

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.В.Малашенко*****, А.Д.Гладкая****, Т.И.Малашенко*****

SPECIFIC FEATURES OF SOLID SOLUTION HARDENING OF METALS AND ALLOYS UNDER HIGH-STRAIN-RATE DEFORMATION

V.V.Malashenko*****, A.D.Gladkaya****, T.I.Malashenko*****

*Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина, malashenko@donfti.ru

**Донецкий национальный университет

***Донецкая академия управления и государственной службы

****Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского

*****Донецкий национальный технический университет

Теоретически проанализирована высокоскоростная деформация металлов и сплавов, содержащих легирующие элементы. Получено выражение для вклада легирующих элементов в величину деформирующих напряжений. Твердорастворное упрочнение сплавов линейно возрастает при увеличении скорости пластической деформации. Концентрационная зависимость механических свойств при высокоскоростной деформации существенно отличается от аналогичной зависимости при квазистатической деформации. Это отличие обусловлено действием коллективных динамических эффектов. Концентрационная зависимость упрочнения при высокоскоростной деформации определяется конкуренцией взаимодействия дислокации с легирующими элементами и дислокациями ансамбля. Если доминирует взаимодействие с легирующими элементами, упрочнение увеличивается пропорционально квадратному корню из концентрации. Если преобладает коллективное взаимодействие дислокаций, упрочнение линейно возрастает при увеличении концентрации.

Ключевые слова: дислокации, сплавы, твердорастворное упрочнение, легирующие элементы

Для цитирования: Малашенко В.В., Гладкая А.Д., Малашенко Т.И. Особенности твердорастворного упрочнения металлов и сплавов при высокоскоростной деформации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.36-38. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).36-38](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).36-38)

The high strain rate deformation of metals and alloys, containing alloying elements is theoretically analyzed. An expression for the contribution of alloying elements to deforming stresses is obtained. Solid solution hardening of alloys increases linearly with increasing plastic deformation rate. The concentration dependence of the mechanical properties under high-strain-rate deformation differs essentially from the analogous dependence under quasi-static deformation. This difference is due to the action of collective dynamic effects. The concentration dependence of hardening under high-strain-rate deformation is determined by the competition between the interaction of the dislocation with alloying elements and dislocations of the ensemble. If interaction with alloying elements dominates, hardening increases in proportion to the square root of the concentration. If the collective interaction of dislocations predominates, the hardening increases linearly with increasing concentration.

Keywords: dislocations, alloys, solid solution hardening, alloying elements

For citation: Malashenko V.V., Gladkaya A.D., Malashenko T.I. Specific features of solid solution hardening of metals and alloys under high-strain-rate deformation // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.36-38. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).36-38](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).36-38)

Твердорастворное упрочнение металлов и сплавов, реализуемое посредством добавления в расплавы легирующих элементов, является одним из традиционных способов улучшения механических свойств этих функциональных материалов. Механическое поведение сплавов с легирующими добавками при квазистатической деформации изучено детально и основательно, однако в условиях высокоэнергетических воздействий на такие сплавы характер влияния этих добавок на механические свойства претерпевает существенные изменения [1]. Такие воздействия реализуются, в частности, при ковке и штамповке, лазерной и высокоскоростной обработке, динамическом канально-угловом прессовании, сварке взрывом [1-4].

Механические свойства твердых тел, как известно, в значительной степени определяются зарождением, размножением и движением дислокаций — линейных дефектов кристаллической структуры, являющихся основными носителями пластической деформации, а также их взаимодействием с другими структурными несовершенствами твердых тел. Легирующие примеси являются точечными дефектами типа центра дилатации. Их внедрение в сплавы приводит к возникновению дополнительных упругих полей, затрудняющих дислокационное движение, в результате чего происходит твердорастворное упрочнение материала. В случае квазистатической деформации дислокации преодолевают встречающиеся на своем пути препятствия с помощью термических

флуктуаций, поскольку их кинетическая энергия меньше уровня потенциального барьера, создаваемого легирующими элементами. Высокоскоростная деформация характеризуется надбарьерным скольжением дислокаций, которые при этом движутся со скоростями $10\text{--}10^3\text{ м/с}$, а скорость пластической деформации может достигать $10^3\text{--}10^8\text{ с}^{-1}$. Такие процессы чаще всего анализируются методом молекулярной динамики, однако он не позволяет получать аналитические зависимости механических свойств материала от характеристик легирующих примесей, в частности, от их концентрации и параметра несоответствия. Целью настоящей работы является получение аналитических выражений для величины дополнительных деформирующих напряжений сплавов, обусловленных наличием легирующих элементов.

