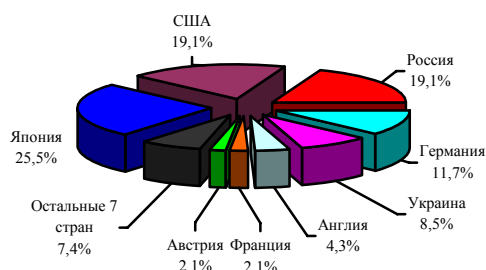


Рис. 34. Распределение публикаций стран по охрупчиванию и радиационному упрочнению вольфрама по данным БД INIS

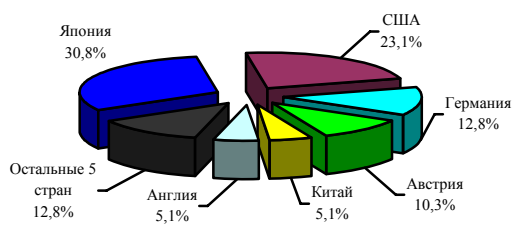


Рис. 34. Распределение публикаций стран по проблеме охрупчивания и радиационного упрочнения вольфрама по данным БД MSCI

Кроме указанных на рис. 33, 34 стран в исследованиях этой проблемы принимали участие: Китай, Голландия, Италия, Казахстан, Польша, Швейцария, Пакистан, Франция, Украина, Венгрия, Испания.

Основным типом публикаций по охрупчиванию и радиационному упрочнению для БД INIS являются: труды конференций (50 %), журнальные статьи (41 %), отчеты (6 %), патенты и книги (2 и 1 %). Для БД MSCI публикации распределены таким образом: труды конференций – 54 %, журнальные статьи – 46 %. Основные языки публикаций по БД INIS: английский – 65 %, русский – 21 % и по БД MSCI – английский – 99 %.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ W-Be

Следует отметить, что вольфрам в диверторе будет бомбардироваться потоками Be, эродированного в главной камере [8]. Его перемешивание с вольфрамом приведёт к образованию сплавов: $Be_{22}W$, $Be_{12}W$, Be_2W с температурами плавления 1300, 1750 и 2250 К, соответственно. Это представляет собой определенную сложность при совместном их применении. Сплав Be-W образуется при температуре между 850 и 1200 К. Такой процесс нельзя исключить при периодически повторяющихся тепловых нагрузках.

РАСПУХАНИЕ ВОЛЬФРАМА

В отличие от атомных реакторов в термоядерных реакторах распухание не играет существенной роли. Максимально зарегистрированное для вольфрама распухание при дозе 9,7 сна и 800 °С составило ~1,7 %. При нейтронном флюенсе 1 МВт/м² в год доза составит 3,5 сна [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный наукометрический анализ по резко нарастающей динамике публикаций по рассмотренным проблемам (см. рис. 2, 5, 8, 13, 16, 22, 29, 32), а также превалирование обсуждения этих проблем на конференциях подтверждают большую актуальность работ по использованию вольфрама для термоядерной энергетики будущего.

Анализ опубликованной литературы показал, что на протяжении многих лет проводились эксперименты с использованием вольфрама в качестве ОПМ для стенок камеры и экранов дивертора. Так, на установке ASDEX Upgrade, начиная с 1999 года, площадь покрытия вольфрамом стенок и углеродно-волоконистых композитов составила 85 % к кампании 2005-2006 гг. [3] После перехода на вольфрам значительно уменьшилось накопление трития в ОПМ и установка успешно работает без боронизации, которая применялась ранее. Однако остаются проблемы: если для ионов D^+ при пороге распыления ≈ 210 эВ можно не ожидать существенного влияния, то распыление с участием примесных ионов с низким $Z = 2...4$ и энергией в периферийном слое $3ZkTe$ будет представлять определённую сложность. Следует также учитывать возможность повреждения вольфрама при инъекции высокоэнергетичного пучка дейтронов и при вводе мощности с помощью ионно-циклотронного резонанса.

