УДК 53.043:534-16

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ В МЕТАЛЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРАХ

© 2022 г. М. М. Аракелян*

Ереванский государственный университет, физический факультет, Ереван, Армения

**E-mail: marakelyan@ysu.am* Поступила в редакцию 17.01.2022 г. После доработки 07.02.2022 г. Принята к публикации 21.02.2022 г.

Исследуется ряд аспектов деформационного упрочнения в металлах. Моделированием синус уравнения Гордона с диссипацией для дислокаций Френкеля—Конторовой получены зависимость напряжения от деформации в присутствии высокочастотного звукового поля, зависимость коэффициента упрочнения от деформации при различных температурах, а также зависимость скорости деформации от времени при различных концентрациях примесей.

DOI: 10.31857/S0367676522060059

ВВЕДЕНИЕ

В технологических процессах металлообработки, основанных на холодном пластическом формоизменении металлов, происходят два взаимозависимых явления: изменение формы и размеров исходной заготовки и деформационное упрочнение. Качество изделий, изготовленных методами холодного пластического формоизменения, а именно, их точностные и прочностные параметры в основном обусловлены этими явлениями, а величины указанных параметров можно определить путем итогового распределения деформаций по объему готового изделия. Поэтому одной из основных задач, решаемых при разработке оптимальных технологий металлообработки, является учет деформационного упрочнения. Для реализации упрочнения материалов исследования проводятся в основном в трех направлениях: создание новых сплавов с заранее заданными физико-механическими свойствами; термофизические методы упрочнения; деформационное упрочнение.

Первые два направления требуют длительного времени для исследования и внедрения в практику. Поэтому актуальными являются конкурентноспособные методы повышения прочности деформациоонным упрочнением. Выражение "деформационное упрочнение" означает, что напряжение, необходимое для продолжения пластического течения металлов, возрастает с увеличением степени пластической деформации. Все теории деформационного упрочнения принимают, что характер пластической деформации кристаллов связан с ростом плотности дислокаций в процессе деформирования [1].

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ НА МИКРОУРОВНЕ

Исследования физической природы явления пластичности показывает, что переход в хрупкое состояние чистых монокристаллических образцов зависит от температуры, скорости деформирования, плотности дефектов с позиций теории дислокаций и др. Разработанные физические модели не позволяют количественно оценить влияние многочисленных факторов. Поэтому исследование характера изменения показателей прочности и пластичности металлов в зависимости от указанных параметров представляет значительный интерес.

В данной работе проведен анализ механизма явления упрочнения на микроуровне для алюминия.

В алюминии при малых плотностях дислокаций (10^2-10^3) см⁻² дислокации наблюдаются в виде прямых линий вдоль кристаллографических направлений с малыми индексами, указывая на влияние барьера Пайерлса [2].

В рамках одномерной модели движение дислокаций описывается синус уравнением Гордона:

$$\varphi_{tt} - c_0^2 \varphi_{xx} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0, \qquad (1)$$

где c_0 — скорость звука (предельная скорость в упругой среде), ω_0 — характерная частота, ϕ — от-

клонение атома от положения равновесия в угловых единицах.

Граничные условия заключаются в том, что образец, по которому распространяется дислокация, считается открытым на обоих концах, т.е. $[\partial \varphi / \partial x]_{x=0} = [\partial \varphi / \partial x]_{x=l} = 0$, где l – безразмерная длина образца.

Рельеф Пайерлса, ответственный за внутренние напряжения, оказывает влияние на движение дислокаций и связанные с ним характеристики внутреннего трения. Механизм диссипации, обусловленный исключительно барьером Пайерлса, сохраняется при самых низких температурах.

