

УДК 53.043:534-16

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2021 г. М. М. Аракелян*

Ереванский государственный университет, Отделение физики, Ереван, Армения

**E-mail: marakelyan@ysu.am*

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Проанализировано деформированное состояние монокристаллов алюминия в знакопеременном поле механических напряжений. Исследования проводились компьютерным моделированием неоднородного синус-уравнения Гордона при учете радиационного трения. Моделирован эффект Баушингера. Изучена зависимость напряжения от деформации при различных температурах и скоростях деформации.

DOI: 10.31857/S0367676521070048

Одним из основных эффектов, определяющих упругопластическое формоизменение и разрушение материалов при знакопеременном нагружении, является эффект Баушингера [1]. Суть эффекта заключается в снижении пределов упругости и текучести материалов вследствие изменения знака нагружения при условии, что первоначальная нагрузка вызвала пластическую деформацию. Поэтому исследование закономерностей поведения материалов различной физической природы в широком диапазоне изменения температуры, степени и скорости деформации, величины внешней нагрузки является одной из актуальных проблем экспериментальной механики деформируемого твердого тела. Эффект Баушингера имеет также большое значение для расчета сопротивления усталости при знакопеременных нагрузках.

Развитие теории дислокаций, полученное в работах Хоникомба, Франка–Рида, Тейлора и других, показало, что многие реальные свойства, проявляемые в макроструктурах, прекрасным образом объясняются дислокационным подходом. В частности, для объяснения эффекта Баушингера принимается, что в этом эффекте реализуется макроявление деформационного упрочнения разной величины в зонах растяжения и сжатия. Из этого следует, что, если в металле возникает режим пластической деформации и другие, указанные выше явления, то имеет место возникновение, размножение и движение дислокаций.

С точки зрения дислокационного механизма пластической деформации, эффект Баушингера указывает на то, что при повторном деформировании дислокациям легче двигаться в направлении, противоположном их движению при пред-

варительной пластической деформации: дислокации блокируются на своем месте, так что при разгрузке они не могут двигаться до тех пор, пока не будет приложено напряжение обратного знака.

Представляет значительный интерес выяснение механизма деформации и разрушения материалов, специфики перехода от упругого к упругопластическому деформированию в бездефектных монокристаллах при испытаниях на твердость.

Использование степенной зависимости между напряжением и накопленной деформацией содержит в себе информацию о наличии в монокристалле ансамбля дислокаций. Вследствие предполагаемой нами малой плотности дислокаций возникает возможность проведения исследования без учета взаимодействия между дислокациями. В настоящее время техника и точность эксперимента дали возможность наблюдать движение отдельных дислокаций в кристалле, а не их скопления, что позволило более точно объяснить механизм движения дислокаций и их воздействия на макросвойства кристаллов. Динамические эффекты влияют на поле напряжений дислокации, но они не сказываются на величине силы, действующей на данную дислокацию со стороны внешних напряжений [2]. В нашей работе рассматривается одномерное приближение и сделана попытка связать движение отдельных дислокаций и их ансамблей на микроуровне с механическими характеристиками, учитывающими реальную структуру кристалла и условия его деформирования. В процессе нагружения плотность дислокаций в материале возрастает вследствие размножения дислокаций и работы дислокационных источников. Затравочная дислокация — элементарный носитель пла-

