

Исследование воздействия ультразвука на деформацию кристаллических материалов

© В.В. Благовещенский, И.Г. Панин

Костромской государственной технологической университет,
Кострома, Россия

E-mail: igpanin@list.ru

(Поступила в Редакцию 17 февраля 2011 г.
В окончательной редакции 30 марта 2011 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования пластической деформации монокристалла под действием одновременно приложенных постоянной и знакопеременной нагрузок. Дано краткое описание модели зарождения и движения дислокационных линий на площадке моделирования с расположенными на ней случайным образом дефектами. Выделены зоны изменения кривой пластичности при воздействии ультразвуковой нагрузки, влияние амплитуды, частоты и времени ее приложения. Показано существование частоты, при которой деформация материала максимальна.

1. Введение

Ультразвуковые колебания оказывают значительное влияние на процесс пластического деформирования и пластического течения металлов и сплавов. Использование ультразвука (УЗ) позволяет интенсифицировать технологические процессы обработки материалов, а также расширить область их применения. Впервые эффект пластификации материала был замечен в уменьшении сил резания металлов при возникновении вибраций. Практический интерес к этому вопросу возник в середине 50-х годов XX века: в 1955 г. Блах и Лангенеккер показали проявление акустопластического эффекта в виде уменьшения напряжения течения при одновременном воздействии статической и колебательной нагрузки на образец [1], а в 1956 г. Марков и Воронин применили ультразвук при резании металлов [2]. В настоящее время исследования продолжают во многих зарубежных и отечественных научных школах. Так, в Институте технической акустики НАН Белоруссии под руководством академика Клубовича проводятся разнообразные исследования применения УЗ, в том числе и изучение влияния УЗ-поля на динамику дефектов кристаллической решетки, на процессы деформации материалов [3,4]. При воздействии УЗ на процесс волочения удалось существенно (до 60%) снизить прикладываемое постоянное усилие [5]. Практическое применение УЗ в процессе обработки материалов достаточно развито, в теоретическом же плане остается еще много нерешенных вопросов. Например, почему только в ультразвуковом диапазоне наблюдается пластификация материала или от чего зависит частота максимального проявления эффекта?

В настоящей работе рассмотрены теоретические аспекты воздействия УЗ на деформацию материалов и представлены результаты компьютерного моделирования деформации монокристаллов при одновременном воздействии постоянного и знакопеременного усилия УЗ-деформирования. В модели, основанной на движении

дислокационных линий (ДЛ) по площадке моделирования, реализованы процессы одновременного зарождения и движения нескольких дислокаций. Среда считается изотропной, неограниченной и однородной. На площадке моделирования (рис. 1), находящейся в плоскости скольжения образца, случайным образом согласно равномерному закону распределения расположены точечные дефекты одинакового типа и мощности. Точечные дефекты неподвижны и их мощность характеризуется углом срыва с них ДЛ. Движение дислокаций происходит под действием приложенной к образцу нагрузки, состоящей из постоянной (усилие сжатия) и (или) знакопеременной частей.

Представленная в настоящей работе математическая модель позволяет расширить круг исследуемых свойств материалов. В отличие от квазистатических моделей [6–10] она позволяет изучать и временные характеристики (например, скорость движения ДЛ) при различных способах нагружения образца.

2. Модель

Модель включает в себя два основных элемента, которые можно рассматривать и как самостоятельные

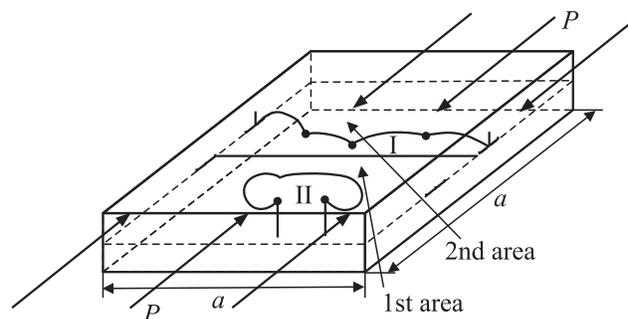


Рис. 1. Образец с дислокацией (I) и источником Франка-Рида (II).