При достаточно высоких температурах потенциальный рельеф кристаллической решетки преодолевается термически активационно. При более низких температурах, высоких барьерах Пайерлса или наличии примесей преобладают режимы флуктуационного рождения и разбегания перегибов на дислокации [3]. При достаточно низких температурах образование и дальнейшее расширение двойных перегибов осуществляется путем квантового туннелирования [4]. Следствием проявления квантовых эффектов является существенное усиление зависимости скорости дислокации от сил диссипации. Такая зависимость может быть причиной заметного изменения предела текучести и других параметров, характеризующих пластическую деформацию.

Рассмотрим торможение дислокаций, обусловленное силами радиационного трения. В этом случае возникают динамические потери вследствие неравномерности движения дислокации по рельефу и периодического изменения конфигурации ядра дислокации.

Диссипативные эффекты такой природы можно описать членом $\mu_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}$, где μ_0 – коэффициент диссипации [2].

Наличие примесей можно учесть, заменяя в уравнении (1) $\omega_0^2 \rightarrow \omega_0^2 + \Delta \omega_0^2(x)$ [5].

С учетом вышесказанного, уравнение (1) запишется в виде

$$\varphi_{tt} - c_0^2 \varphi_{xx} + (\omega_0^2 + \Delta \omega_0^2) \sin \varphi + \mu_0 \varphi_t = 0.$$
 (2)

Решения этого уравнения и их эволюция со временем, полученные нами для типичных значений констант, представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, под действием небольшого трения дислокация замедляется и, в конце концов, останавливается. Остановившись, она может жить практически очень долго. Полученный результат согласуется с опытом: при снятии механического напряжения дислокации прекращают



Рис. 1. Моделирование решений диссипативного уравнения синус Гордона для последовательных моментов времени. Зависимость углового смещения атомов ϕ от координаты x.

движение и будут существовать, пока существует кристалл.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИСЛОКАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ОТ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ

При деформационном упрочнении напряжение, необходимое для продолжения пластического течения возрастает с увеличением степени пластической деформации. Это явление обусловлено ростом плотности дислокаций в процессе деформации. Увеличение прочности связано с увеличением накопления деформаций. Существуют три способа накопления деформаций: 1) Тепловой градиент. Он заключается в том, что создается определенное тепловое поле с заданным градиентом, при котором тепловые флуктуации способствуют преодолению дислокацией потенциальных барьеров в кристалле, что позволяет увеличивать накопленную деформацию. 2) Изменение тензора напряжений таким образом, чтобы в опасной зоне, где может произойти разрушение кристалла, преобладали сжимающие напряжения; кроме того, тензор напряжений можно изменять, переходя от одноосного напряженного состояния к двухосному. 3) Упрочнение действием переменного внешнего упругого поля.

На микроуровне явление упрочнения связано с движением дислокаций в рельефе Пайерлса. По разным причинам (большая высота барьера Пайерлса, насыщение, размножение дислокаций и т.д.) со временем движение дислокаций прекращается и при дальнейшем увеличении внешней нагрузки в некотором сечении может произойти лавинообразное увеличение напряжения и разрыв.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 6 2022

Таким образом, дальнейшее развитие изучения явления упрочнения может быть реализовано на основе сочетания дислокационных представлений и феноменологической теории. Например, в [6, 7] в рамках дислокационного подхода рассмотрены размерные эффекты в микро- и наноразмерных кристаллах.

Одной из основных проблем динамики деформируемых сред является установление характера накопления и увеличения плотности дислокаций в результате холодной пластической деформации. Экспериментально установлено, что при деформировании сдвиги на поверхности деформируемых образцов на несколько порядков больше величины межатомного расстояния. Наличие в деформируемой среде перед началом холодной деформации некоторого количества дислокаций не объясняет этого явления. Поэтому принимается, что в процессе холодной деформации образуется большое число новых дислокаций [8]. Однако существующие модели возникновения и размножения дислокаций в процессе холодной пластической деформации не учитывают взаимодействия дислокаций. Покажем, что при малых скоростях скольжения дислокаций взаимодействие между ними обуславливает увеличение сопротивления движению дислокаций.

УЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСЛОКАЦИЙ

Рассмотрим взаимодействие двух аналогичных дислокаций Френкеля-Конторовой при их совместном движении в одной плоскости скольжения с одинаковыми скоростями. Векторы Бюргерса дислокаций параллельны. Для конкретности берем дислокации одного знака, между которыми, как известно, действуют силы отталкивания. В предлагаемой модели одна из дислокаций заменяется ее упругим полем и рассматривается воздействие этого поля на соседнюю дислокацию. Дислокация, которая заменяется созданным ею полем, находится в начальный момент в начале координат. Изучается воздействие этой дислокации на единицу длины второй дислокации, имеющей координаты x, y. С учетом поля соседней дислокации уравнение для данной дислокации принимает вид [9]:

$$m\ddot{y}_{n} = -f_{0}\sin\left(\frac{2\pi y_{n}}{a}\right) + k(y_{n+1} - y_{n}) - k(y_{n} - y_{n-1}) + F,$$
(3)

где y_n — смещение *n*-го атома от положения равновесия, m — масса атома, $f = f_0 \sin\left(\frac{2\pi y_n}{a}\right)$ — периодическая сила, действующая со стороны подложки, F — сила, действующая со стороны соседней дислокации. После элементарных преобразований, измеряя отклонение атома от положения равновесия в угловых единицах, согласно $2\pi \frac{y_n}{a} = \pi + \varphi_n$, получим нелинейное дифференциальное синус уравнение Гордона в виде:

$$\varphi_{tt} - c_0^2 \varphi_{xx} + \omega^2 \sin \varphi - \frac{2\pi F}{ma} = 0, \qquad (4)$$

где \vec{c}_0 – скорость звука, $\omega^2 \equiv \frac{2\pi f_0}{ma}$ – характерная частота.

Как показано в [2], в областях, далеких от ядра, напряжения движущейся дислокации Френкеля—Конторовой аналогичны напряжениям движущейся дислокации Пайерлса. В плоскости скольжения ($\sigma_{xx} = 0$, $\sigma_{yy} = 0$, $\sigma_{zz} = 0$) действуют только касательные напряжения σ_{xy} .

В плоскости скольжения получим:

$$(\sigma_{xy})_{y=0} = \frac{\mu b c_t^2}{2\pi (x - \upsilon t) \upsilon^2 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c_t^2}}} \times \left[\left(2 - \frac{\upsilon^2}{c_t^2} \right)^2 - 4 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c_t^2}} \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c_t^2}} \right],$$
(5)

где μ — модуль сдвига, c_i, c_i — модули скоростей распространения поперечных и продольных звуковых волн, соответственно, σ_{xy} — компонента касательного сдвигового напряжения, b — модуль вектора Бюргерса, υ — модуль скорости дислокации. Переходя к силе на единицу длины дислокации, согласно $F_x/L = b\sigma_{xy}$, после элементарных преобразований получим:

$$F_{x}/L = \frac{\mu b^{2} c_{t}^{2} \left[\left(2 - \frac{\upsilon^{2}}{c_{t}^{2}} \right)^{2} - 4 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^{2}}{c_{t}^{2}}} \sqrt{1 - \frac{\upsilon^{2}}{c_{l}^{2}}} \right]}{2\pi (x - \upsilon t) \upsilon^{2} \sqrt{1 - \frac{\upsilon^{2}}{c_{t}^{2}}}.$$
 (6)

В безразмерных переменных: $x = \upsilon \tilde{x}, t = \frac{\tilde{t}}{\omega}$, обозначая для удобства $\tilde{x} \to x, \tilde{t} \to t, \alpha = \frac{\mu b^2 c_t^2}{\omega ma}$ получим синус уравнение Гордона в виде (x и t теперь безразмерные переменные):

$$\ddot{\varphi} = -\sin\varphi + \varphi'' + \frac{\left[\left(2 - \frac{v^2}{c_t^2}\right)^2 - 4\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_t^2}}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_t^2}}\right]}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c_t^2}}(c_t x - v t)v^2}.$$
(7)

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 6 2022

Рассмотрим, как меняется взаимодействие между дислокациями в зависимости от скорости их движения. Как известно, при возрастании скорости область сдвиговых напряжений сжимается в направлении скольжения [2].