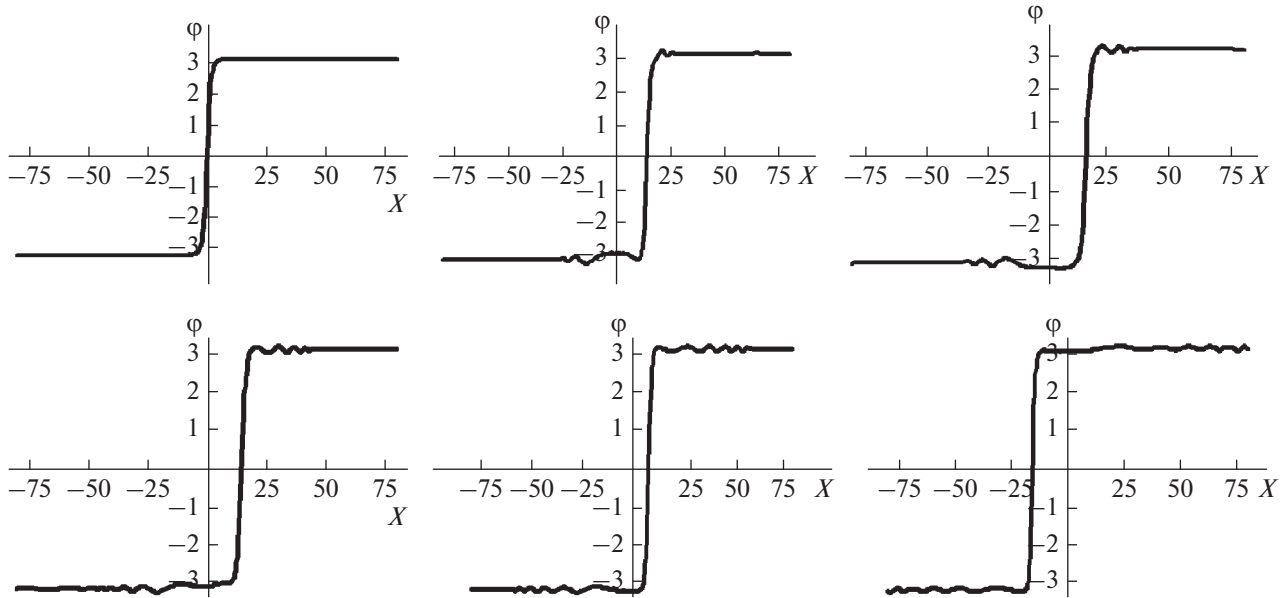


Рис. 1. Поле смещений дислокации для последовательных промежутков времени при учете силы трения и наличии внешнего механического поля.

стической деформации, вокруг которой реализуется область микропластичности. При малой плотности дислокаций учет наличия ансамбля дислокаций не влияет на качественную картину описываемых явлений. Таким образом, все явления в кристаллических телах, связанные с их пластичностью и прочностью, могут быть исследованы посредством изучения движения дислокаций. У монокристаллов чистых металлов эффект Баушингера также объясняется теорией дислокаций. В алюминии при малых плотностях дислокаций: $10^2 - 10^3 \text{ см}^{-2}$, когда взаимодействием между ними можно пренебречь, дислокации наблюдаются в виде прямых линий вдоль кристаллографических направлений с малыми индексами, указывая на влияние барьеров Пайерлса [2].

Для описания движения дислокации в алюминии нами использована одномерная модель Френкеля–Конторовой (ФК) с учетом внешнего переменного упругого поля.

Получено неоднородное синус-уравнение Гордона в безразмерных единицах с трением и периодическим внешним упругим полем $F(t) = F_0 e^{i\Omega t}$, F_0 – амплитуда внешнего воздействия, Ω – его частота:

$$\ddot{\varphi}_n + \sin \varphi_n - \varphi_n'' + \beta \dot{\varphi}_n = \gamma \sin \frac{\Omega t}{\omega}, \quad (1)$$

где $\omega^2 = \frac{2\pi f_0}{ma}$, $\beta = \frac{\mu_0}{m\omega}$, $\gamma = \frac{2\pi F_0}{ma\omega^2}$, μ_0 – коэффициент, характеризующий трение, φ_n – смещение n -го атома от положения равновесия, a – постоянная решетки, ω – характерная частота и f_0 – амплитуда периодической силы, действующей со стороны подложки в модели Френкеля–Конторовой.

В данном случае динамические потери возникают вследствие неравномерности движения дислокации по рельефу и периодического изменения конфигурации ядра дислокации, т.е. под диссипацией понимается радиационное трение. Граничные условия принимаются в виде $[\partial\varphi/\partial x]_{x=0} = [\partial\varphi/\partial x]_{x=l} = 0$, где l – безразмерная длина образца.

