

УДК 621.891:539.217.1

ВАКАНСИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ЗАЛЕЧИВАНИЯ ТРЕЩИН В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

А.С. ВАБИЩЕВИЧ

(Представлено: канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ)

В рамках структурно-диффузионного механизма взаимодействия дефектов с трещинами в твердом теле рассмотрена задача о вакансионном процессе залечивания трещин в металле с учетом зависимости коэффициента диффузии дефектов от температуры. Показано, что энергия активации диффузии пор в металле существенным образом влияет на скорость залечивания трещин.

Дефекты в твердых телах, в частности в металлах, могут быть различного типа и происхождения. Дефектная структура твердых тел формируется уже на этапе получения самого материала. Известно [1; 2], что в процессе изготовления из него изделий и при эксплуатации готовых изделий она может существенно трансформироваться. К наиболее типичным дефектам кристаллической структуры относятся: точечные дефекты (вакансии, междоузельные атомы); линейные дефекты (дислокации и их петли); поверхностные дефекты (границы зерен, дефекты упаковки); объемные дефекты (поры и включения).

В процессе технологической и механической обработки материала возникают характерные дефекты: трещины, поры, включения. Процесс разрушения начинается с образования трещин, их увеличением и заканчивается макроскопическим разрушением материала или конструкции на отдельные части. В материаловедении металлов состояние поверхности и зарождение трещин во многом определяет сопротивление материалов деформации и разрушению. При определенных условиях трещины в металле способны залечиваться (уменьшать свой объем), что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик материала.

В данной работе рассматривается возможный результат залечивания трещин в рамках модели структурно-диффузионного механизма, предложенной ранее авторами [3]. Согласно указанной модели, трещины являются стоками для точечных дефектов и микропор в твердом теле. Процесс залечивания (разрастания) связан с потоком микропор (вакансий) от трещины (к трещине). Ранее установлено [3], что концентрация вакансий у поверхности малых трещин (пор) выше, чем у больших, и, следовательно, появляется поток вакансий от малых трещин к большим. Происходит залечивание малых трещин.

Залечивание трещин может также сопровождаться диффузией атомов матрицы либо примесей по вакансиям (микропорам) к трещинам. В настоящей работе в качестве диффундирующего элемента выбран хром, который используют для увеличения прочности и уменьшения коррозии железа.

Модель вакансионного механизма взаимодействия пор с трещиной. Поток микропор на поверхность единицы длины трещины f рассчитывается по формуле [3]:

$$f = \frac{\gamma n_1}{R} \sqrt{\frac{D}{n_2}} \frac{K_1(z)}{K_0(z)}, \quad (1)$$

где

$$\gamma = \frac{2\alpha\Omega}{kT}, \quad z = R\sqrt{\frac{n_2}{D}},$$

R – радиус трещины; D – эффективный коэффициент диффузии для дефектов данного типа; n_1, n_2 – константы; α – удельная поверхностная энергия; Ω – характерный объем одной микропоры (дефекта); T – абсолютная температура; $K_i(z)$ – цилиндрические функции Макдональда i -го порядка.

Учтем, что температурная зависимость коэффициента диффузии дефектов может быть описана известным соотношением:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (2)$$

где E_a – энергия активации диффузии дефекта; D_0 – постоянная величина; k – постоянная Больцмана.

Таким образом, поток микропор оказывается сложной функцией многих параметров: температуры, коэффициента диффузии, поверхностной энергии, радиуса трещины.

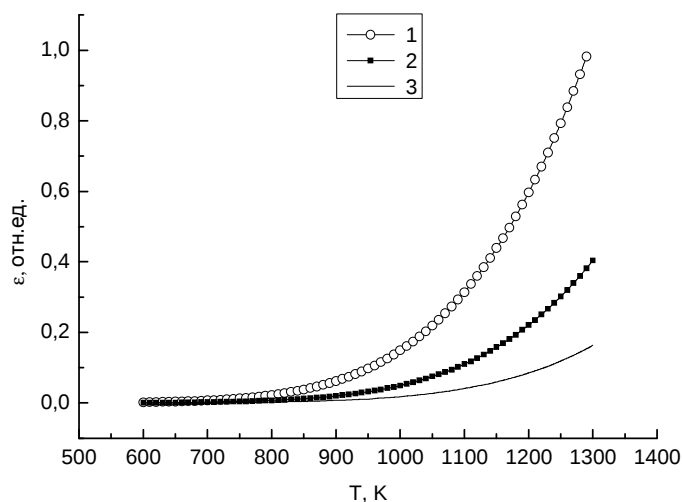
В настоящей модели анализируется диффузия микропор в объеме, прилегающем к открытой трещине цилиндрической формы. Изменение объема трещины ΔV длиной h за время t определяется по формуле:

