

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА ЗАХВАТ И ДЕСОРБЦИЮ ДЕЙТЕ- РИЯ В ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЯХ

В качестве одного из основных конструкционных материалов для будущих термоядерных установок рассматриваются малоактивируемые феррито-мартенситные стали, обладающие высокой устойчивостью к нейтронному воздействию. С точки зрения безопасности важным вопросом является накопление трития в конструкционных материалах и проникновение трития через материалы в систему охлаждения.

Стали имеют положительную теплоту растворения и, соответственно, низкую растворимость изотопов водорода. Большинство дефектов в сталях имеют низкую энергию связи по отношению к водороду [1]. Термодесорбционные спектры дейтерия из феррито-мартенситных сталей RUSFER и EUROFER, облученных дейтериевой плазмой, имеют характерный пик при температуре 500-600 К, который доминирует при низких температурах облучения [2,3].

Десорбция водорода с одним ярко выраженным пиком характерна для металлов с отрицательной теплотой растворения и объясняется тем, что десорбция лимитируется не выходом из ловушек, как в случае металлов с положительной теплотой растворения, а десорбцией с поверхности. Можно предположить, что это возможно, если поверхность пассивирована из-за контакта с атмосферой или при длительной выдержке в вакууме. В данной работе проведены эксперименты по изучению захвата ионов дейтерия и его термодесорбции в условиях, когда пассивация поверхности после облучения сведена к минимуму. Результаты сравнивались с результатами, которые получены при выдержке образца в вакууме или на атмосфере после облучения.

Эксперименты проводились с образцами ферритно-мартенситной стали EUROFER (Cr - 9%, W - 2%, V - 0,25%, Mn - 0,2-0,6%, C - 0,1%, Ta - 0,1%). Облучение проводилось на установке «МЕДИОН» различными дозами ($3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{18}$ D/cm²) ионов D₃⁺ с энергией 10 кэВ. Далее проводилась термодесорбционная спектроскопия (ТДС) для анализа захвата и динамики десорбции дейтерия из образцов. Поток газовой выделения измерялся квадрупольным масс-спектрометром, скорость нагрева в ходе ТДС составляла 2 К/с. Образец крепился с помощью держателя выполненного

из вольфрамовой проволоки непосредственно на ленте нагревателя. В ходе облучения образец нагревался пучком до 315-325 К. Более подробное описание установки приведено в [4].

В отличие от многих экспериментов со сталями в данной работе термодесорбционная спектроскопия проводилась без переноса по атмосфере, а время между облучением и ТДС составляло около 30 минут. Также было исследовано влияние на ТДС спектры выдержки в течение 12 часов в вакууме и взаимодействия с атмосферой.

Перед каждым экспериментом образец выдерживался при температуре 873 К в течение 30 минут. Выдержка при этой температуре не приводит к заметным фазовым превращениям, однако позволяет удалить большую часть радиационных дефектов. Эффекта влияния предыдущих облучений на ТДС спектры не наблюдалось даже при минимальных дозах.

Дозовая зависимость накопления дейтерия в ходе облучения при комнатной температуре приведена на рис.1. После достижения дозы 10^{17} D/см² скорость накопления дейтерия заметно снижается и дальнейшее увеличение дозы в 30 раз приводит к увеличению накопления менее, чем на 50%. Такая зависимость характерна при насыщении зоны внедрения и медленном распространении профиля концентрации за пределы зоны внедрения.

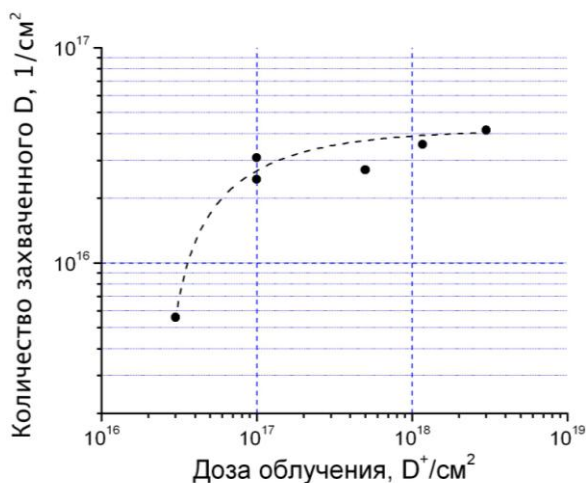


Рис.1 Зависимость количества захваченного дейтерия от дозы облучения при облучении ионами дейтерия D_3^+ с энергией 10 кэВ

Максимум основного пика газовой выделения дейтерия при дозе 3×10^{16} D/cm² находится при температуре 380 K (рис.2). С увеличением дозы происходит смещение пика до температуры 450 K при максимальной дозе облучения. С увеличением дозы наблюдается также уширение пика и появление плеча в области 500-550 K. Таким образом, можно видеть, что ловушки, образованные под действием ионов, действительно, имеют небольшую энергию связи. При этом, с увеличением дозы, по всей видимости, появляются ловушки с большей энергией.