Использована также зависимость напряжения от деформации, скорости деформации и температуры при разупрочнении [3]:

$$\sigma = a_0 \varepsilon^{a_1} \dot{\varepsilon}^{a_2} \exp(-a_3 \theta) \quad (2)$$

$a_0 = 3.6 \cdot 10^6$ МПа, $a_1 = 0.255$, $a_2 = 0.05$, $a_3 = -0.01$, (a_0, a_1, a_2, a_3 – константы материала, ζ – скорость деформации, θ – безразмерная температура по Цельсию). Здесь a_1 характеризует материал, a_2 зависит от характера приложения внешней нагрузки, поэтому, создавая разные условия скорости деформации, можем регулировать a_2 в пределах до нескольких порядков, что соответствует деформированию от квазистатического режима деформирования до импульсно-динамического.

Исследование проводится компьютерным моделированием движения дислокаций в монокристаллах алюминия в знакопеременном механическом поле.

На рис. 1 представлено движение дислокации (ФК) в течение последовательных промежутков времени. Как видно из рис. 1, дислокация сначала движется вправо, потом некоторое время блокируется на своем месте – происходит упрочнение. Дальнейшая деформация в том же направлении затруднена, но облегчена для нагружения в

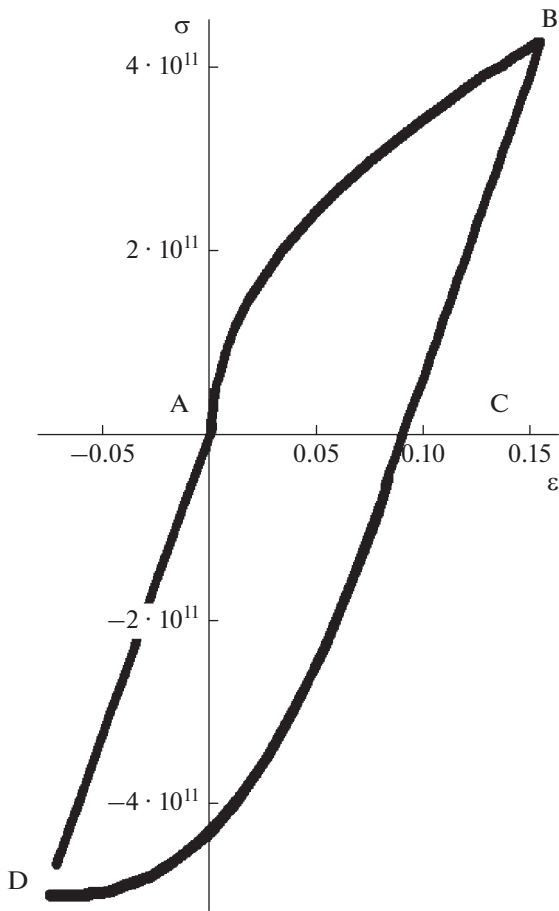


Рис. 2. Зависимость напряжения от деформации (гистерезис), иллюстрирующая эффект Баушингера.

противоположном направлении. При изменении знака внешнего поля дислокация движется влево. Как показывает численный эксперимент, при снятии внешнего переменного механического поля эффект поворота дислокации отсутствует. В [4] показано, что из всех видов деформации только растяжение–сжатие сопровождаются разупрочнением. Кривая зависимости напряжения от деформации при растяжении–сжатии имеет вид: рис. 2. Она состоит из упругой (AD, BC) и пластической части (AB, DC).

Участок (CD) на рис. 2 соответствует сжатию кристалла, в результате которого происходит пластическая деформация, дислокация движется посредством прохождения перегибов через барьеры Пайерлса. При разгрузке (участок (DA)) происходит упругая деформация. В этом случае дислокация совершает надбарьерное движение. Наложение растягивающего напряжения приводит к быстрому нарастанию пластической деформации (AB), происходит упрочнение. С точки зрения дислокационного механизма пластической деформации, эффект Баушингера указывает на то, что при повторном деформировании заблокированной перед