Поставленная задача решается в рамках теории динамического взаимодействия структурных дефектов [5–8], основанной на модифицированной модели Гранато—Люкке, в рамках которой дислокация рассматривается как тяжелая упругая струна. При надбарьерном скольжении дислокации упругие поля, создаваемые атомами легирующих элементов, возбуждают поперечные дислокационные колебания в плоскости скольжения. При этом механизм диссипации заключается в необратимом переходе кинетической энергии поступательного движения дислокации в энергию ее изгибных колебаний. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний, прежде всего к наличию в нем щели Δ

$$\omega^2(p_z) = s^2 p_z^2 + \Delta^2.$$

Здесь s — скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн.

Наличие щели в спектре дислокационных колебаний означает, что дислокация совершает колебания в параболической потенциальной яме. Однако эта яма перемещается по кристаллу вместе с колеблющейся дислокацией. Такая потенциальная яма может быть создана коллективным взаимодействием точечных дефектов и дислокаций ансамбля с каждой движущейся дислокацией [6]. Конкуренция этих взаимодействий определяет конкретный вид зависимости деформирующих напряжений от концентрации легирующего элемента и параметра его несоответствия.

Пусть ансамбль бесконечных краевых дислокаций движется под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в плоскости XOZ в кристалле, содержащем хаотически распределенные атомы легирующего элемента. Линии дислокаций параллельны оси OZ , их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$ одинаковы и параллельны оси OX . Положение k -й дислокации определяется функцией

$$X_k = vt + w_k. \quad (1)$$

Здесь w_k — случайная величина, описывающая изгибные колебания дислокации, возбужденные ее взаимодействием с хаотически распределенными дефектами. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Уравнение движения дислокации может быть представлено в следующем виде

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - s^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = b[\sigma_0 + \sigma_{xy}] - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (2)$$

где σ_{xy} — компонента тензора напряжений, создаваемых легирующими примесями на линии дислокации, m — масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми), B — константа демпфирования, обусловленная фононными, магннными или электронными механизмами диссипации.

Как и в работе [6], используем плавное обрезание поля упругих напряжений атома легирующего элемента на расстояниях порядка его радиуса R

$$\sigma_{xy}(\mathbf{r}) = \mu R^3 \chi \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{1 - \exp(-r/R)}{r}. \quad (3)$$

Здесь μ — модуль сдвига, χ — параметр несоответствия атома легирующего элемента, который определяется выражением

$$\chi = \left| \frac{R - R_M}{R_M} \right|, \quad (4)$$

где R_M — радиус атома матрицы. Фурье-образ этой компоненты упругого поля, который необходим для выполнения дальнейших вычислений, имеет вид

$$\sigma_{xy}(\mathbf{p}) = 4\pi\mu R^3 \chi \frac{p_x p_y}{p^2} \frac{R^2}{p^2 + R^2}. \quad (5)$$

Атомы легирующего элемента распределены по кристаллу случайным образом. При выполнении вычислений воспользуемся стандартной процедурой усреднения по хаотическому распределению этих атомов и по длине дислокации.

Основываясь на результатах теории динамического взаимодействия структурных дефектов [6], получим выражение для вклада атомов легирующего элемента в величину деформирующих напряжений в следующем виде

$$\sigma = cK \int_{-\infty}^{\infty} dp_y \int_{\frac{\Delta}{v}}^{\infty} dp_x \frac{p_x |\sigma_{xy}(p_x, p_y, 0)|^2}{\sqrt{p_x^2 - \frac{\Delta^2}{v^2}}}. \quad (6)$$

Здесь c — концентрация легирующего элемента, K — константа, зависящая от упругих свойств кристалла.

Рассмотрим случай, когда плотность дислокаций невысока, и главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие легирующих примесей с дислокацией. Такая ситуация реализуется при выполнении условия

$$\frac{1}{b^2} \chi \sqrt{c} > \rho. \quad (7)$$

Выполним численные оценки. Для типичных значений $\epsilon = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10}\text{ м}$, $c = 10^{-2}$ и плотности дислокаций, не превышающей $\rho = 10^{14}\text{ м}^{-2}$, это условие выполняется. В этом случае уравнение для нахождения спектральной щели имеет вид

$$\Delta^2 = \frac{2cb^2\mu^2\chi^2}{\pi m^2} \iiint d^3p \frac{1}{\Delta^2 + c^2 p_z^2 - p_x^2 v^2} \frac{p_x^4 p_y^2}{p^4} \frac{R^2}{(p^2 + R^2)^2}. \quad (8)$$

Выполняя необходимые вычисления, получаем, что введение легирующих элементов повышает уровень деформирующих напряжений на величину

$$\sigma = \frac{4\pi(1-\gamma)\mu\chi}{\rho bs} \dot{\varepsilon} \sqrt{c}, \quad (9)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость пластической деформации, γ — коэффициент Пуассона.

Такая зависимость экспериментально наблюдалась в работе [9].

