

PACS: 61.72.Ji, 61.72.Lk

В.В. Малашенко^{1,2}, А.Д. Гладкая³, Т.И. Малашенко^{3,4}

НЕУПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

²Донецкий национальный университет

³Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского

⁴Донецкий национальный технический университет

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2020 года

Теоретически проанализированы неупругие процессы в состаренных бинарных сплавах в условиях высокоэнергетических внешних воздействий. На основе теории динамического взаимодействия структурных дефектов получена аналитическая зависимость динамического предела текучести от концентрации структурных дефектов и упругих модулей кристалла. Определены условия нарушения соотношения Тейлора в бинарных сплавах. Приведено качественное объяснение полученного результата.

Ключевые слова: структурные дефекты, дислокации, прочность, пластичность, высокоскоростная пластическая деформация, зоны Гинье–Престона, биметаллические сплавы

Бурное развитие науки и техники способствует все более широкому распространению процессов, связанных с высокоэнергетическим воздействием на различные функциональные материалы, в том числе биметаллические сплавы. Последние используются в различных отраслях промышленности, в частности самолето- и машиностроении, космической индустрии [1]. Современные сверхмощные лазеры способны создавать давления и температуры, по величине сопоставимые со значениями этих термодинамических параметров в условиях Большого Взрыва, в результате которого, согласно современным представлениям, и возникла наша Вселенная. Кроме того, интенсивное внешнее воздействие реализуется в таких процессах, как обработка и сварка металлов взрывом, ударное повреждение авиационных и космических летательных аппаратов и конструкций, высокоскоростная обработка материалов, динамическое канально-угловое прессование, воздействие высокоэнергетическими корпускулярными потоками, в экспериментах по пробиванию оболочек [2–7]. Неупругие процессы, происходящие в функциональных материалах под действием высоких энергий, весьма существенно отличаются от подобных процессов в обычных условиях.

При исследовании материалов в условиях интенсивных внешних воздействий весьма эффективны методы компьютерного моделирования, в частности метод молекулярной динамики. Этот метод позволяет изучать многие важные особенности быстротекущих процессов, однако не дает возможности получать аналитические зависимости механических свойств материалов от их структурных особенностей. Развита нами теория динамического взаимодействия структурных дефектов позволяет в целом ряде случаев находить аналитические решения задач такого типа, объясняя имеющиеся экспериментальные данные и предсказывая новые динамические эффекты. Цель настоящей работы – исследование неупругих процессов в состаренных биметаллических сплавах в условиях высокоэнергетических внешних воздействий.

Рассмотрим движение ансамбля бесконечных краевых дислокаций под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в кристалле, содержащем зоны Гинье–Престона и атомы второго компонента. Линии дислокаций параллельны оси OZ , их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$ одинаковы и параллельны оси OX . Плоскость скольжения дислокаций совпадает с плоскостью XOZ .

Плоскости зон Гинье–Престона параллельны плоскости скольжения дислокаций, а их центры распределены в кристалле случайным образом. Для простоты все зоны будем считать одинаковыми, т.е. имеющими одинаковые радиусы R , одинаковую толщину, равную диаметру атома второго компонента, и одинаковые векторы Бюргерса $\mathbf{b}_0 = (0, -b_0, 0)$, параллельные оси OY .

Динамический предел текучести бинарного сплава является суммой вкладов динамического торможения дислокации зонами Гинье–Престона τ_G , торможения атомами второго компонента τ_d и торможения другими дислокациями τ_T , фононного торможения τ_f . Вклады дислокаций и фононного торможения хорошо известны, вклады зон Гинье–Престона и атомов второго компонента могут быть вычислены согласно теории динамического взаимодействия структурных дефектов по формуле

$$\tau = \frac{nb}{8\pi^2 m} \int d^3 q |q_x| \cdot |\sigma_{xy}(\mathbf{q})|^2 \delta(q_x^2 v^2 - \omega^2(q_z)), \quad (1)$$

где n – объемная концентрация соответствующих структурных дефектов; b – модуль вектора Бюргерса; m – масса единицы длины дислокации; $\sigma_{xy}(\mathbf{q})$ – фурье-образ соответствующей компоненты тензора напряжений, создаваемых дефектом; $\omega(q_z)$ – спектр дислокационных колебаний.

Выполняя необходимые вычисления, получаем выражение для динамического предела текучести бинарного сплава в следующем виде:

$$\tau = \mu \left(\frac{\rho bc}{\dot{\epsilon}_{cr}} \right) \left(n_G b^2 R + n_d \chi^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{cr}} \right) + \alpha \mu b \sqrt{\rho} + B \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\rho bc} \right), \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига; ρ – плотность дислокаций; n_G – объемная концентрация зон Гинье–Престона; n_d – безразмерная концентрация атомов второго компонента; χ – параметр их размерного несоответствия; α – безразмерный коэффициент порядка единицы; B – константа демпфирования, обусловленная фононными, магнонными или электронными механизмами диссипации; $\dot{\epsilon}$ – скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_{cr}$ – критическая скорость пластической деформации, ниже которой динамическое торможение дислокаций зонами Гинье–Престона приобретает характер сухого трения, т.е. перестает зависеть от скорости движения дислокаций:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \rho b c \sqrt{\rho b^2 + \sqrt{n_d \chi^2}}. \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда главный вклад в формирование колебательного спектра дислокации вносит коллективное дислокационное взаимодействие, а главный вклад в динамическое торможение дислокаций – их взаимодействие с зонами Гинье–Престона. Это возможно при больших значениях плотности дислокаций и концентраций зон Гинье–Престона: $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-2}$, $n_G = 10^{23} - 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Выполним численные оценки основных вкладов в динамический предел текучести сплавов. Для значений $\rho = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $b = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $R = 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $n_d = 10^{-4}$, $\chi = 10^{-1}$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $n_G = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $B = 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\dot{\epsilon} = 10^6 \text{ с}^{-1}$ получим следующие оценки порядка величины, Па: $\tau_T = 10^8$, $\tau_G = 10^8$, $\tau_d = 10^5$, $\tau_f = 10^{-7}$.