Таким образом, эксперименты на установке ASDEX Upgrade свидетельствуют, что она может успешно работать, если стенки камеры и дивертора будут покрыты вольфрамом. Тем не менее, не снимаются некоторые технические и плазмофизические проблемы. Исследования в этом направлении будут продолжены на установке JET “ITER-like wall project” [6], где углеродно-волоконистый композит в диверторе будет полностью заменен на вольфрамовый.

Интересно отметить, что планом работ на ИТЭР предусматривается и исследование захвата трития в углеродно-волоконистых композитах, минимизация

захвата его в установке, полная замена диверторных пластин на вольфрамовые [21].

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Roth et al. // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 2007, v. B 258, p.253–263.
2. www.iter.org.
3. J. Pamela et al. *Proc. 17 Intern. Conf. on Plasma Surface Interaction, China, 2006.*
4. R.Neu et al. // *J. Nucl. Mater.* 2007, v. 367-370, p.1497-1502.
5. http://www-dev.niiar.ru/rus/doc/rm_7/45.doc.
6. V. Philipps et al. // *Fusion Engineering and Design.* 2010, v. 85, p.1581-1586.
7. Y. Ueda et al. // *J. Nucl. Mater.* 2009, v. 386-388, p. 725.
8. V. Philipps // *J. Nucl.Mater.* 2011 (in press).
9. W.M. Shu, K. Isobe, T. Yamanisi // *Fus. Engin. Design.* 2008, v. 83, p. 1044-1048.
10. G.-N. Luo et al. // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 2009, v. B 267, p. 3041-3045.
11. J. Roth et al. // *Plasma Physics and Control Fusion.* 2008, v. 50, №103001.
12. W.M. Shu et al. // *Nucl. Fusion.* 2007, v. 47, p. 201; *Phys. Scr.* 2007, №T128, p.96.
13. J. Ueda. *Proc. 18 Intern. Toki Conf.* 2008, p.92-97
14. I.E. Garkusha, V.A. Makhraj et al. // *J. Nucl. Mater.* 2009, v. 390-391, p. 814-817.
15. V.A. Makhraj, I.E.Garkusha, et al. // *PAST. Series "Plasma Physics"*. 2011, №1, p. 71-73.
16. S. Pestchanyi, I. Garkusha, I. Landman // *Fus. Engin. Design.* 2010, v.85, p.1697-1701.
17. J. Linke et al. // *Nucl. Fusion.* 2011, v. 51, № 073017.
18. V.Barabash et al. // *J. Nucl. Mater.*, 2003, v. 313-316, p. 42-51.
19. M. Fuijtsuka et al // *J. Nucl. Mater.* 2000, v. 283-287, p.1148.
20. V. Barabash et al. // *J. Nucl. Mater.* 2000, v. 283-287, p.138.
21. M. Shimada et al. // *J. Nucl. Mater.* 2009, v. 390-391, p. 282-285.

Статья поступила в редакцию 22.09.2011 г.

ОПТИМАЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ МАЙБУТНЬОГО

О.В. Кривченко, Ю.П. Курило, А.Г. Шепелев

Представлено наукометричний аналіз світових наукових інформаційних потоків з 1970 по 2010 рр. з проблеми застосування вольфраму в перспективних термоядерних реакторах на основі використання автоматизованих Баз Даних "International Nuclear Information System" (INIS) і "Materials Science Citation Index" (MSCI). Побудовано графіки динаміки публікацій в часі і їх розподіл по країнах, з'ясовано типи публікацій і мови.

OPTIMUM CANDIDATE MATERIAL FOR FUTURE THERMONUCLEAR ENGINEERING

O.V. Krivchenko, Yu.P. Kurilo, A.G. Shepelev

Presented is a scientometric analysis of the world scientific information flows for the period from 1970 to 2010, concerned with tungsten application in promising thermonuclear reactors. The information was retrieved from the automated databases "International Nuclear Information System" (INIS) and "Materials Science Citation Index" (MSCI). Dynamics of publications is plotted versus time; types and languages of the publications and their distribution on countries are also presented.