

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АМПЛИТУДЫ СМЕЩЕНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОГО СЕГМЕНТА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Влияние акустических волн на прочностные свойства материалов широко используется в современных технологиях обработки для придания образцу требуемых свойств. Кроме того, в процессе эксплуатации различные детали и узлы технических систем могут подвергаться длительному вибрационному воздействию, что приводит к так называемым усталостным процессам с последующим снижением прочностных свойств и разрушением. Именно поэтому, ввиду прикладной значимости указанного явления, изучение механизмов, вызывающих изменение физических характеристик кристаллических сред при воздействии на них высокочастотной нагрузки, в том числе ультразвукового диапазона, является важной задачей физического материаловедения.

Многие работы, как правило, представляли собой непрерывные описания ультразвукового разупрочнения [1-4], однако, микроструктурные исследования на уровне дислокаций в металлах, возбужденных ультразвуком, проводились очень редко.

Целью данной работы является анализ процессов, происходящих на микроуровне в поликристаллической модельной среде, содержащей протяженные дефекты в сочетании с точечными атомами примесей, под действием упругого поля стоячей акустической волны.

В качестве объекта был выбран модельный материал с границированной кристаллической структурой. Исходный материал находится в мелкокристаллическом состоянии и подвергается знакопеременным нагрузкам, которые в области низких частот могут соответствовать режиму усталостных испытаний, а во всем диапазоне акустического спектра могут вызывать дополнительное изменение дефектной структуры. с изменением прочностных характеристик.

Фактически с помощью метода цифрового моделирования анализируется динамика дефектной структуры модельного материала, содержащего взаимосвязанные конгломераты протяженных и точечных дефектов. Дефекты, по мере изменения амплитуды и частоты силового знакопеременного воздействия в данной локальной области среды, могут претерпевать изменение своего состояния, тем самым влияя как на локальные, так и на макроскопические интегральные свойства прочностного характера. Разработанная модель основана на

выявлении вязкой динамики сегмента дислокации в поле примесных атомов, влияние которых на сегмент представлено в приближении сил трения со стороны окружающей среды. Другими словами, движение сегмента дислокации представлено в модели Франка-Рида под действием переменного упругого напряжения.

Движение отрезка анализируется в одночастичном приближении, а исходное уравнение имеет традиционный вид движения упругой струны с распределенной массой и силами упругого самовоздействия на фоне действия вязких сил:

$$A \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + B \frac{\partial \zeta}{\partial t} - C \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} = b\sigma \exp(i\omega t) \quad (1)$$

где ζ – смещение отрезка из положения равновесия по его длине; λ – длина дислокационного сегмента; $A = \rho b^2 / \pi$ – эффективная масса сегмента дислокации на единицу длины; ρ – объемная плотность; b – определение векторов; B – коэффициент динамической вязкости; $C = \frac{2Gb^2}{\pi(1-\nu)}$ – коэффициент эластичности сегмента; G – модуль упругости среды; ν – коэффициент Пуассона; σ – амплитудное значение переменного напряжения в поле акустической волны; ω – круговая частота акустической волны; t – время.

Для формализации задачи уравнение движения отрезка можно представить в виде, приведенном к единице массы отрезка:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \omega_0^2 \zeta = \sigma' \exp(i\omega t) \quad (2)$$

где β – модифицированный индекс вязкости; ω_0^2 – квадрат собственной частоты упругого сегмента; σ' – переопределенная амплитуда упругого воздействия на единицу длины.