модели: 1) источник размножения дислокаций по типу Франка-Рида (ФР) [11,12]; 2) движения ДЛ на площадке моделирования с системой точечных дефектов [13]. Развитие источника ФР в модели при переходе из одного положения в другое происходит согласно уравнению

$$c \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} = P - \frac{1}{R(\lambda, t)} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$U(0, t) = U(L, t) = 0, \quad U(\lambda, 0) = 0,$$

где $c = B/Gb^2$, $P = \sigma/Gb$, t — время, G — модуль сдвига, b — модуль вектора Бюргерса, B — коэффициент динамической вязкости, $R(\lambda)$ — радиус кривизны ДС, σ — величина внешнего напряжения, λ — криволинейная координата вдоль ДС, L — длина сегмента в криволинейных координатах. Уравнение (1) справедливо для таких смещений точек сегмента U , что $U \ll L$ для одного временного шага, при этом суммарное перемещение точек ДС за конечный интервал времени может быть значительным. В настоящей работе значения констант принимались равными $G = 1.8 \cdot 10^{10}$ Н/м², $b = 4 \cdot 10^{-10}$ м, $B = 2.9 \cdot 10^{-4}$ Па · с. Уравнение решается численно, методом сеток [14].

ДЛ представляет собой совокупность последовательно соединенных между собой дислокационных сегментов (ДС), каждый из которых развивается, как и источник ФР, согласно уравнению (1). Но в отличие от источника ДС никогда не доходит до момента самопересечения и поэтому не может быть источником ДЛ.

Предлагаемая модель содержит две площадки моделирования (рис. 1): на первой располагается несколько источников ФР, на второй происходит движение многих ДЛ, движущихся друг за другом. В данной модели не учитывается влияние температуры и взаимодействие между ДЛ. В начальный момент времени на второй площадке моделирования появляются и начинают движение заданное количество ДЛ, расположенных случайным образом, а на первой площадке начинают работу источники ФР со случайной длиной основания, расположенные по высоте данной площадки также случайно. В момент самопересечения („отшнуровывания“) дислокационного сегмента какого-либо источника на первой площадке на нижней границе второй площадки появляется новая ДЛ, которая сразу начинает движение, а источник продолжает свое развитие, генерируя новые дислокации. Все ДЛ, и первоначально заданные на площадке, и сгенерированные источником, при достижении ими верхней границы второй площадки для соблюдения однородности плотности дислокаций вновь появляются на нижней границе площадки. На каждом этапе движения всех ДЛ происходит расчет „заметаемой“ ими площади.

Следующие величины являются параметрами модели: размер площадки моделирования ($a = 35 \cdot 10^{-6}$ м — сторона, $S_{pl} = a^2$ — площадь, $h = 0.1a$ — высота); ρ — плотность дислокаций (одной ДЛ на площадке

соответствует значение $\rho = 0.8 \cdot 10^6$); количество стопоров на площадке (20–200), их мощность; величина прикладываемого на образец усилия.

При работе модели с постоянной нагрузкой задается напряжение σ и по результатам моделирования за определенный промежуток времени вычисляется величина деформации ε , соответствующая данному усилию. Полная относительная деформация ε складывается из упругой части ε_u и деформации, обусловленной движением дислокаций ε_d ,

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_d. \quad (2)$$

Упругая часть вычисляется по закону Гука как линейная зависимость от приложенного напряжения

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma}{G}. \quad (3)$$

Дислокационная составляющая вычислена через заметную площадь S_z по формуле

$$\varepsilon_d = \frac{bS_z}{hS_{pl}} \quad (4)$$

Поскольку на площадке моделирования одновременно двигаются несколько ДЛ, общая заметаемая площадь S_z складывается из суммы заметаемых площадей всеми ДЛ.