Проведем численный эксперимент для некоторого интервала исследуемых скоростей. Используя (7) и выбирая начальные условия в новых переменных для относительно малых скоростей (~10⁻³ см/с) получаем, что поле данной дислокации искажается уже в течение небольшого интервала времени, то есть взаимодействие между дислокациями существенно.

Из дальнейшего численного эксперимента следует, что при увеличении скорости (~10⁵ см/с) взаимодействие между дислокациями ослабляется: через тот же интервал времени, что и в предыдущем случае, поле смещений данной дислокации почти не искажается.

Следовательно, при увеличении скорости уменьшается сопротивление движению дислокаций.

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ ОТ НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ, СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Экспериментальные исследования при разных напряженных состояниях показали, что параметр, характеризующий упрочнение, является некоторой нелинейной функцией от текущей величины накопленной деформации. В феноменологических теориях при описании явления упрочнения указанную зависимость аппроксимируют некоторой степенной функцией. Многочисленными исследованиями установлено, что если совмещать кривые упрочнения, полученные при испытании образцов, со степенной зависимостью напряжения текучести от накопленной деформации, то получится полное совпадение этих кривых [10]. Использование степенной зависимости между напряжением и накопленной деформацией, содержит информацию о наличии в монокристалле ансамбля дислокаций.

Зависимость напряжения от деформации, скорости деформации и температуры имеет вид [11]:

$$\sigma = a_0 \varepsilon^{a_1} \zeta^{a_2} e^{-a_3 \theta}, \qquad (8)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 — константы материала, ζ — скорость деформации, θ — безразмерная температура по Цельсию, σ — напряжение, ε — относительная деформация.

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.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ПЕРЕМЕННОГО ВНЕШНЕГО УПРУГОГО ПОЛЯ

Экспериментальные исследования показали, что предел текучести материала и градиент роста кривой деформационного упрочнения с приложением переменного внешнего упругого поля значительно уменьшаются. Это явление объясняется тем, что звуковые колебания способствуют преодолению обусловленных кристаллическим строением барьеров. При пропускании высокочастотного ультразвука наблюдается внутреннее трение, не зависящее от амплитуды [12]. Движение в рельефе Пайерлса также стимулирует возникновение динамических потерь. Таким образом, анализ движения дислокаций с учетом сопротивления среды в виде внутреннего трения и при наличии ультразвука является актуальной проблемой при расчетах явления упрочнения на микроуровне.

Неоднородное уравнение для смещения атомов от положения равновесия в модели Френкеля—Конторовой с зависящим от времени внешним упругим полем и диссипацией имеет вид:

$$\varphi_{tt} - c_0 \varphi_{xx} + \omega_0^2 \sin \varphi + \eta \varphi_t = \lambda E e^{i\omega t},$$

$$E_c = \omega_0^2 \lambda^{-1}.$$
(9)

В (9) ось *х* направлена вдоль равновесного положения прямолинейной дислокации, c_0 , ω_0 характерные скорость и частота, φ — угловые отклонения атомов от положения равновесия, η коэффициент диссипации, λ —коэффициент, регулирующий размерность.

Проанализируем уравнение (9) для разных значений *E*. Моделирование проводится при температуре (-20° C). При $E \le E_c$ в системе происходит самоорганизация: вместо одной быстрой дислокации образуется ряд следующих друг за другом медленных дислокаций, т.е. происходит размножение дислокаций.

