

УДК 539.2 : 548.4 : 539.67 : 539.374

© 1992

## МОДЕЛЬ АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМОЙ НЕУПРУГОСТИ И АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

I. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
КРИСТАЛЛОВ NaCl и LiF В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ  
И РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
НЕУПРУГОЙ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С. Н. Голяндин, С. Б. Кустов

Изучено поведение предварительно пластически деформированных монокристаллов NaCl и LiF в режимах микроползучести и возврата деформации при напряжениях, меньших напряжения макроскопического течения. На основании этих исследований и полученных ранее данных об амплитудно-частотных спектрах дислокационного амплитудно-зависимого внутреннего трения, дефекта модуля Юнга и обратимой дислокационной деформации предложена реологическая модель обратимого нелинейного неупругого поведения кристаллов. Модель основана на представлениях об эффективных и внутренних напряжениях и является разновидностью моделей «нелокализованного трения». Обнаружена прямая взаимосвязь между параметрами предложенной реологической модели и основными характеристиками макроскопической пластической деформации.

Данные об амплитудно-частотной зависимости амплитудно-зависимого внутреннего трения (АЗВТ) и дефекта модуля Юнга (ДМЮ) важны для получения информации о механизмах нелинейного поглощения звука, в частности для определения роли чисто гистерезисных и термоактивированных компонент АЗВТ (см., например, [1]). Прямые наблюдения обратимой дислокационной деформации дают дополнительную существенную информацию о справедливости теорий АЗВТ [1, 2]. В [3-6] были представлены экспериментальные данные об амплитудном и частотном спектрах АЗВТ, ДМЮ и обратимой дислокационной неупругой деформации в кристаллах NaCl и LiF в диапазоне частот  $5 \cdot 10^{-3}$ —5 Гц при амплитудах циклической деформации  $10^{-6}$ — $2 \cdot 10^{-5}$ . Было исследовано влияние на эти характеристики предварительной пластической деформации, статической нагрузки, закона нагружения. Обсуждалась также применимость различных теорий АЗВТ. В данной работе результаты [3-6] дополнены исследованиями микропластической деформации щелочно-галлоидных кристаллов в переходных режимах циклического нагружения и разработкой реологической модели обратимой нелинейной неупругости кристаллов. В [3] были сделаны следующие выводы.

В рамках «струнных» моделей [7, 8] невозможно объяснить наблюдаемую в щелочно-галлоидных кристаллах форму гистерезисной петли напряжение—неупругая деформация.

Поведение подвижных дислокаций при циклическом нагружении не зависит от их положения в плоскостях скольжения. Поэтому для интерпретации наблюдаемых результатов предпочтительнее использовать модели «нелокализованного трения» [9-11], а не «струнные» модели.

Анализ частотного спектра АЗВТ, ДМЮ и неупругой деформации [4-6] привел к выводу, что не только термоактивированная, но и гистерезисная («силовая», «атермическая» [12]) компонента дает вклад в АЗВТ. Гистерезисная

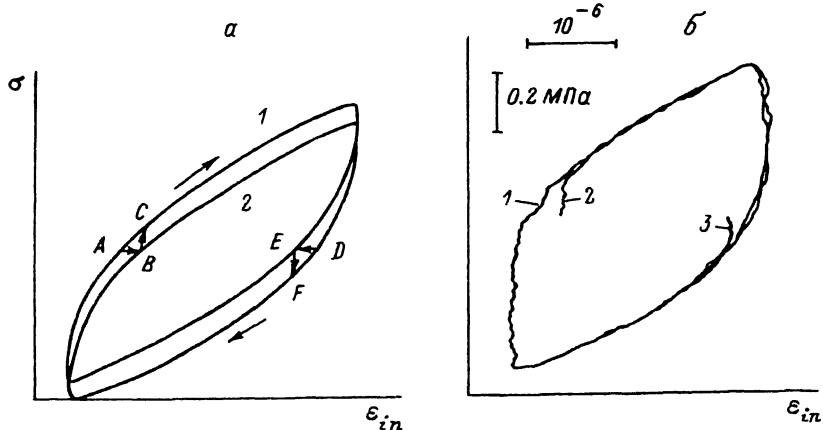


Рис. 1. Определение точек квазистатической ГП.