Меняем σ пошагово (шаг неравномерный) от 0 до 3.5 МПа и для каждого значения σ этого ряда рассчитываем с помощью модели значения ε . Таким образом, получаем пару значений (σ, ε), которая соответствует одной точке на кривой зависимости σ – ε . Найдя точки кривой для всех σ , строим кривую деформации. Все величины ε находятся при проведении вычислительного эксперимента с моделью для заданного промежутка времени. Поскольку распределение дефектов на площадке моделирования происходит случайным образом, необходимо многократно повторять опыты для достижения приемлемой достоверности (95%) результатов вычисления. Количество опытов рассчитывалось исходя из результатов десяти предварительных опытов и точности вычислений.

Для учета дополнительного гармонического воздействия (УЗ) на образец в данной модели в правую часть уравнения (1) добавляется следующее слагаемое:

$$Q = \frac{\sigma_0}{Gb} \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

где σ_0 — амплитуда, а f — частота гармонической нагрузки, которые добавляются к параметрам модели.

3. Результаты машинного эксперимента и их обсуждение

Кривая I на рис. 2 построена при постоянных усилиях в интервале времен 0 – $2.5 \cdot 10^{-5}$ с при двух начальных ДЛ, двух источниках с длиной основания $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м,

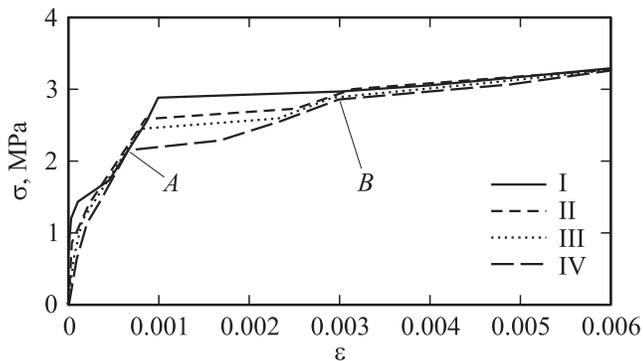


Рис. 2. Кривые деформации при постоянной (I) и разных амплитудах знакопеременной нагрузки в единицах σ_k (II–IV): II — 0,1, III — 0,2, IV — 0,3.

количестве стопоров на площадке $N = 100$ с мощностью $M = 90^\circ$. Мощность стопоров во всех дальнейших расчетах не меняется.

При добавлении знакопеременной нагрузки к постоянной (суммарная нагрузка) кривая деформации фрагментарно изменяет свою форму (рис. 2, кривая II). Она получена при суммировании постоянной нагрузки σ и гармонической с частотой 160 kHz и амплитудой $\sigma_0 = 0.1\sigma_k$ ($\sigma_k = 2.88$ МПа — критическое усилие, являющееся минимальным усилием, необходимым для открытия источника с длиной основания $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м) при тех же параметрах, что и линия I.

Видно, что значительные изменения произошли только на участке кривой от точки A до точки B, т.е. на этом участке для достижения одной и той же величины деформации при использовании знакопеременной нагрузки требуется меньшее значение постоянной. В точке A, в которой суммарная нагрузка становится больше величины σ_k , начинают работать дислокационные источники, тем самым порождая новые дислокации, приносящие значительный вклад в деформацию. В отличие от точки A, положение которой зависит в основном от значения прикладываемых нагрузок, положение точки B зависит и от частоты знакопеременной нагрузки (эта зависимость рассматривается ниже). В точке B величина постоянной нагрузки достигает такого уровня, что знакопеременная нагрузка данной частоты практически перестает оказывать влияние на генерацию источниками новых ДЛ. Таким образом, на участке AB ультразвук „помогает“ постоянному усилию нагружения деформировать образец, или, другими словами, проявляется эффект пластификации материала ультразвуком. Вне этого интервала существенных изменений кривой, а следовательно, и пластификации не наблюдается.

