

05;12

## Особенности накопления имплантированного дейтерия в сплавах Fe–Cr с примесями

© В.Л. Арбузов, Г.А. Распопова, А.Л. Николаев, В.А. Павлов

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: raspорова@imp.uran.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2000 г.

Изучено влияние малых добавок кремния и сурьмы на индуцированную ионным облучением сегрегацию дейтерия в сплаве Fe–16%Cr. Обнаружено, что характер влияния примесей на сегрегацию дейтерия различен: добавка кремния увеличивает сегрегацию, в то время как добавка сурьмы ослабляет. Обнаруженный эффект объясняется возможным влиянием типа примеси на свойства вакансионных кластеров — ловушек для дейтерия, образующихся при облучении ионами дейтерия.

Известно, что структурные дефекты металлических материалов (дислокации, границы зерен, вакансии, примесные атомы и т.д.) могут служить ловушками для высокоподвижных атомов водорода. Но в силу малой энергии связи (0.1–0.2 eV) такие объединения в большинстве случаев оказываются неустойчивыми и легко диссоциируют уже при комнатной температуре (см. обзор [1]). В то же время индуцированная ионным облучением сегрегация дейтерия в металлах и сплавах, вызванная захватом подвижных атомов дейтерия на радиационных дефектах вакансионного типа [2] (сегрегация), сохраняет устойчивость при комнатной температуре.

Известно, что структура дефектов вакансионного типа зависит не только от дозы ионного облучения изучаемого сплава, но и от других факторов. Так, в тех системах, в которых вакансии подвижны при комнатной температуре, формирующиеся дефекты вакансионного типа являются кластерами вакансий. Наличие в металлах и сплавах даже небольшого количества примесей, атомы которых взаимодействуют с вакансиями, может увеличивать как долю выживающих вакансий, так и количество вакансионных кластеров. Одновременно может меняться и конфигурация самих кластеров: при введении примеси спектр размеров

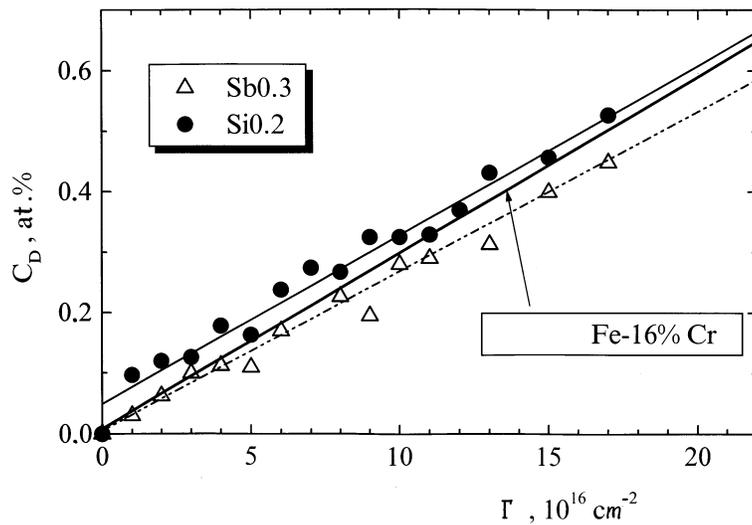
кластеров, как правило, сдвигается в сторону меньшей кратности и в состав кластеров входят примесные атомы. Эти факторы могут изменить картину сегрегации по сравнению с ситуацией, когда подобные примеси отсутствуют. Информация о таком влиянии важна для понимания как самой природы *сегрегации*, так и для проблемы накопления изотопов водорода в первой стенке термоядерного реактора. Однако какие-либо данные о подобном влиянии примесных атомов на накопление водорода в литературе отсутствуют. Поэтому в данной работе были проведены исследования для оценки эффекта примесного легирования на радиационно-стимулированную сегрегацию дейтерия.

Одной из систем, где наблюдается устойчивая при комнатной температуре сегрегация, является сплав Fe-16 at.% Cr [2]. Он является основой для ферритных сталей — кандидатных материалов для первой стенки термоядерного реактора (ТЯР). Свойства вакансий в этом сплаве близки к свойствам вакансий в чистом железе (энергия миграции 0.55 eV) [3,4], что позволяет использовать для оценки взаимодействия вакансий с примесями в данном сплаве литературные данные [5] для железа. Согласно данным работы [5], примесное легирование замедляет возврат параметров аннигиляции позитронов в железе при отжиге после низкотемпературного электронного облучения. Среди исследованных примесей минимальный эффект наблюдался для кремния, максимальный — для сурьмы. Поэтому влияние этих двух примесей на формирование сегрегации в сплаве Fe-16 at.% Cr и исследовалось в настоящей работе.

