

07,01

Влияние водорода на механические свойства металлов в условиях высокоскоростной деформации

© В.В. Малашенко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,
Донецк, ДНР

E-mail: malashenko@fti.dn.ua

Поступила в Редакцию 26 июня 2022 г.

В окончательной редакции 26 июня 2022 г.

Принята к публикации 2 июля 2022 г.

Теоретически проанализировано движение ансамбля краевых дислокаций в металлах с высоким содержанием водорода в условиях высокоскоростной деформации (high strain rate deformation). В рамках теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) (DID) получено аналитическое выражение для зависимости динамического предела текучести от концентрации атомов водорода.

Ключевые слова: дислокации, водород, высокоскоростная деформация, металлы.

DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53337.416

Изучение наводороженных металлов и сплавов имеет огромное значение как для развития фундаментальной науки, так и в плане практического использования [1–11]. Взаимодействие водорода с металлами является весьма существенным фактором в атомной энергетике, в металлургической, машиностроительной, нефтеперерабатывающей и многих других отраслях промышленности.

Наличие водорода в металлах может приводить как к отрицательным последствиям (водородное охрупчивание, водородное растрескивание и индуцированное водородом разрушение [3]), так и положительным (пластифицирование металлов [11]). При этом водород способен влиять на свойства металлов при концентрации порядка сотых долей процента. Проблеме изучения влияния водорода на свойства металлов и сплавов посвящены десятки тысяч работ.

Существует, однако, весьма интересная, но недостаточно изученная область взаимодействия атомов водорода с дефектами кристалла, а именно — область высокоскоростной деформации наводороженных металлов, в которых концентрация водорода может достигать весьма больших значений. Это, прежде всего, палладий, который наиболее часто используется в качестве модельного металла при изучении взаимодействия с водородом, а также ванадий, ниобий, тантал и ряд других металлов. Высокоскоростная деформация реализуется как при изготовлении металлических деталей (ковка, штамповка, резка, динамическое канально-угловое прессование), так и при эксплуатации в условиях высокоэнергетических внешних воздействий [12–17].

Чаще всего водород локализуется в междоузлиях металлической матрицы, что приводит к возникновению дополнительных упругих напряжений [2]. При высоких концентрациях эти напряжения могут быть весьма существенны. Атом водорода представляет собой дефект типа центра дилатации. При высокоскоростной деформации

на механические свойства металлов большое влияние оказывают коллективные эффекты, описанные в теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД) [18–23]. Благодаря высокой растворимости в металлах водород способен оказывать значительное влияние на динамику дислокаций, а, следовательно, и на формирование механических свойств металлов. При этом повышение скорости пластической деформации приводит к повышению влияния атомов водорода на механические свойства металла, в частности, на динамический предел текучести.

В настоящей работе получено аналитическое выражение для вклада атомов водорода в величину динамического предела текучести металлов и показано, что этот вклад может быть весьма существенным.

Пусть ансамбль бесконечных краевых дислокаций под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 равномерно движется в металле, содержащем хаотически распределённые атомы водорода. Линии дислокаций параллельны оси OZ , векторы Бюргерса параллельны оси OX , в положительном направлении которой дислокации скользят с постоянной скоростью v . Плоскость скольжения k -й дислокации совпадает с плоскостью XOZ , а ее положение определяется функцией

$$W_k(y = 0, z, t) = vt + w_k(y = 0, z, t). \quad (1)$$

Слагаемое vt описывает движение центра масс дислокации со скоростью v , а функция $w(z, t)$ — колебания элемента дислокации, возникающие при взаимодействии с атомами водорода.

Уравнение движения исследуемой дислокации имеет вид

$$m \left\{ \frac{\partial^2 W_k}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 W_k}{\partial z^2} \right\} = b[\sigma_0 + \sigma_{xy}^H + \sigma_{xy}^{dis}] - B \frac{\partial W_k}{\partial t}. \quad (2)$$

Здесь m — масса единицы длины дислокации, b — модуль вектора Бюргерса, B — константа демпфиро-

вания, обусловленная фоновыми, магнотными, электронными либо иными механизмами диссипации, характеризующимися линейной зависимостью силы торможения дислокации от скорости ее скольжения, c — скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле, σ_{xy}^H , σ_{xy}^{dis} — компоненты тензора напряжений, создаваемых на линии k -й дислокации соответственно атомами водорода и дислокациями ансамбля.

Механизм диссипации в условиях высокоскоростной деформации заключается в необратимом переходе энергии внешних воздействий в энергию поперечных колебаний дислокации в плоскости скольжения. Эффективность такого механизма зависит от условий возникновения дислокационных колебаний. Чем больше их амплитуда, тем больше потери энергии, больше сила торможения дислокаций и, соответственно, больше динамический предел текучести. Коллективное взаимодействие атомов водорода с дислокацией приводит к формированию потенциальной ямы, которая перемещается по кристаллу вместе с дислокацией. Эта яма является причиной появления щели в спектре дислокационных колебаний, которая описывается следующим выражением

$$\Delta = \Delta_H = \frac{c}{b} (n_H \chi^2)^{1/4}. \quad (3)$$

Здесь χ — параметр несоответствия атома водорода, n_H — безразмерная концентрация этих атомов.