При таких значениях параметров основной вклад в торможение ансамбля движущихся дислокаций вносят торможение зонами Гинье–Престона и торможение дислокациями, определяемое соотношением Тейлора. Зависимость динамического предела текучести бинарного сплава от плотности дислокаций в этом случае становится немонотонной: корневой рост сменяется спадом. Максимум соответствует значению плотности, при которой дислокации начинают вносить главный вклад в формирование дислокационного спектра.

Отклонение от соотношения Тейлора в условиях высокоэнергетических воздействий является важной особенностью неупругих процессов, реализующихся при надбарьерном движении дислокаций. Чтобы дать качественное объяснение данному эффекту, необходимо учесть, что механизм диссипации дислокационной энергии при высокоскоростной деформации заключается в необратимом переходе кинетической энергии поступательного движения дислокации в энергию ее изгибных колебаний в плоскости скольжения, которые возникают при взаимодействии дислокаций с другими дефектами структуры. Именно это взаимодействие оказывает определяющее влияние на формирование механических свойств различных материалов.

Как следует из теории динамического взаимодействия дислокаций со структурными дефектами [2–7], динамика дислокаций при таком механизме диссипации зависит от вида спектра дислокационных колебаний, в первую

очередь от наличия щели в дислокационном спектре. При интенсивных внешних воздействиях наблюдается существенное возрастание дислокационной плотности, которая может достигать значений $\rho = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. В этом случае именно коллективное междислокационное взаимодействие является доминирующим при формировании дислокационного спектра и прежде всего спектральной щели.

Наличие такой щели означает, что дислокация совершает колебания в параболической потенциальной яме, перемещающейся по кристаллу вместе с ней. Рост плотности дислокаций приводит к увеличению щели, т.е. углублению потенциальной ямы, ограничивающей размах дислокационных колебаний, а следовательно, снижает эффективность динамического торможения. При высокой концентрации в сплаве зон Гинье–Престона именно они вносят главный вклад в динамическое торможение дислокаций. Поскольку с ростом плотности дислокаций величина этого торможения снижается, предел текучести начинает убывать, и возникает отклонение плотностной зависимости предела текучести бинарного сплава от соотношения Тейлора.

Полученный результат может быть весьма полезным при анализе поведения бинарных сплавов в условиях экстремальных нагрузок.

1. *P.N. Mayer, A.E. Mayer*, J. Appl. Phys. **120**, 075901 (2016).
2. *J. Lee, D. Veysset, J. Singer, M. Retsch, G. Saini, T. Pezeril, K. Nelson, E. Thomas*, Nat. Commun. **3**, 1164 (2012).
3. *D. Batani*, EPL **114**, 65001 (2016).
4. *D. Tramontina, P. Erhart, T. Germann, J. Hawreliak, A. Higginbotham, N. Park, R. Ravelo, A. Stukowski, M. Suggit, Y. Tang, J. Wark, E. Bringa*, High Energy Density Physics **10**, 9 (2014).
5. *D. Batani, H. Stabile, A. Ravasio, G. Lucchini, F. Strati, T. Desai, J. Ullschmied, E. Krouscky, J. Skala, L. Juha, B. Kralikova, M. Pfeifer, Ch. Kadlec, T. Mocek, A. Präg, H. Nishimura, Y. Ochi*, Phys. Rev. **E68**, 067403 (2003).
6. *Y. Wang, Z.-K. Liu, L.-Q. Chen, L. Burakovsky, D.L. Preston, W. Luo, B. Johansson, R. Ahuja*, Phys. Rev. **B71**, 054110 (2005).
7. *D. Batani, F. Strati, H. Stabile, M. Tomasini, G. Lucchini, A. Ravasio, M. Koenig, A. Benuzzi-Mounaix, H. Nishimura, Y. Ochi, J. Ullschmied, J. Skala, B. Kralikova, M. Pfeifer, Ch. Kadlec, T. Mocek, A. Präg, T. Hall, P. Milani, E. Barborini, P. Piseri*, Phys. Rev. Lett. **92**, 065503 (2004).
8. *В.В. Малащенко*, ФТТ **10**, 1683 (2020).
9. *В.В. Малащенко*, Письма в ЖТФ **46**, 39 (2020).
10. *V.V. Malashenko*, Physica B Condens. Matter **404**, 3890 (2009).
11. *В.Н. Варюхин, В.В. Малащенко*, Известия РАН. Серия физическая **82**, 37 (2018).

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

INELASTIC PROCESSES IN BIMETALLIC ALLOYS UNDER INTENSIVE EXTERNAL IMPACT

The inelastic processes in the aged binary alloys under high-energy external influences have been theoretically analyzed. The analytical dependence of the dynamic yield stress on the defect concentration and elastic constants has been obtained on the basis of the theory of dynamical interaction. The conditions for deviation of the Taylor relation in binary alloys have been determined. A qualitative explanation of the obtained result is given.

Keywords: structural defects, dislocations, strength, plasticity, high-rate strain, Guinier–Preston zones, bimetallic alloys