барьером Пайерлса дислокации легче двигаться в направлении, противоположном ее движению при предварительной пластической деформации. Можно предположить, что движение дислокаций в обратном направлении происходит по новым плоскостям, в которых отсутствуют нарушения структуры, препятствующие движению дислокаций. Это предположение находится в согласии с тем, что при циклическом нагружении металлических материалов происходит пластическая деформация, обусловленная дислокационными механизмами. Как видно из рис. 2, после предварительной пластической деформации противоположного знака наблюдается уменьшение напряжения сопротивления кристалла $(AD)_\sigma > (BC)_\sigma$: более раннее возникновение пластической деформации при повторной нагрузке противоположного знака и, следовательно, уменьшение предела текучести и предела упругости.

Получена зависимость деформации от времени в 4-х циклах гистерезиса. Как видно из рис. 3, деформация при прямом скольжении (растяжение) растет, достигая максимума при остановке, при обратном скольжении деформация уменьшается, стремясь к нулю при достижении исходного состояния, после прохождения равновесия деформация растет, при этом модуль деформации больше, чем при прямом скольжении.

Численный эксперимент показал также, что без учета силы трения при прямом скольжении в пластической области скорость деформации растет, затем в процессе торможения она уменьшается, достигая минимума при остановке. При обратном скольжении скорость деформации увеличивается. При учете силы трения характер изменения скорости деформации в основном сохраняется, но при обратном скольжении из-за действия сил трения модуль скорости деформации меньше.

Зависимость напряжения от времени в точке наблюдения представлена на рис. 4, из которого следует, что при прямом скольжении напряжение растет, достигая максимума при остановке, при обратном скольжении уменьшается, достигая минимума при прохождении через равновесие, после прохождения через равновесие напряжение увеличивается.

Как показал численный эксперимент при тех же деформациях напряжение при низких температурах больше, чем при высоких температурах, т.е. при низких температурах происходит нелинейное упрочнение, вследствие чего повышается предел прочности материала. Как известно, выражение для значения предела прочности имеет вид:

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{S_0}, \quad (3)$$

где F_{max} – максимальная сила при деформации растяжения, S_0 – исходная площадь поперечного