*a* — схема перехода с динамической (1) на квазистатическую (2) ГП ( $A-B$ ,  $D-E$ ) и обратно ( $B-C$ ,  $E-F$ ) для режимов микроползучести ( $A-B-C$ ) и возврата деформации ( $D-E-F$ ); *b* — экспериментальная ГП для кристалла NaCl в установившемся режиме на частоте 0.5 Гц (1) и переход с квазистатической на динамическую ГП после выдержки образца в режимах микроползучести (2) и возврата деформации (3).

компонента существует на самых низких исследованных частотах, и ее вклад увеличивается с понижением частоты и ростом амплитуды деформации.

Одной из проблем является количественное разделение этих компонент АЗВТ для произвольных частот и амплитуд. Поскольку гистерезисная компонента существует при самых низких частотах, естественно было предположить [4-6], что эта компонента АЗВТ связана с движением дислокаций через барьеры, которые непреодолимы при помощи термической активации. В этом случае должна существовать квазистатическая гистерезисная петля (ГП) ненулевой площади. Эта квазистатическая ГП соответствует гистерезисной или атермической части АЗВТ. Точки квазистатической ГП могут быть определены с помощью опытов, фиксирующих процесс микроползучести или возврата деформации. Схема таких опытов приведена на рис. 1, *a*. На этом рисунке представлены установившаяся (динамическая) ГП (1) и квазистатическая (2) при одинаковых амплитудах неупругой деформации  $\epsilon_{in}$ . Показаны также переходы с динамической на квазистатическую ГП ( $A-B$ ,  $D-E$ ) в режимах микроползучести ( $A-B$ ) и возврата деформации ( $D-E$ ). Линии  $B-C$  и  $E-F$  соответствуют обратным переходам с квазистатической на динамическую ГП. Такие эксперименты позволили нам определить обе компоненты АЗВТ, исследовать влияние на них частоты и предложить реологическую модель неупругой деформации.

Расчитанные на основе этой модели амплитудные и частотные спектры АЗВТ и ДМЮ сопоставляются с экспериментальными данными в следующей статье.

## 1. Методика

Экспериментальная методика была основана на непосредственной регистрации ГП напряжение—деформация при циклическом сжатии образцов при помощи сервогидравлической испытательной машины, управляемой ЭВМ. Для измерения деформации применялся емкостный датчик с разрешением около  $10^{-8}$ . При циклическом нагружении образца измерялись временные зависимости напряжения  $\sigma(t)$  и деформации  $\epsilon(t)$ . Таким образом формировалась ГП  $\epsilon(\sigma)$ . Каждая измеренная ГП состояла из 1024 точек. Амплитуды деформации были  $10^{-6}$  и выше на частотах  $5 \cdot 10^{-3}$ —5 Гц. Неупругое поведение образцов изучалось также

при переходах от циклического нагружения в режиме микроползучести и возврата деформации. Опыты проводились при комнатной температуре. Более подробно методика опытов и характеристики исследованных материалов представлены в [3, 5].

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1, б показаны ГП, измеренная в кристалле NaCl в установившемся режиме (1), и зависимости напряжение—неупругая деформация в режимах перехода с квазистатической на динамическую ГП после выдержки образца в режимах микроползучести (2) и возврата деформации (3) при постоянных и равных значениях напряжения  $\sigma$ . Видно, что эти зависимости соответствуют схеме на рис. 1, а. Можно отметить также симметрию наблюдаемых переходов на динамическую ГП при продолжении нагружения или разгрузки образца. Таким образом, хотя в точках В и Е действовали одинаковые по величине сжимающие напряжения  $\sigma = 0.6$  МПа, произошло накопление равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку деформаций в режимах микроползучести (переход с динамической ГП в точке В) и возврата деформации (переход с динамической ГП в точке Е). Исходя из этого, можно отметить некоторые отличия наших опытов от статических.

1. Знак накопленной деформации определяется не знаком и величиной действующих статических напряжений, а знаком скорости нагружения или, точнее, скорости неупругой деформации  $\dot{\epsilon}_{in}$  в момент остановки нагружения. Это подтверждает вывод [3] об отсутствии влияния статической нагрузки на циклическую микропластичность предварительно деформированных щелочно-галлоидных кристаллов.

2. Процессы микроползучести и возврата деформации являются обратимыми, так как при продолжении нагружения или разгрузки вновь происходит возвращение на установившуюся динамическую ГП.

