

Ольга Огородникова: Требуется понимание взаимодействия водорода с дефектами материала

11 марта 2025

Автор: Константин Фрумкин

Старший научный сотрудник лаборатории "Физико-химические процессы в стенках термоядерных установок" Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ Ольга Огородникова вошла в число самых цитируемых российских ученых по версии издательства Elsevier.

С Ольгой Вячеславовной мы беседуем о предмете и результатах ее научных исследований.

Интервью взято для рубрики «[Голос науки](#)».



Ольга Вячеславовна, какими научными исследованиями вы сейчас занимаетесь?

Я занимаюсь взаимодействием водорода в газообразном, атомарном и ионном состояниях с металлами. Это актуально вследствие того, что водород является одной из ключевых технологий использования возобновляемых источников

энергии, а дейтериево-тритиевая смесь является топливом для термоядерных реакторов. Обеспечение безопасности компонентов, используемых в водородной инфраструктуре, требует всестороннего понимания того, как водород взаимодействует с материалами и как он изменяет или ухудшает механические свойства. Водородное охрупчивание, а именно, захват водорода в дефекты материала (дислокации, границы зерен, вакансии, поры и т.п.) является большой проблемой для многих технических систем, так как влияет на механическое поведение материалов и механические свойства, такие как прочность, пластичность, твердость и сопротивление к разрушению. Проблема водородного охрупчивания актуальна для водородной энергетики, где происходит транспортировка и хранение водорода, для ядерных, термоядерных и гибридных реакторов, в частности, для гибридного реактора, который сейчас строится в Курчатовском институте. Накопление трития в термоядерном реакторе лимитировано в целях обеспечения безопасности работы реактора, поэтому оценка накопления изотопов водорода в материалах первой стенки является необходимой. И для этого важно глубокое понимание физики взаимодействия плазмы с материалом.

Но Вы занимаетесь не только взаимодействием высокотемпературной плазмы с материалами?

Я занимаюсь фундаментальным изучением диффузии и захвата водорода в металлах и комплексных материалах в разных условиях их эксплуатации, результаты этих исследований могут использоваться в различных областях науки и техники. Водород в материалах — это очень обширная тема, и фундаментальные знания о ней необходимы для применения в различных областях, например, для разработки новых передовых материалов для хранения и транспортировки водорода, для ядерных и термоядерных реакторов, а также для химических, инженерных, авиакосмических технологий. В последнее время мы в основном занимаемся применением наших моделей для разработки новых материалов с улучшенными радиационными свойствами и минимизацией водородного охрупчивания. Здесь требуется понимание взаимодействия водорода с дефектами, то есть необходимо знать, какие виды дефектов создаются в процессе радиационного облучения и сколько водорода захватывает каждый вид дефектов. Для понимания какие виды дефектов являются определяющими в водородном охрупчивании в конкретном случае комплексного материала и условий эксплуатации, необходимо развитие многоуровневого анализа материала, от атомарного уровня до макроскопического, и развитие многомасштабных и мультифизических систем моделирования материалов, учитывающих динамические изменения поверхности материала и дефектов в процессе эксплуатации. Этим мы и занимаемся.

А где происходят эксперименты?

В основном на нашей кафедре физики плазмы в МИФИ. Также мы сотрудничаем с Курчатовским институтом и ТРИНИТИ.

А в токамаках?

Мы, конечно, сравниваем результаты наших лабораторных экспериментов с результатами экспериментов на зарубежных токамаках.

Сложность предсказания накопления изотопов водорода и модификации материала заключается в синергетическом взаимодействии многих процессов, а именно высокая плазменно-тепловая нагрузка на материал в комбинации с продуктами DT-реакции, а именно, гелия и нейтронов. Экстраполяция данных из действующих токамаков на строящиеся ИТЭР и ДЕМО термоядерные реакторы, а тем более гибридные, ненадежна, так как реализуемые условия плазмы различны в настоящих токамаках и далеки от условий пристеночной плазмы в будущих реакторах. Также в действующих токамаках существует проблема управления параметрами пристеночной плазмы и порой невозможно и дорого заменить существующие материалы на новейшие перспективные материалы, разрабатываемые для использования в экстремальных условиях эксплуатации и еще недоступные для коммерческого производства. Поэтому для понимания физики процессов для более надежного прогнозирования проводятся лабораторные эксперименты, где есть возможность контролирования параметров облучения и изучения фундаментальных закономерностей поведения водорода, гелия и дефектов в комплексных материалах (наноструктурированных и обогащенных Cr в растворе и дисперсией частиц Y_2O_3) в зависимости от условий эксперимента. Нужно изучать шаг за шагом, как различные параметры влияют на накопление водорода, а это возможно только в лабораторных условиях.

Можно ли сказать, что нащупан путь, в каком будут меняться материалы первой стенки реактора?

Существуют разные концепции материалов первой стенки, в основном это жидкие металлы и металлы на основе вольфрама. Я в основном занимаюсь изучением материалов для следующего реактора, ДЕМО, в котором материалы будут находиться в условиях большой радиационной нагрузки. Было предложено, что необходимо в сталь и вольфрамовые сплавы добавлять керамические нанодисперсионные частицы, которые увеличивают радиационную стойкость материала и уменьшают накопление водорода в условиях образования радиационных дефектов, а также задерживают рост вольфрамового пуха под действием гелия. Также мы изучаем новые, так называемые высокоэнтропийные сплавы, которые имеют большое будущее в энергетике.