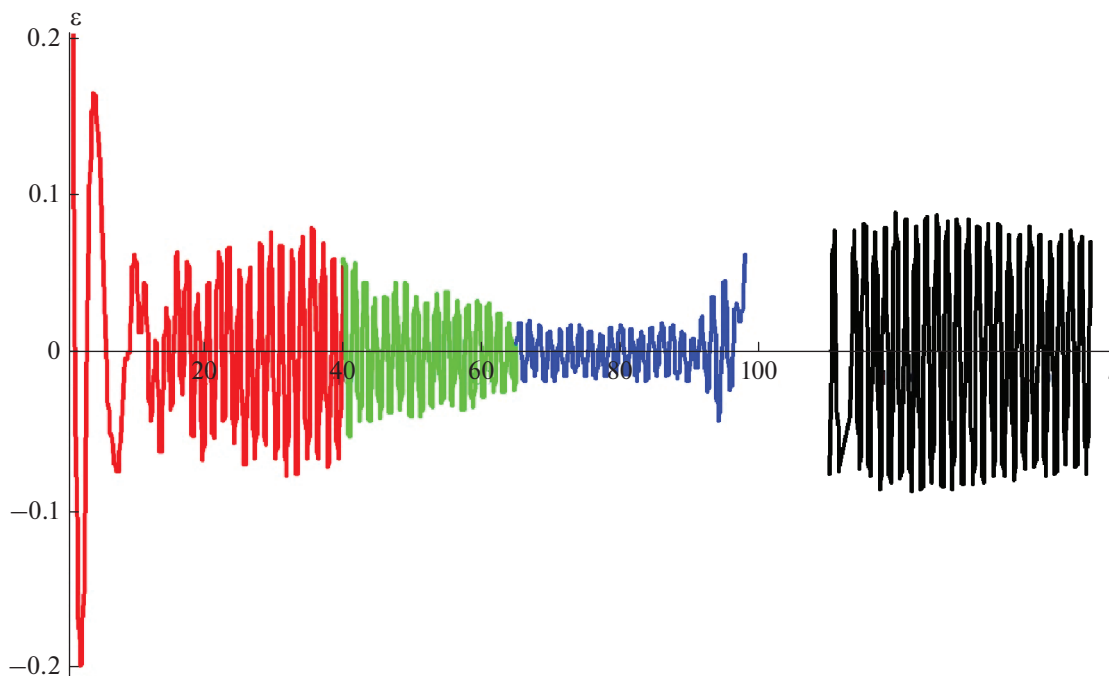


Рис. 3. Зависимость деформации от времени в четырех циклах гистерезиса.

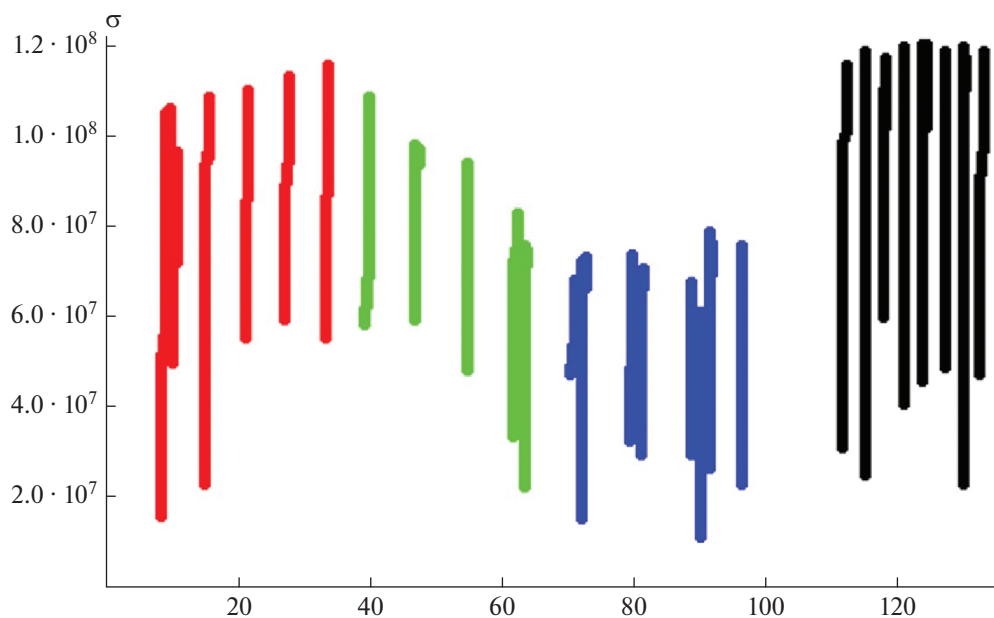


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени в четырех циклах гистерезиса.

сечения образца. Истинное значение предела прочности

$$\sigma_{b,real} = \frac{F_{max}}{S}, \quad (4)$$

где S — текущая площадь поперечного сечения. Как следует из численного эксперимента, при данной деформации F_{max} при низких температурах больше. Таким образом, повышение темпера-

туры сопровождается понижением предела текучести материала [5].

Исследована также зависимость напряжения от деформации для разных скоростей деформации (рис. 5). Полученный из анализа рис. 5 результат находится в согласии с экспериментами по сверхпластической деформации алюминиевых сплавов (см., например, [9]).

В [6] принимается, что наличие ниспадающего участка кривой напряжение — деформация обу-

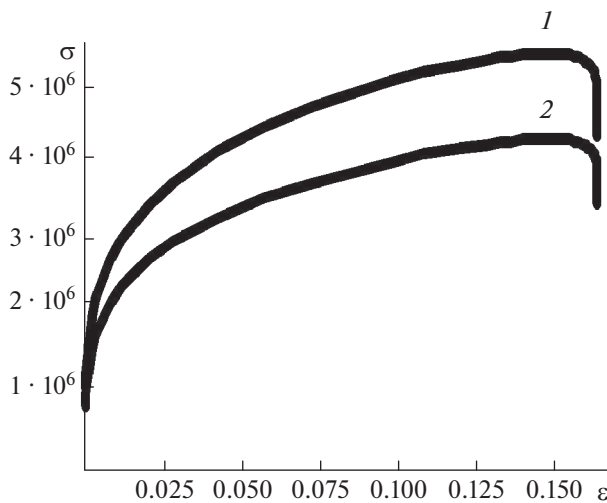


Рис. 5. Зависимость напряжения от деформации при увеличении скорости деформации на два порядка. 1 – Большая скорость деформации, 2 – скорость деформации на два порядка ниже.