Если же плотность подвижных дислокаций достигает значений $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и выше, главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций ансамбля, а сама щель тогда описывается выражением

$$\Delta = \sqrt{\frac{\pi\mu\rho b^2}{6m(1-\gamma)}}. \quad (10)$$

В этом случае величина упрочнения характеризуется линейной зависимостью от концентрации легирующего компонента

$$\sigma = \frac{2(1-\gamma)\chi^2\mu}{\rho^2 b^3 s} \dot{\varepsilon} c. \quad (11)$$

Такая зависимость наблюдалась в экспериментальной работе [10].

Заключение

Из проведенного анализа следует, что при высокоскоростной деформации величина твердорастворного упрочнения линейно возрастает с увеличением скорости пластической деформации, а ее концентрационная зависимость определяется соотношением концентрации легирующего компонента и плотности дислокаций. В случае доминирования коллективного взаимодействия атомов легирующего компонента имеем корневую зависимость, если же формирование спектра колебаний определяется коллективным взаимодействием дислокаций, зависимость от концентрации становится линейной.

Полученные результаты могут быть полезными при определении оптимальной концентрации легирующих добавок в сплавах, изделия из которых в процессе эксплуатации подвергаются высокоэнергетическим воздействиям.

- Малашенко В.В. Зависимость динамического предела текучести бинарных сплавов от плотности дислокаций при высокоэнергетических воздействиях // Физика твердого тела. 2020. Т.62. №10. С.1683-1685. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.10.49919.075>
- Малашенко В.В. Влияние коллективных эффектов на концентрационную зависимость предела текучести сплавов при высокоэнергетических воздействиях // Письма в ЖТФ. 2020. Т.46. №18. С.39-41. DOI: <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.18.50001.18399>
- Варюхин В.Н., Малашенко В.В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. №9. С.1213-1218. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0367676518090259>
- Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. Vol.404. №21. P.3890-3893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.07.122>
- Asay J.R., Fowles G.R., Durall G.E. et al. Effect of point defect on elastic precursor decay in LiF // Journal of Appl. Phys. 1972. Vol.43. №5. P.2132-2145. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1661464>
- Charit I., Seok C.S., Murty K.L. Synergistic effects of interstitial impurities and radiation defects on mechanical characteristics of ferritic steels // Journal of Nuclear Materials. 2007. Vol.361. №2. P.262-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.003>

References

- Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe. Journal of Applied Physics, 2011, vol.110, iss.12. Article number: 123515. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3670001>
- Lee J., Veysset D., Singer J. et al. High strain rate deformation of layered nanocomposites. Nature Communications, 2012, no.3. Article number: 1164. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2166>
- Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers. EPL, 2016, vol.114, no.6. Article number: 65001. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/65001>
- Tramontina D., Erhart P., Germann T. et al. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics, 2014, vol.10, no.1, pp.9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2013.10.007>
- Malashenko V.V. Zavisimost' dinamicheskogo predela tekuchesti binarnykh splovov ot plotnosti dislokatsiy pri vysokoenergeticheskikh vozdeystviyakh [Dependence of Dynamic Yield Stress of Binary Alloys on the Dislocation Density under High-Energy Impacts]. Fizika tverdogo tela, 2020, vol. 62, no.10, pp. 1683-1685.
- Malashenko V.V. Vliyaniye kolektivnykh effektiv na kontsentratsionnuyu zavisimost' predela tekuchesti splovov pri vysokoenergeticheskikh vozdeystviyakh [The Influence of Collective Effects on the Concentration Dependence of the Yield Stress of Alloys under High-Energy Impacts]. Pis'ma v ZHTF, 2020, vol 46, no.18, pp. 39-41.
- Varyukhin V.N., Malashenko V.V. Dinamicheskiye efekty v defektnoy sisteme kristala [Dynamic Effects in a Defective System of Crystal] Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya, 2018, vol.82, no. 9, pp.37-42.
- Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects. Physica B: Phys. Cond. Mat., 2009, vol.404, no.21, pp.3890-3893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.07.122>
- Asay J.R., Fowles G.R., Durall G.E. et al. Effect of point defect on elastic precursor decay in LiF. Journal of Appl. Phys., 1972, vol.43, no.5, pp.2132-2145. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1661464>
- Charit I., Seok C.S., Murty K.L. Synergistic effects of interstitial impurities and radiation defects on mechanical characteristics of ferritic steels. Journal of Nuclear Materials, 2007, vol.361, no.2, pp.262-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.003>
- Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe // Journal of Applied Physics. 2011. V.110. Issue 12. Article number: 123515. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3670001>
- Lee J., Veysset D., Singer J. et al. High strain rate deformation of layered nanocomposites // Nature Communications. 2012. №3. Article number: 1164. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2166>
- Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL. 2016. V.114. №6. Article number: 65001. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/65001>
- Tramontina D., Erhart P., Germann T. et al. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics. 2014. V.10. №1. P.9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2013.10.007>