Для дополнительной проверки стабильности точек, получаемых в результате микроползучести и возврата деформации, время выдержки образцов в режимах микроползучести и возврата деформации в различных точках ГП изменялось в опытах от 40 до 1000 с. При этом регистрировались зависимости  $\epsilon(t) |_{\sigma = \text{const}}$ . На рис. 2, а кривая 1 показывает ГП напряжение—неупругая деформация для первого цикла нагружения образца NaCl по пилообразному закону  $\sigma(t)$  (т. е. после выдержки в точке В при минимальной нагрузке в течение длительного времени). Кривая 2 показывает динамическую ГП, полученную во втором цикле нагружения. Очевидно, что точка В также принадлежит одной из семейств квазистатических ГП. Однако в отличие от схемы на рис. 1, а точка В лежит вне динамической ГП. Причина такого различия заключается в том, что точка В находится в вершине квазистатической ГП, соответствующей одинаковой с динамической ГП (2) амплитуде  $\sigma$ , а не амплитуде  $\epsilon_{in}$ , как на рис. 1, а. Это дает большие значения  $\epsilon_{in}$  в квазистатическом случае. После остановки нагружения во втором цикле в точке А происходит возврат деформации (переход в точке В). На рис. 2, б приведена временная диаграмма процесса возврата деформации (т. е. временная развертка участка А—В на рис. 2, а). Видно, что переходный процесс завершается в течение 20—30 с. Оказалось, однако, что в режиме микроползучести при временах выдержки порядка  $10^3$  с может происходить накопление деформации около  $(2-3) \cdot 10^{-6}$ . Эти величины на два порядка меньше, чем полученные в [13] при исследовании ползучести при малых напряжениях кристаллов NaCl с близкими к нашим значениями предела текучести. Такое отличие связано, по-видимому, с тем, что в наших опытах образец перед исследованиями микропластической деформации предварительно