словлено свойствами материала, т. к. деформация протекает однородно и шеек в пределах измерительной базы не наблюдается. С нашей точки зрения, области резкого разупрочнения соответствуют преодолению барьеров Пайерлса. Этот вывод дают расчеты истинных значений напряжений и деформаций, при которых происходит резкое разупрочнение, и истинных значений напряжений, соответствующих пределу прочности алюминия. Как известно, значение предела прочности для алюминия $8 \cdot 10^8$ дн/см². Если значения напряжений, при которых кривая начинает резко идти вниз (рис. 5), меньше значения предела прочности, то происходит эффект преодоления барьеров на пути движения дислокаций [7, 8]. Если в какой-либо из точек начала разупрочнения значения напряжений больше значения предела прочности, то происходит локализация деформации, образование шейки и разрушение образца. По нашим оценкам, точкам резкого разупрочнения соответствует преодоление дислокацией барьера Пайерлса.

Таким образом, при большой скорости деформации напряжение при данной деформации больше. Объяснение полученного результата дано в [5].

Проблема прочности – одна из важнейших в физике конденсированных состояний. Интенсивные разработки в области материаловедения сопровождается широким изучением прочности материалов. При циклических нагрузках исчерпывается прочность материала, что может привести к более раннему его разрушению, чем дают расчетные данные. Поэтому при рассмотрении критериев разрушения материалов при знакопеременном нагружении необходимо учитывать эффект Баушингера. Пластическая деформация алюминия и его сплавов занимает также важное место в современной аэрокосмической промышленности (см., например, [10]).

В [5] был предложен подход, использующий информацию о движении единичной дислокации под действием касательных напряжений для описания поведения ансамбля дислокаций на макроскопическом уровне и доказана его применимость для предсказательного моделирования. Аналогичный подход применен нами в данной работе. Достоинством предложенной методики при расчете прикладных задач теории пластического течения и механики разрушения является возможность проведения исследований по определению оптимальной температуры, скорости деформации и величины напряжения течения, не приводящих к микроразрушению материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. С. 22.
2. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 600 с.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М: Металлургия, 2001. 688 с.
4. Каратушин С.И., Храмова Д.А., Пехов В.А. // Изв. вузов. Машиностр. 2017. № 12(693). С. 45.
5. Красников В.С., Куксин А.Ю., Майер А.Е., Янилкин А.Б. // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1295.
6. Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В. // Вестн. ПНИПУ. Мех. 2018. № 3. С. 103.
7. Аракелян М.М. // Изв. НАН Армении. Физ. 2015. Т. 50. С. 126.
8. Аракелян М.М. // ФТТ. 2017. Т. 59. С. 2218.
9. Ситкина М.Н., Яковцева О.А., Котов А.Д. // Матер. XVIII Междунар. научн.-техн. урал. шк.-сем. металлословов – молодых ученых. (Екатеринбург, 2017). С. 270.
10. Liu F.C., Ma Z.Y. // Scr. Mater. 2010. V. 62. P. 125.

Study of the deformed state of aluminum single crystals with alternating loading

M. M. Arakelyan*

Department of Physics, Yerevan State University, Yerevan, 0025 Armenia

*e-mail: marakelyan@ysu.am

The deformed state of aluminum single crystals in an alternating mechanical stress field is analyzed. The studies were carried out by computer simulation of the inhomogeneous sine-Gordon equation taking into account radiation friction. The Bauschinger effect is modeled. The dependence of stress on deformation at various temperatures and strain rates is studied.