Воспользовавшись результатами теории ДВД, после выполнения необходимых вычислений получим выражение для вклада коллективного взаимодействия атомов водорода с дислокациями в динамический предел текучести

$$\tau_H = K \dot{\epsilon} \sqrt{n_H}; \quad K = \frac{\mu \chi}{\rho b c}. \quad (4)$$

Здесь $\dot{\epsilon}$ — скорость пластической деформации, ρ — плотность дислокаций, μ — модуль сдвига.

Выполним численную оценку. Для значений $\mu = 5 \cdot 10^{10}$ Па, $b = 4 \cdot 10^{-10}$ м, $n_H = 10^{-2}$, $\chi = 10^{-1}$, $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $\dot{\epsilon} = 10^6$ с $^{-1}$, $\rho = 10^{14}$ м $^{-2}$ получим $\tau_H = 10^8$ Па, т.е. вклад динамического торможения дислокаций атомами водорода в динамический предел текучести наводороженных металлов в условиях высокоскоростной деформации может составлять десятки процентов. Следовательно, динамическое торможение дислокаций атомами водорода оказывает существенное влияние на механические свойства металлов.

Если же плотность дислокаций достигает больших значений, то главный вклад в формирование щели вносит их коллективное взаимодействие. Это происходит при выполнении неравенства

$$\rho > \frac{\chi \sqrt{n_H}}{b^2}. \quad (5)$$

Данный случай может быть реализован при значениях плотности дислокаций $\rho = 10^{15} - 10^{16}$ м $^{-2}$. Тогда спек-

тральная щель может быть описана выражением

$$\Delta = \Delta_{dis} = \pi b \sqrt{\frac{\mu \rho}{6 \pi m (1 - \gamma)}} \approx c \sqrt{\rho}, \quad (6)$$

где γ — коэффициент Пуассона.

При этом вклад атомов водорода в величину динамического предела текучести металла линейно зависит от концентрации этих атомов

$$\tau_H = D n_H \dot{\epsilon}; \quad D = \frac{2(1 - \gamma) \chi^2 \mu}{\rho^2 b^3 c}. \quad (7)$$

Выполним численную оценку. Для значений $\rho = 10^{15}$ м $^{-2}$, $\mu = 5 \cdot 10^{10}$ Па, $b = 4 \cdot 10^{-10}$ м, $n_H = 10^{-3}$, $\chi = 10^{-1}$, $c = 3 \cdot 10^3$ м/с, $\dot{\epsilon} = 10^6$ с $^{-1}$, получим $\tau_H = 10^8$ Па.

Таким образом, динамическое торможение дислокаций атомами водорода оказывает существенное влияние на механические свойства металлов при высокоскоростном деформировании.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г. Алефельд, М. Фелькль. Водород в металлах. Наука, М. (1981). 474 с.
- [2] Л.В. Спивак. УФН **178**, 897 (2008).
- [3] Б.А. Колачев. Водородная хрупкость металлов. Металлургия, М. (1985). 217 с.
- [4] Ю.А. Яковлев, В.А. Полянский, Ю.С. Седова, А.К. Беляев. Вест. ПНИПУ. Механика **3**, 136 (2020).
- [5] В.А. Огородников, А.А. Юхимчук, М.А. Мочалов, А.В. Андранов, А.Ю. Баурин, А.О. Бликов, И.Е. Бойцо, С.В. Ерунов, И.П. Максимкин, И.Л. Малков, А.С. Пупков, Е.В. Шевнин. Прикладная механика и техническая физика **57**, 111 (2016).
- [6] В.В. Малашенко. ФММ **100**, 1 (2005).
- [7] S. Lynch. Corros Rev. **30**, 105 (2012).
- [8] Н.М. Власов, В.А. Зазноба. ФТТ **41**, 451 (1999).
- [9] В.Г. Барьяхтар, Е.В. Зароченцев, В.В. Колесников. ФТТ **32**, 2449 (1990).
- [10] М.П. Пещеренко, В.В. Русаков, Ю.Л. Райхер. ФММ **97**, 17 (2004).
- [11] В.К. Носов, Б.А. Колачев. Водородное пластифицирование при горячей деформации титановых сплавов. Металлургия, М. (1986). 118 с.
- [12] A.S. Savinykh, G.I. Kanel, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. J. Appl. Phys. **128**, 025902 (2020).
- [13] G.I. Kanel, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. J. Appl. Phys. **127**, 035901 (2020).
- [14] D. Batani. Europhys. Lett. **114**, 1–7, 65001 (2016).
- [15] G.V. Garkushin, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, F.S. Savinykh. Mechan. Solids **52**, 4, 407 (2017).

- [16] С.А. Атрошенко, А.Ю. Григорьев, Г.Г. Савенков. ФТТ **61**, 1738 (2019).
- [17] P.N. Mayer, A.E. Mayer. J. Appl. Phys. **120**, 075901 (2016).
- [18] V.V. Malashenko. Physica B: Phys. Condens. Matter **404**, 3890 (2009).
- [19] В.Н. Варюхин, В.В. Малашенко. Изв. РАН. Сер. физ. **82**, 9, 37 (2018).
- [20] В.В. Малашенко. Письма в ЖТФ **46**, 18, 39 (2020).
- [21] В.В. Малашенко. ФТТ **62**, 1683 (2020).
- [22] В.В. Малашенко. ФТТ **63**, 1391 (2021).
- [23] В.В. Малашенко. ФТТ **63**, 2070 (2021).

Редактор Т.Н. Василевская