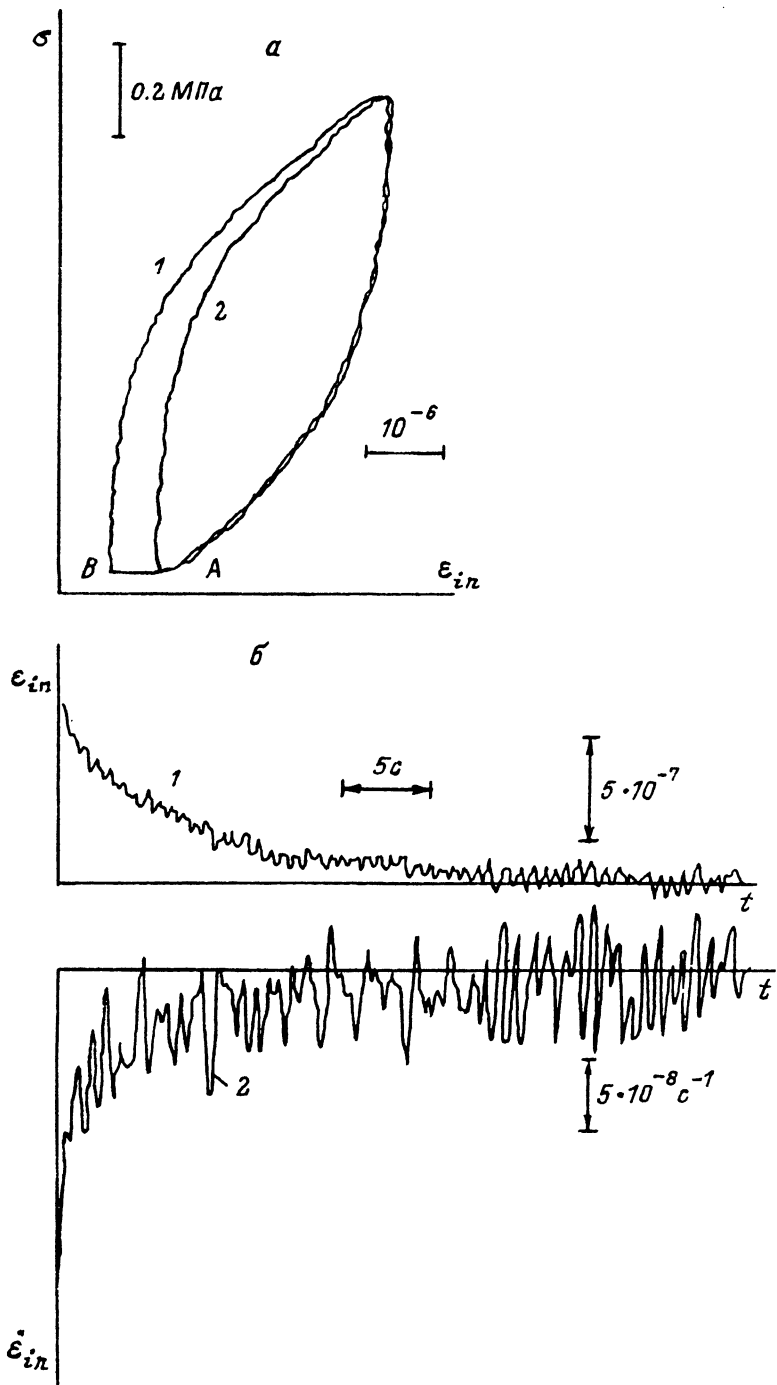


Рис. 2. Исследование режима перехода с динамической на квазистатическую ГП в режиме возврата деформации.

*a* — ГП для кристалла NaCl при пилообразном нагружении с частотой 0.5 Гц для первого (1) и второго (2) циклов нагружения; *b* — временные развертки неупругой деформации (1) и скорости неупругой деформации (2) на участке *A—B*.

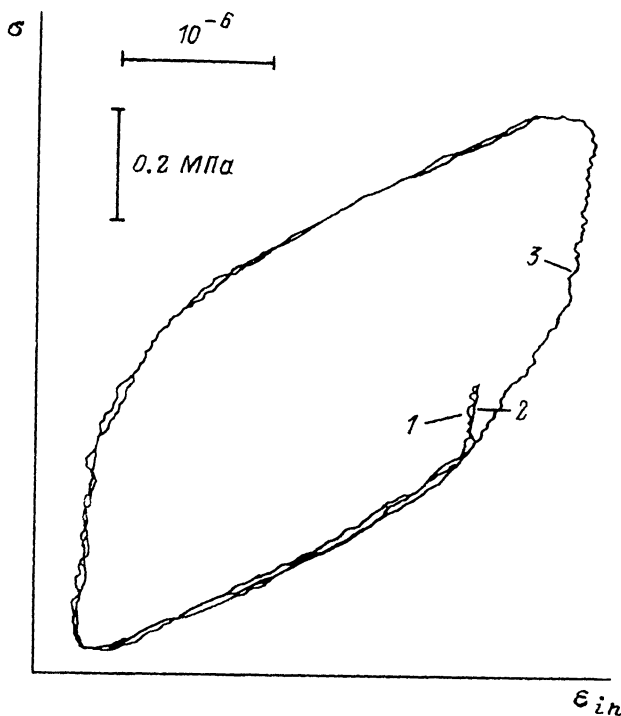


Рис. 3. Части ГП в кристалле NaCl, измеренные при пилообразном законе нагружения с частотой 1 Гц после выдержки в режиме возврата деформации в течение 40 (1) и 1000 с (2).  
Кривая 3 показывает установившуюся динамическую ГП.

пластически деформировался и выдерживался при напряжениях, близких к напряжению течения и превышающих напряжения циклического нагружения. Это подавляло накопление значительных статических деформаций при меньших приложенных напряжениях.

Здесь можно отметить два момента. Во-первых, накопление столь малых деформаций за времена порядка 1000 с соответствует скоростям деформации  $(2-3) \cdot 10^{-9}$ , которые невозможно разрешить в наших опытах. В принципе эта деформация может вызываться возможной нестабильностью температуры образца и датчика деформации (порядка 0.01 К). Во-вторых, наиболее важно, что накопление этой «статической» деформации не вызывает изменения положения точки, полученной в результате микроползучести или возврата деформации, внутри ГП. Это иллюстрирует рис. 3, где совмещены участки ГП, измеренных после выдержки образца в режиме возврата деформации в течение 40 и 1000 с. Видно, что в пределах разрешения методики (порядка  $(2-3) \cdot 10^{-8}$ ) как сама петля, так и положение начальной точки внутри ГП не изменилось. Таким образом, можно разделить обратимую «динамическую» микроползучесть предварительно деформированных кристаллов и «статическую» микроползучесть. Можно предположить, что обратимая микроползучесть и возврат деформации, регистрируемые в наших опытах после остановки циклического нагружения, обусловлены обратимым термоактивированным движением прогнутых дислокационных сегментов на небольшие расстояния, порядка расстояния между короткодействующими барьерами в плоскостях скольжения, в результате которого дислокационные сегменты принимают устойчивую конфигурацию. Очевидно, что именно такой процесс зависит от знака  $\dot{\epsilon}_{in}$ . «Статическая» микроползучесть недеформированных кристаллов при тех же напряжениях вызывает значительно