Анализ движения дислокационного сегмента проводился с акцентом на выявление динамики и величины смещения сегмента из положения равновесия. Учет перемещения сегмента включает в себя и то, что само движение дислокаций в среде уже приводит к пластичности и некоторому дефекту упругости. В заданном представлении нет смысла анализировать смещение отрезка от состояния равновесия на величину порядка длины самого отрезка, что обычно используется в оценках при статическом нагружении. Действительно, генерация новых дефектов по сценарию Франка-Рида при статическом нагружении все же отличается от условий при воздействии переменных упругих полей, где необходимо учитывать фазовые ограничения. При этом само уравнение (1) соответствует малым колебаниям отрезка как упруго закрепленной струны. То есть изгиб сегмента и его динамика при предельных отклонениях не соответствуют (1). По этой причине значение

амплитуды малого смещения в центре сегмента можно принять в качестве основного для последующего анализа состояния среды при воздействии знакопеременной нагрузки. В общем случае решение уравнения, как известно, представляет собой суперпозицию двух вкладов, то есть вклада в движение в режиме свободных колебаний и вклада в перемещение на частоте внешней вынуждающей силы по формуле (3).

$$\zeta = \frac{\sigma'}{\left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \exp \left[i \left(\omega t - \arctan \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \right] + \left[C_1 \exp \left[i(\omega_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} t \right] + C_2 \exp \left[-i(\omega_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} t \right] \right] \exp(-\beta t) \quad (3)$$

Следуя решению (3), можно представить среднюю амплитуду смещения дислокационного сегмента различной длины в поле упругого нагружения (рис. 1).

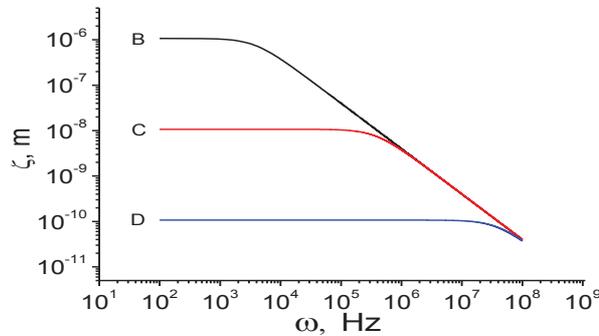


Рисунок 1 – Усредненная амплитуда смещения дислокационного сегмента длиной (м): 10^{-5} (B), 10^{-6} (C), 10^{-7} (D) в модельном материале с коэффициентом вязкости $B = 10^{-1}$ Па с при действии знакопеременного нагружения с амплитудой упругого напряжения 10^6 Па. Модуль упругости материала принят $2,6 \cdot 10^{10}$ Па, объемная плотность $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, вектор Бюргерса $4 \cdot 10^{-10}$ м

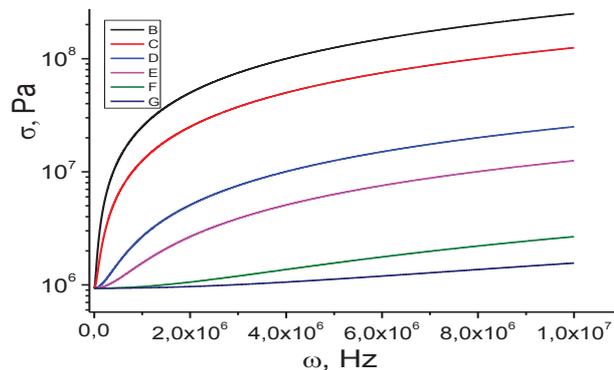


Рисунок 2 – Амплитуда переменного упругого напряжения, необходимая для того, чтобы среднее значение амплитуды смещения сегмента достигло 10 % длины сегмента. Длина сегмента дислокации 10^{-5} м, коэффициент вязкости B , (Па с): 10^{-2} (B), $5 \cdot 10^{-3}$ (C), 10^{-3} (D), $5 \cdot 10^{-4}$ (E), 10^{-4} (F), $5 \cdot 10^{-6}$ (G). Модуль упругости материала принят $2,6 \cdot 10^{10}$ Па, объемная плотность $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, вектор Бюргерса $4 \cdot 10^{-10}$ м

Таким образом, на примере смещения сегмента дислокации, представленного на рисунке 1 показано влияние среды при заданной амплитуде колебаний упругих напряжений на перемещение отрезков различной длины при конечной силе вязкого трения. То есть для некоторого реалистического приближения среды, содержащей дислокационные сегменты нескольких характерных длин, усредненное смещение сегмента соответствует уменьшению по вязкости.