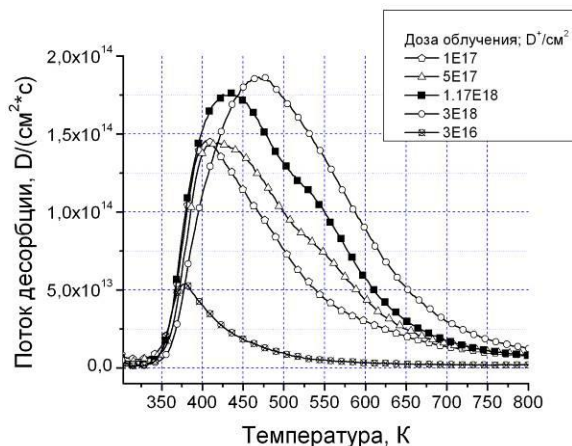


Рис.2 Сравнение термодесорбционных спектров для различной дозы облучения.

На рис.3 представлены спектры для одинаковой дозы облучения для трех различных случаев: 1 – ТДС сразу после облучения, 2 – ТДС после выдержки в вакууме в течение 15 часов, 3 – ТДС после выдержки в течение 12 часов на атмосфере. Как видно, выдержка в вакууме приводит к выходу наиболее слабо связанного дейтерия из образца, что приводит к значительному уменьшению низкотемпературной части.

Спектр после выдержки на атмосфере значительно отличается от остальных и имеет основной пик термодесорбции при температуре 550 K. Интересно, что это положение очень хорошо совпадает с положением пика в экспериментах с облучением плазмой в [3], в которых образец после облучения длительное время находился на атмосфере.

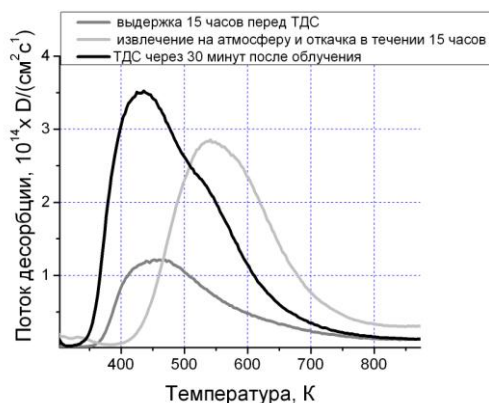


Рис.3 Сравнение термодесорбционных спектров, полученных при различных условиях выдержки образца после облучения. Доза облучения для всех экспериментов - $1,15 \times 10^{18} \text{ D/cm}^2$

Смещение пика в сторону больших температур после взаимодействия с атмосферой можно объяснить изменением состояния поверхности. Сталь Eurofer содержит большую концентрацию хрома, который может образовывать оксидную плёнку на поверхности стали при контакте с кислородом или парами воды из атмосферы. Эти оксидные слои могут быть барьером для десорбции водорода. Характерно, также, что содержание дейтерия в стали после выдержки в атмосфере уменьшается не так сильно, как при выдержке в вакууме. Это также может быть связано с формированием окисных барьеров для десорбции, которые препятствуют выходу внедренного дейтерия.

Таким образом, состояние поверхности может играть важную роль при десорбции дейтерия из сталей, а при анализе спектров термодесорбции из сталей необходимо учитывать поверхностные эффекты.

- [1] G.A. Esteban et al., J. Nucl. Mater. 281 (2000) 34-41.
- [2] V.S.Efimov, et al. Proceedings of the XXI International conference «Ion-surface interactions ISI-2013». Yaroslavl, 22-26 August 2013., vol. 2, pp. 473-475.
- [3] A.V. Golubeva, et al. Deuterium retention in Low-activated Ferritic-Martensitic steels. 11th International Workshop, on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, 29-31, May, 2012.
- [4] В.С. Ефимов, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, №5, с. 79–85.