Приготовление и аттестация сплавов описаны в [4,6], основные примеси Ni ( $\sim 100$  ppm) и примеси внедрения C + N ( $\sim 200$  ppm). Концентрации кремния и сурьмы, согласно закладке, равнялись 0.2 и 0.3 at.% соответственно. Анализ методом обратного резерфордовского рассеяния подтвердил наличие в сплаве 0.3 at.% Sb.

Имплантиация ионов дейтерия  $D^+$  с энергией 700 keV в изучаемые сплавы Fe-16% Cr-(Si, Sb) сопровождалась измерением средней концентрации дейтерия  $C_D$  в облучаемой зоне глубиной  $\sim 3$   $\mu$ m. Методика проведения эксперимента подробно описана в [2].

На рисунке представлены дозовые зависимости накопления дейтерия в чистом и легированном кремнием и сурьмой сплаве Fe-16 % Cr. Из рисунка видно, что характер влияния примесей на сегрегацию различен: добавка кремния усиливает сегрегацию, в то время как добавка сурьмы ослабляет.



Усиление сегрегации в сплаве Fe–16%Cr–Si достаточно легко понять: легирование кремнием приводит к увеличению числа вакансионных кластеров, формирующихся в сплаве при облучении ионами дейтерия, которые являются ловушками для атомов дейтерия. Этот вывод достаточно тривиален и, основываясь на нем, можно ожидать, что влияние любой примеси должно сводиться либо к усилению сегрегации, либо к отсутствию какого-либо влияния.

Однако результат для сплава, легированного сурьмой, показывает, что на самом деле влияние примесей на сегрегацию имеет более сложный характер. Энергия связи атома кремния с вакансией невелика: уже при 260 К этот комплекс диссоциирует [4,5]. На основании данных [5] можно ожидать, что энергия взаимодействия вакансий с атомами сурьмы больше, чем с атомами кремния. Поэтому можно ожидать, что число вакансионных кластеров, формирующихся в сплаве Fe–16%Cr–Sb, больше, чем в чистом сплаве и сплаве с кремнием, а спектр размеров кластеров сдвинут в сторону меньшей кратности. Уменьшение сегрегации при увеличении числа кластеров означает, что доля кластеров, способных удерживать атомы дейтерия при комнатной температуре, уменьшается в сплаве Fe–16%Cr–Sb по сравнению со

сплавами Fe–16%Cr и Fe–16%Cr–Si. Возможны две причины, которые приводят к уменьшению доли кластеров, способных удерживать атомы дейтерия: кластеры меньшей кратности имеют более низкую энергию связи и атомы сурьмы, входящие в состав кластеров, уменьшают энергию связи. Скорее всего, оба фактора действуют одновременно, так как кластеры меньшей кратности формируются именно за счет захвата вакансий на атомах сурьмы и последние входят в состав таких кластеров. Более детальный анализ происходящих процессов требует дополнительных данных, которые будут получены в ходе проводимых в настоящее время экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 98–02–17341).

## Список литературы

- [1] Арбузов В.Л., Выходец В.Б., Распопова Г.А. // *Металлы*. 1995. Т. 4. С. 148–161.
- [2] Arbutov V.L., Raspopova G.A., Vykhodets V.B. // *J. Nucl. Mater.* 1999. V. 271/272. P. 340–344.
- [3] Dimitrov C., Benkaddour A., Corbel C., Moser P. // *Annales de Chimie (France)*. 1991. V. 16. P. 319–324.
- [4] Nikolaev A.L., Arbutov V.L., Davletshin A.E. // *J. Phys. Condens. Matter*. 1997. V. 9. P. 4385–4402.
- [5] Moser P., Corbe C., Lucasson P., Hautajarvi P. // *Mater. Sci. Forum*. 1987. V. 15/18. P. 925–930.
- [6] Nikolaev A.L. // *J. Phys. Condens. Matter*. 1999. V. 11. P. 8633–8644.