Если увеличивать величину амплитуды гармонической составляющей, то возрастает и величина отклонения кривой деформации с гармонической нагрузкой от кривой только с постоянной нагрузкой. На рис. 2 добавлены две кривые III и IV, построенные для той же частоты (160 kHz), но с амплитудами $0.2\sigma_k$ и $0.3\sigma_k$ соответствен-

но. Видно, что чем больше амплитуда приложенного ультразвука, тем больше будет величина отклонения от кривой деформации с постоянной нагрузкой и тем больший эффект пластификации, причем диапазон несовпадения так же увеличивается, поскольку возрастает абсцисса точки B.

Если при тех же параметрах увеличивать только время нагружения образца T , то кривые деформации и для постоянной и для суммарной нагрузок вытягиваются вдоль оси абсцисс, т.е. величина деформации увеличивается (рис. 3). Причем при увеличении времени в 2 раза величина деформации образца при постоянной нагрузке до точки текучести также увеличивается в 2 раза. Но при постоянной нагрузке, большей предела текучести, деформация увеличивается больше, чем в 3.5 раза; следовательно, значительно увеличивается и скорость деформации.

Частота 160 kHz в предыдущем эксперименте выбрана как частота, при которой величина деформации максимальна. Для установления данной зависимости были проведены эксперименты по измерению деформации образца при приложении к нему постоянной и знакопеременной нагрузки широкого диапазона ультразвуковых частот. Измерения проводились за промежуток времени $T = 8.5 \cdot 10^{-5}$ s. Параметры нагрузки были выбраны следующие: величина постоянной $\sigma = 0.95\sigma_k$, амплитуда знакопеременной $\sigma_0 = 0.1\sigma_k$. При таких нагрузках обеспечивались, во-первых, невозможность открытия источников только при постоянной нагрузке и, во-вторых, незначительная величина гармонического усилия по сравнению с постоянным.

Зависимость величины деформации ϵ от частоты ультразвука в диапазоне от 50 до 200 kHz (рис. 4, кривая I) имеет максимум при 163 kHz. При данной частоте источника ФР с длиной основания $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м генерируют новую дислокацию в каждый период знакопеременной нагрузки, или, другими словами, время генерации источником новой ДЛ совпадает с периодом ультразвука [12,15], вследствие чего отмечается значительный рост количества дислокационных линий, генерируемых источниками ФР.

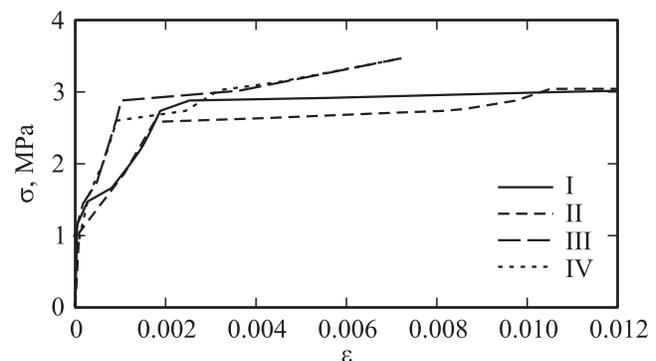


Рис. 3. Кривые деформации при разных временах и способах нагружения. Время, 10^{-5} s: I, II — 5, III, IV — 2.5. Нагрузка: I, III — постоянная, II, IV — на частоте 160 kHz.