$$\Delta V = 2\pi R h f t \Omega. \quad (3)$$

Оценка процесса залечивания трещины в настоящей модели проводится на основании расчета относительного изменения объема трещины (относительной скорости залечивания трещины):

$$\varepsilon = \Delta V / V. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлены зависимости относительного изменения объема трещины от температуры для различных значений энергии активации диффузии микропор. Известно [2; 4], что в металлах энергия активации для вакансий лежит в интервале 0,9...2,0 эВ.



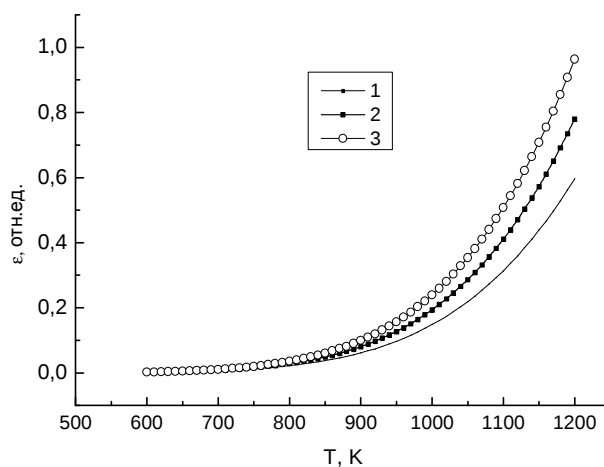
1 – 1, 2 – 1,13; 3 – 1,25
 $D_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $t = 20 \text{ ч}$

Рисунок 1. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры при различных энергиях активации пор, ЭВ

Как видно из рисунка 1 изменение энергии активации пор в небольшом интервале 1...1,25 эВ существенным образом влияет на параметр залечивания. Кроме этого, скорость процесса залечивания зависит от температуры. С ростом температуры резко возрастает отличие в скорости залечивания в исследуемом интервале энергий.

Предполагается, что поток примесных атомов в процессе залечивания должен быть на порядок меньше вакансионного механизма, поскольку энергия миграции для примесей E_a лежит в широких пределах от 1 до 5 эВ. Таким образом, основное влияние пор на залечивание трещин связано с низким значением энергии активации диффузии пор.

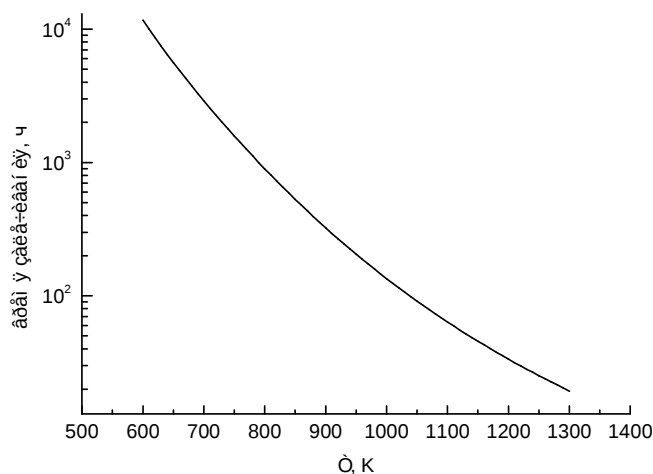
Кроме энергии активации на величину потока пор (скорость залечивания трещин) оказывает значение поверхностной энергии для металла (рис. 2).



1 – 1,3; 2 – 1,7; 3 – 2,1
 $D_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $t = 20 \text{ ч}$

Рисунок 2. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры при различных значениях поверхностной энергии, Дж/м²

На рисунке 3 приведен график зависимости полного времени залечивания трещин от температуры. Видно, наименьшее время залечивания характерно для высоких температур 900...1000 К.