Для $a_2 = 10$, комнатных температур и наличия внешнего упругого поля резонансной частоты (~ 10^{12} Гц) и близлежащих частот (~ 10^{13} , ~ 10^{11} Гц) численный эксперимент дает рис. 2 [13]. Видно, что при резонансной частоте уменьшается сопротивление деформированию, укорачивается стадия упрочнения и удлиняется стадия разупрочнения. Очевидно, этой частоте соответствует образование несхлопывающегося двойного перегиба, в результате чего в течение времени действия положительной части внешнего упругого поля дислокация переходит в следующую долину потенциального рельефа.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 6 2022



Рис. 2. Зависимость напряжения σ от деформации ε в присутствии высокочастотного звукового поля. Резонансная частота: ~10¹² (1), ~10¹³ (2), ~10¹¹ Гц (3).

Изучение совместного влияния температуры и скорости деформации на вид процесса деформации показало, что даже при низкой температуре, при $a_2 = 0.05$ может происходить разупрочнение, однако при $a_2 = 10$ упрочнение и разупрочнение наблюдаются при высоких температурах, при этом область упрочнения сжимается, а область разупрочнения расширяется, по сравнению с областями при $a_2 = 0.05$.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ

При наличии в системе примесей моделирование соответствующих зависимостей представлено на рис. За и Зб. Видно, что при наличии примесей число рождающихся дислокаций и их плотность растут, скорости дислокаций уменьшаются, на основные значения скоростей накладываются обертоны, обусловленные наличием примесей, средняя амплитуда скачков скорости уменьшается. Таким образом, в присутствии внешнего механического поля с определенной амплитудой примеси служат дополнительными источниками дислокаций. Однако при $E > E_c$ динамика дислокаций требует отдельного рассмотрения.

Варьирование коэффициента E уравнения (9) позволяет регулировать степень размножения дислокаций. Контролируемая операция важна как средство управления механизмом скольжения за счет вариации плотности дислокаций в реальном кристалле. При уменьшении коэффициента E до значения, когда размножения дислокаций нет, наблюдаем одиночную дислокацию, скорость которой из-за внутреннего трения, осциллируя, уменьшается.

Из (9) с учетом примесей получена зависимость коэффициентов упрочнения $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ от деформации при различных температурах.

Таким образом, при одинаковых условиях (наличие примесей, размножение дислокаций, одинаковые характеристики внешнего поля и силы трения) с понижением температуры происходит увеличение коэффициента упрочнения (θ) (рис. 4*a* и 4*б*).

На эффект пластичности существенное влияние оказывает также скорость деформации. Скорость деформации определяется скоростью пре-



Рис. 3. Влияние примесей: зависимость скорости дислокации *v* от времени *t* (*a*); зависимость углового смещения атомов φ от координаты *x*: рождение медленных дислокаций (отн. ед.) (δ).



Рис. 4. Зависимость коэффициента упрочнения θ от деформации ε при низких (*a*) и высоких температурах (*б*).



Рис. 5. Зависимость деформации ε от времени *t* (скорость деформации) при различных концентрациях примесей: 1.2 (*a*), 0.5 отн. ед. (*б*).

одоления дислокациями различных препятствий. Рассмотрим зависимость скорости деформации от концентрации примесей при высокой температуре и размножении дислокаций. Скорость деформации в данном случае определяется термически активированным взаимодействием дислокаций с примесными атомами. Моделирована зависимость скорости деформации от концентрации примесей. Получено, что с увеличением концентрации примесей скорость деформации и амплитуда колебаний скорость деформации уменьшаются (рис. 5*a* и 5*b*). Очевидно, примеси играют роль квазибарьеров при движении дислокаций чем меньше концентрация примесей, тем меньше сопротивление движению.