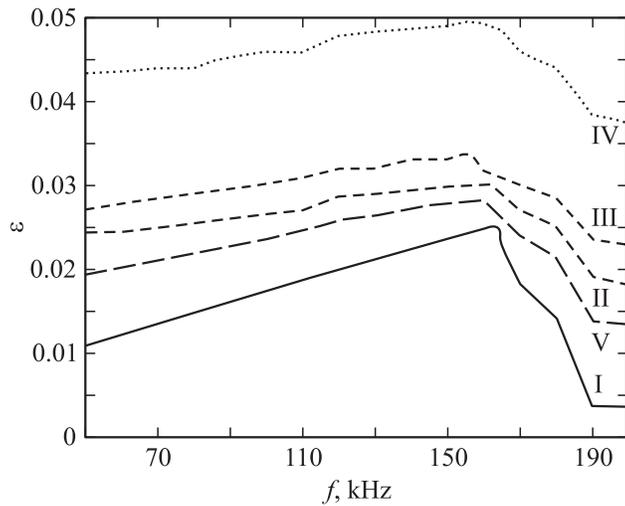


Рис. 4. Зависимость деформации от частоты знакопеременной нагрузки ($T = 8.5 \cdot 10^{-5}$ s) при различных числах источников (n) и разных длинах оснований (l) в единицах 10^{-6} м. I — $n = 2$, $l_1 = l_2 = 6$; II — $n = 2$, $l_1 = 5$, $l_2 = 6$; III — $n = 2$, $l_1 = 5$, $l_2 = 7$; IV — $n = 3$, $l_1 = 5$, $l_2 = 6$, $l_3 = 7$; V — $n = 3$, $l_1 = 5$, $l_2 = 6$, $l_3 = 7$ (источники распределены по нормальному закону).

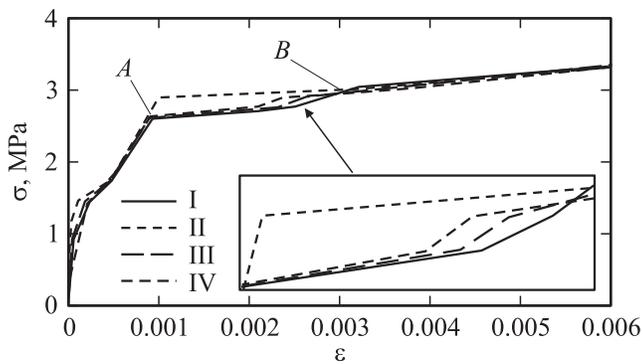


Рис. 5. Кривые деформации при разных частотах знакопеременной нагрузки. f , kHz: I — 163, III — 130, IV — 100. II — постоянная нагрузка.

Представленный результат наглядно демонстрирует эффект воздействия ультразвука на кристаллический материал, а также существование частоты ультразвука, при котором этот эффект достигает максимума.

При частотах, больших 190 kHz, наблюдается нулевая деформация (рис. 4, кривая I). Она обусловлена изначально существующими в образце ДЛ, при этом дислокационные источники не открываются и размножение дислокаций отсутствует.

При удалении в любую сторону от пика деформации ($f = 163$ kHz) на кривой I (рис. 4) изменяется и форма кривой деформации. Так, например, кривые деформации для частот $f = 130$ и 100 kHz (амплитуда $\sigma_0 = 0.1\sigma_k$, $T = 2.5 \cdot 10^{-5}$ s) представлены на рис. 5. Видно, что наибольшая эффективность воздействия ультразвука до-

стигается именно при частоте 163 kHz (кривая II), так как кривые III и IV на участке AB (рис. 5) лежат левее кривой I и, следовательно, деформация на этом участке при таких частотах меньше, причем с удалением от частоты 163 kHz деформация уменьшается.

Аналогичный эффект происходит и при удалении от пика деформации на кривой I рис. 4 в правую сторону.