Из рис. 1 следует, что из выбранного диапазона значений длины сегментов относительно небольшие по перемещению дислокационные сегменты не подвержены изменению частоты акустического упругого поля в достаточно широком диапазоне. Это связано с высоким значением резонансной частоты и действием фактора вязкости.

На частотах порядка десятков мегагерц еще реализуются эффекты частотной зависимости амплитуды смещения, а также для более длинных отрезков, для которых амплитуда смещения уменьшается, начиная с частот порядка сотен герц. Такое поведение характерно для динамики в условиях преобладания сил вязкого трения. При этом резонансная частота является максимальным параметром, а для отрезков относительно большой длины смещение максимально и достигает примерно 10% длины самого отрезка по мере уменьшения сил вязкости при малых упругих напряжениях (рис. 2).

Такое поведение дислокационного сегмента типично в диапазоне частот ниже резонансного диапазона. Однако даже на частотах порядка резонанса коэффициент демпфирования за счет вязкого трения может быть подавлен за счет эффекта поглощения энергии отрезком при совпадении частот. Таким образом, можно предположить, что возбуждаемые в образце ультразвуковые колебания могут приводить к снижению пороговых напряжений, необходимых для деформации данного уровня. Следует отметить, что подобные зависимости сочетаются с результатами ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований влияния амплитудно-частотных параметров нагружения на изменения усталостных характеристик и физико-механических свойств материалов [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. B.N. Mordyuk and G.I. Prokopenko, J. Sound Vibrat. 308 (2007) p. 855.
2. H. O. K. Kirchner, W. K. Kromp, F. B. Prinz, P. Trimmel, Mater. Sci. Eng. 68 (1985) p. 197.
3. K. V. Sapozhnikov, S. N. Golyandin, S. B. Kustov, J. Van Humbeeck, R. De Batist, Acta Mater. 48 (2000) p. 1141.
4. H. Huang, A. Pequegnat, B. H. Chang, M. Mayer, D. Du, Y. Zhou, J. Appl. Phys. 106 (2009) p. 113514.

5. Соболев В.Р. О влиянии сил вязкости на движение дислокационного сегмента и распространение упругих колебаний в металлах /В.Р.Соболев, О.Н. Мазуренко, П.Н.Логвинович, С.Е. Бельский, А.В.Блохин // Доклады национальной академии наук Беларуси. –2007. – Т.51. – № 3. – С.121–124.

УДК 621.165.532

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;
Адель Рашид,
А.И. Сурус, доц., канд. техн. наук;
(БГТУ, г. Минск)

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Большинство теоретических и экспериментальных исследований развития процесса усталостного разрушения выполнено без учета структурных и металлургических факторов, наличия упрочненных слоев и покрытий; тем самым затрудняется подбор оптимальных технологических параметров процессов поверхностного упрочнения. Исследования, проводимые в этом направлении, могут обеспечить совершенствование составов и режимов поверхностного упрочнения и следовательно повышение эксплуатационной долговечности изделий.

Усталостные испытания образцов из конструкционных сталей, упрочненных по различным режимам, проводились на оборудовании, описанном в работах [1-3]. Результаты усталостных испытаний при реализации знакопеременного изгиба на частоте 18 кГц представлены на рис. 1–2.

В ходе проведения исследований было установлено увеличение усталостных характеристик для образцов, упрочненных борированием и боросилицированием (рис. 2) по сравнению с цементированными. Связано это главным образом с образованием в поверхностных упрочненных слоях остаточных напряжений сжатия. С увеличением времени и температуры насыщения наблюдается снижение усталостных характеристик образцов при упрочнении борированием (при содержании Si в сплаве до 5 %). При боросилицировании (содержание Si от 20%) отмечается их незначительное уменьшение при времени насыщения

2,5–4 часа и температуре обработки 1020 °С (см. рис. 3–4).