Переходя от скорости деформации к скорости дислокации, можно, по своему усмотрению, на микроуровне управлять скоростью дислокации, а также при наличии внешнего поля центрами генерации дислокаций. Если дислокация движется достаточно медленно и в результате излучения энергии не может преодолеть барьер Пайерлса, то она закрепляется, превращаясь в статическое образование с бесконечным временем жизни. Закрепление дислокации после прохождения некоторого расстояния говорит об упрочнении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дислокационная теория является одним из методов описания макроявлений на основе микроподхода. Возможность управлять процессом накопления деформаций говорит о том, что пластичность — не свойство конкретного материала, а его состояние.

В присутствии внешнего упругого поля примеси можно рассматривать как дополнительные источники дислокаций. Следовательно, одним из способов управления характером протекания процесса движения дислокаций может являться регулируемая плотность вводимых примесей.

Предложенный метод позволяет создавать центры генерации дислокаций при наличии внешнего упругого поля и наблюдать за процессами в металлах в микромасштабе.

Одним из дополнительных факторов, позволяющим управлять процессом упрочнения, является градиент температуры. При изменении температуры (от высоких к низким) при одинаковых условиях (размножение дислокаций, наличие примесей) сопротивление деформированию растет, т.к. при низких температурах добавляется фактор преодоления барьеров Пайерлса. С увеличением концентрации примесей скорость деформации и амплитуда колебаний скорости деформации уменьшаются.

При малых скоростях скольжения дислокаций из-за их взаимодействия увеличивается сопротивление их скольжению.

В различных технологиях современной высокотехнологичной индустрии при формообразовании изделий явление деформационного упрочнения используется как перспективный ресурс повышения прочностных характеристик изделий.

Несмотря на наличие многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [10, 14, 15] до настоящего времени физическая природа упрочнения полностью не выяснена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю. Основы теории дефектов, прочности и пластичности кристаллов. Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2013. 337 с.
- Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599 с.
- Петухов Б.В. Динамика дислокаций в кристаллическом рельефе. Дислокационные кинки и пла-

стичность кристаллических материалов. Lap Lambert Academic Publishing, 2016. 392 с.

- 4. Петухов Б.В. // ФНТ. 1986. Т. 12. № 7. С. 749.
- 5. *Лонгрен К., Скотт Э.М.* Солитоны в действии. М.: Мир, 1981. 310 с.
- 6. Малыгин Г.А. // ФТТ. 2012. Т. 54. № 6. С. 1141.
- 7. Gleiter H. // Acta Mater. 2000. T. 48. No. 1. C. 1.
- Конева Н.А., Киселева С.Ф., Попова Н.А., Козлов Э.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 9. С. 1311; Коneva N.A., Kiseleva S.F., Popova N.A., Kozlov E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 9. P. 1162.
- 9. Аракелян М.М. // IJETAE. 2015. V. 5. No. 11. Р. 280.
- 10. *Hosford W.F., Caddell R.M.* Metal forming. Mechanics and metallurgy. Cambridge, 2007. 312 p.
- 11. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М: Металлургия, 2001. 688 с.
- Альшиц В.И., Инденбом В.Л. // УФН. 1975. Т. 115. № 1. С. 3.
- 13. Аракелян М.М. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 1. С. 2218.
- 14. Huili Guo, Chenlin Li, Xu Zhang, Fulin Shang // AIP. Adv. 2018. V. 8. Art. No. 125208.
- 15. *Hussein A.M., Rao S.I., Uchic M.D. et al.* // J. Mech. Phys. Solids. 2017. V. 99. P. 146.

Deformation hardening in metals at various external parameters

M. M. Arakelyan*

Department of Physics, Yerevan State University, Yerevan, 0025 Armenia *e-mail: marakelyan@ysu.am

Some aspects of strain hardening in metals are investigated. By simulating the sine Gordon equation with dissipation for Frenkel–Kontorova dislocations, the dependences of stress on deformation in the presence of a high-frequency sound field, the dependence of the hardening coefficient on deformation at different temperatures, and the dependence of the rate of deformation on time at different concentrations of impurities are obtained.