В произвольном кристаллическом образце присутствуют дислокационные источники с разными длинами оснований, каждый источник будет вносить вклад в деформацию. Кривая I на рис. 4 построена при постоянном напряжении, равном $0.95\sigma_k$, где σ_k — критическое усиление для длины основания $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м. Источники с меньшей длиной основания при данном усилии не откроются и не дадут вклада в деформацию, поэтому их рассматривать не будем. У источников с большей длиной основания, например $l = 6 \cdot 10^{-6}$ и $7 \cdot 10^{-6}$ м, критическое напряжение будет равно примерно $0.83\sigma_k$ и $0.71\sigma_k$ соответственно, поэтому такие источники при усилении σ_k будут генерировать дислокации при любой частоте, и кривые зависимости деформации от частоты для этих источников будут представлять собой практически прямые линии. Совместная деформация с источниками разной длины основания при тех же самых параметрах нагружения ($\sigma = 0.95\sigma_k$, $\sigma_0 = 0.1\sigma_k$, $T = 8.5 \cdot 10^{-5}$ s) отображена на рис. 4 (кривые II–IV). Видно, что максимальная деформация на любой кривой достигается при частоте ультразвука, близкой к частоте, обеспечивающей критическое усиление σ_k для источника с длиной основания $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м, а наклоны всех кривых слева от пика деформации примерно одинаковы. Это означает, что пик деформации и форма кривой определяются источником, для которого прикладываемое среднее усилие является критическим, а средняя величина деформации и расположение кривой определяются источниками, у которых критическое усилие меньше σ_k .

Если предположить, что длины источников в образце распределены по нормальному закону с центром в точке $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м и стандартным отклонением $2 \cdot 10^{-6}$ м, то максимум на кривой деформации будет более выраженным (кривая V на рис. 4) за счет преобладания источников с критической длиной. При этом источники с меньшей длиной основания не открываются, а на источники с большей длиной приходится спад кривой распределения, и поэтому их количество невелико.

Таким образом, в работе дано объяснение эффекта воздействия ультразвука на монокристаллы, при котором пластическая деформация значительно увеличивается при незначительном дополнительном нагружении ультразвуком, показано влияние амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки на изменение кривой деформации. Впервые выделена частота ультразвука, при которой его воздействие на процесс деформации кристаллического материала максимально. Причиной данных особенностей является то, что время образования замкнутой петли совпадает с периодом ультразвуковых колебаний.

Список литературы

- [1] F. Blaha, B. Langenecker. *Naturwissenschaften* **42**, 20, 556 (1955).
- [2] А.И. Марков. Резание труднообрабатываемых материалов при помощи ультразвуковых и звуковых колебаний. Машгиз, М. (1962). 332 с.
- [3] В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Прокатка и волочение с ультразвуком. Наука и техника, Минск (1970). 288 с.
- [4] В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Ультразвук и пластичность. Наука и техника, Минск (1976). 446 с.
- [5] В.В. Клубович, В.В. Рубаник, Ю.В. Царенко, В.П. Бобров. Исследования влияния ультразвука на фазовые превращения и структурные свойства нагревостойкого кабеля после волочения. *Весті АН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. навук.* 3 (1994). Деп. в ВИНТИ, рег. № 1562-В93.4.
- [6] Г.Н. Дубнова, В.Л. Иденбом, А.А. Штольберг. *ФТТ* **10**, 1760 (1968).
- [7] А. Формен, М. Мейкин. Актуальные вопросы теории дислокаций. Мир, М. (1968). С. 200.
- [8] Н.В. Стратан, А.А. Предводителев. *ФТТ* **12**, 1729 (1970).
- [9] Л.Е. Попов, В.С. Кобытев, Т.А. Ковалевская. Пластическая деформация сплавов. *Металлургия*, М. (1984). 182 с.
- [10] В.И. Белан, А.И. Ландау. *ФММ* **65**, 2, 259 (1988).
- [11] Дж. Хирт, И. Лоте. Теория дислокаций. Атомиздат, М. (1972). 599 с.
- [12] В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. *ФММ* **103**, 4, 445 (2007).
- [13] В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. *Изв. вузов. Материалы электрон. техники* **2**, 51 (2006).
- [14] А.А. Самарский. Теория разностных схем. Наука, М. (1983). 616 с.
- [15] Н.А. Тяпунина, В.В. Благовещенский, Г.М. Зиненкова, Ю.А. Ивашкин. *Изв. вузов. Физика* **6**, 118 (1982).