Что касается реактора ИТЭР, то у него как известно, бериллий в качестве материала первой стенки заменили на вольфрам. Для того, чтобы в термоядерном реакторе был чистый разряд, все примеси из камеры реактора должны быть до и во время разряда максимально удалены. Бор является хорошим геттером для удаления кислорода, обеспечивая хороший вакуум. Однако, бор, осаждающийся на первой стенке влияет на накопление водорода. На нашей кафедре сейчас идёт интенсивное изучение влияния бора на накопление изотопов водорода в вольфраме. Хотя пленка бора хорошо забирает кислород, но под влиянием плазменных разрядов она будет изменяться, распыляясь и переосаждаясь, и процессы изменения этой плёнки и их влияние на накопление водорода пока очень плохо изучены, хотя очень актуальны.

Ещё одна тема, которой, в частности, занимаюсь я и мои коллеги — это влияние гелия. При термоядерной реакции выделяются не только нейтроны, но и гелий, и он тоже взаимодействует со стенкой реактора и влияет на накопление изотопов водорода. И гелий тоже изменяет свойства материала. То есть это многоуровневые процессы, знания о которых необходимы. Мы изучаем влияние каждого и смотрим влияние нескольких процессов вместе.

Можно ли рассказать об интересных научных результатах, которые получены в ходе этих исследований в последнее время?

Получено много интересных результатов. Во-первых, было установлено, что накопление дейтерия и гелия в материалах коррелирует с изменением границ зерен. Изменение зернистости материала в сторону уменьшения зерен, от микроструктур к наноструктурам в обычном состоянии приводит к увеличению захвата водорода, но когда образуются радиационные дефекты, то оно как раз останавливает накопление водорода, поэтому мы рекомендуем использовать мелкозернистые наноматериалы. И также для сплавов мы увидели, как влияют изменения их наноструктуры и изменение легирующих элементов от микро до наноразмеров на накопление водорода. Был разработан новый двухфазный сплав W-Cr-Y с улучшенными радиационными свойствами и толерантностью к накоплению топлива для использования в термоядерном реакторе.

Во-вторых, разработанная в МИФИ модель диффузии, миграции, десорбции, удержания водорода и динамического образования дефектов материала, была валидирована в течение многих лет на множестве экспериментов. Физические эффекты, предсказанные данной моделью, были подтверждены экспериментально спустя 9 лет от момента предсказания. Я считаю это большим достижением, так как модель не только описывает настоящие экспериментальные данные, но и способна предсказывать явления, которые могут быть открыты только спустя много лет.

Эта модель взаимодействия водорода и поверхности в условиях реактора?

Модель может применяться для разных условий, она составлена из многих компонентов, которые могут быть применены для водородной энергетики, для авиакосмических технологий, и конечно, для реакторов. Для реактора получается наиболее сложная модель, потому что в реакторе происходит распыление материала, изменение условий на поверхности, диффузия водорода и его захват динамически образовавшимися дефектами в присутствии температурного градиента и полей напряжения.

«Эльзивир» включил Вас в число самых цитируемых российских ученых.

Да, я, честно говоря, не ожидала этого. Я думаю, это связано с тем, что мы комбинируем моделирование с экспериментом. Умеем предсказывать какой эффект ожидаем получить в данном эксперименте. Глубокое и тщательное планирование эксперимента, понимание физики процессов, аккуратная интерпретация результатов и позволяет получить новые фундаментальные научные результаты, которые потом повторяются в других лабораториях. Это, наверное, и приводит к цитированию.

Каковы ваши планы?

Мы сейчас хотим изучать накопление водорода в средне- и высоко-энтропийных материалах, то есть когда материал содержит 4 или 5 различных элементов. Это сложные сплавы, например: вольфрам, ниобий, тантал, ванадий и молибден. Проблема в том, что все они достаточно хрупкие в начальном состоянии, хотя они очень хорошо себя ведут в различных прикладных областях. И, конечно, мы продолжим отвечать на фундаментальные вопросы, сколько водорода накапливается в разных видах дефектов и в сложных сплавах, и в многокомпонентных материалах, таких как, например, вольфрам/сталь или вольфрам/медь, так как водород может значительно накаливаться на границах раздела фаз. У нас есть уникальные экспериментальные установки, позволяющие измерять десорбцию водорода прямо во время эксперимента, не вынося образцы на воздух, что позволяет учитывать влияние подвижного водорода и мелких ловушек на водородное охрупчивание, что теряется при ex-situ анализе.

Будем дальше сравнивать моделирование с результатами экспериментов, изучать развитие радиационных дефектов и захват водорода радиационными дефектами при разных экспериментальных условиях и разных материалах, это достаточно масштабная, сложная и интересная проблема и с научной точки зрения и с точки зрения прикладного применения в различных отраслях.

Источник: официальный сайт НИЯУ МИФИ, 11 марта 2025 года

<https://mephi.ru/press/news/24137>