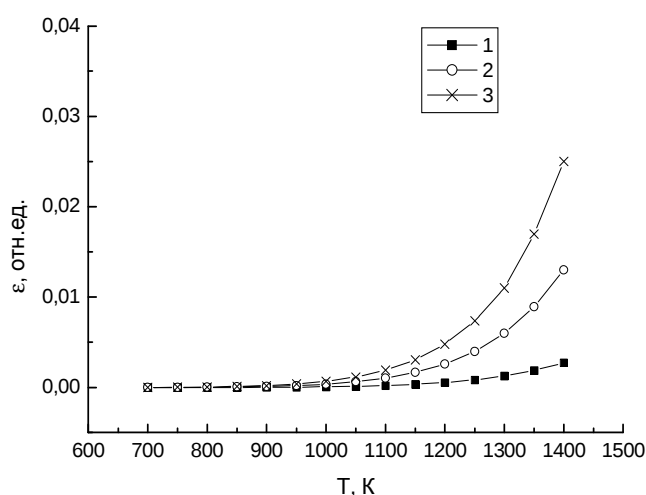
$$E_a = 1 \text{ эВ}, D_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Рисунок 3. – Зависимость времени полного залечивания трещины от температуры

Моделирование диффузии хрома в железе. Хром в железе образует твердый раствор замещения. Залечивание трещин может сопровождаться диффузией атомов хрома по вакансиям (микропорам) к трещинам. Рассмотрим диффузию хрома в α -Fe в рамках вакансионного механизма. Поток атомов на поверхность единицы длины трещины f можно оценить по формуле (1), где D – эффективный коэффициент диффузии для атомов хрома. Учтем температурную зависимость коэффициента диффузии хрома (формула (2)), где E_a – энергия активации диффузии атомов хрома.

В качестве модели рассмотрим диффузию атомов Cr в объеме, прилегающем к открытой цилиндрической трещине. Изменение объема трещины и относительное изменение объема трещины определим по формулам (3) и (4).

На рисунке 4 представлены результаты моделирования зависимости относительного изменения объема трещины при диффузии атомов хрома.



$$1 - 2,4; 2 - 2,2; 3 - 2,0; D_0 = 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

Время отжига $t = 20 \text{ ч}$

Рисунок 4. – Зависимость относительного изменения объема трещины от температуры отжига при различных энергиях активации диффузии хрома, эВ

Для хрома в α -Fe энергия активации лежит в пределах от 2,17 до 2,4 эВ, а частотный фактор от 0,89 до 0,78 см²/с. При переходе от диффузии по вакансиям (кривая 1) к диффузии по границам зерен металла (кривые 2, 3), где структура, как правило, чрезвычайно сильно искажена, процесс диффузии значительно ускоряется. Это связано с тем фактом, что при диффузии по границам зерен энергия активации диффузии хрома меньше, чем по вакансиям.

Заключение

В рамках вакансионного механизма залечивания трещин показано, что параметры диффузии микропор существенным образом влияют на скорость залечивания трещин в металле. Проведена оценка полного времени залечивания при различных температурах. Проведена оценка возможности использования вакансионного механизма залечивания трещин на примере диффузии атомов хрома по вакансиям (микропорам) к трещинам в α -Fe. Снижение на 25% коэффициента диффузии приводит к уменьшению скорости залечивания в 10 раз. Время полного залечивания при температурах 900–1000 К составляет 100...200 ч. Установлена зависимость скорости залечивания трещин от энергии активации диффузии атомов Cr. Полученные в работе результаты расчетов в рамках модели структурно-диффузионного механизма свидетельствуют о том, что скорость залечивания трещин главным образом определяется значением и изменением энергии активации диффузии атомов Cr. Помимо этого установлено, что увеличению скорости залечивания трещин способствует увеличение температуры отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк : ПГУ, 1999. – 144 с.
2. Физика твердого тела, уч. пособие для втузов / И.К. Верещагин [и др.] – М. : Высш. школа, 2001. – 237 с.
3. Zavistovskiy, V. On interaction between cracks and particles in coated materials / V. Zavistovskiy, E. Bogdanova, S. Zavistovskiy // Fracture mechanics and physics of construction materials and structures : Materials of II international symposium, 7–10.11.1996. – Lviv–Dubliany. – P. 45–48.
4. Фистуль, В.И. Физика и химия твердого тела : учебник для вузов : в 2-х т. / В.И. Фистуль – М. : Металлургия, 1995. – 486 с.