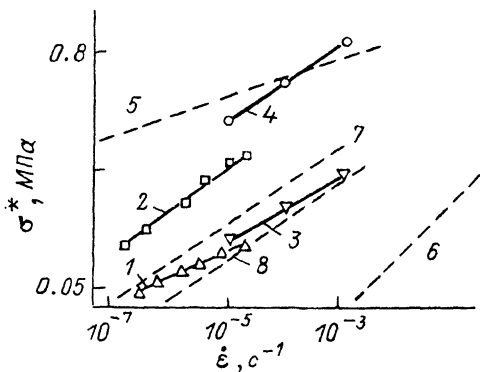


Рис. 4. Зависимости эффективных напряжений от скорости деформации для кристаллов NaCl (1, 3) и LiF (2, 4) в микропластическом диапазоне (1, 2) и при макроскопическом деформировании (3, 4).

Линии 5, 6 и 7, 8 показывают соответственно области поиска значений параметров модели и найденных их значений.

большие деформации и смещения дислокаций, порядка десятков и сотен микрон [13], разрешаемые методом избирательного травления.

Поскольку точки, полученные в результате микроползучести и возврата, не совпадают по деформации (рис. 1, б), внутри динамической существует квазистатическая ГП ненулевой площади. Таким образом, динамическая установившаяся ГП на ненулевой частоте формируется двумя компонентами напряжения: первой, которая формирует квазистатическую петлю, и второй, которая обеспечивает деформирование с ненулевой скоростью неупругой деформации  $\dot{\epsilon}_{in}$ . Эти компоненты составляют общую величину АЗВТ. Площадь квазистатической ГП соответствует гистерезисной или атермической компоненте рассеянной энергии. Площадь между установившейся и квазистатической ГП представляет часть АЗВТ, вызванную термоактивированным преодолением дислокациями короткодействующих барьеров. Только вторая компонента приложенных напряжений, которая обеспечивает деформирование с ненулевой скоростью  $\dot{\epsilon}_{in}$ , должна зависеть от скорости деформации. Эксперименты, подобные показанному на рис. 1, б, были проведены для различных частот нагружения. В этом случае напряжение  $\sigma'$ , определяемое расстоянием BC (рис. 1, а) между квазистатической и установившейся ГП, соответствует различным значениям скорости микропластической деформации  $\dot{\epsilon}_{in}$  при постоянном значении неупругой деформации  $\dot{\epsilon}_{in}$ , равной деформации в точке С квазистатической петли. Зависимости  $\sigma'(\dot{\epsilon}_{in})$  показаны на рис. 4 линиями 1 и 2. Видно, что их можно представить степенной функцией

$$\sigma' = K_1 (\dot{\epsilon}_{in})^m, \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $m$  — постоянные, различные для кристаллов NaCl и LiF.

С другой стороны, при макроскопическом деформировании приложенное напряжение также принято разделять на две компоненты: внутренние  $\sigma_i$  и эффективные  $\sigma^*$  напряжения. Известно, что для широкого круга кристаллов, включая щелочно-галогидные кристаллы, и в широком диапазоне скоростей пластической деформации (см., например, [14]) выражение, подобное (1), справедливо для эффективных напряжений и скорости макроскопической деформации. Ре-

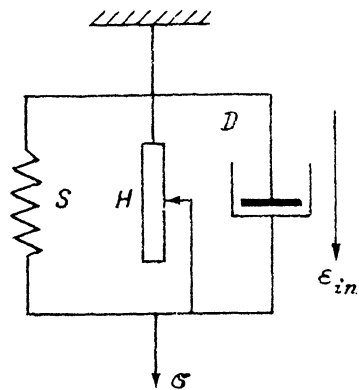


Рис. 5. Реологическая модель, описывающая неупругую микропластическую деформацию щелочно-галогидных кристаллов.

S — элемент упругости, H — элемент не локализованного гистерезиса, D — элемент нелинейной вязкости.

зультаты определения эффективных напряжений из скоростной чувствительности напряжения течения по известной методике тройного скачка скорости деформации [15] также показаны на рис. 4 для обоих типов исследованных кристаллов. Видно, что как абсолютные значения  $\sigma^*$  и  $\sigma'$ , так и характер их зависимости от скорости деформации практически одинаковы для микро- и макропластического диапазонов для кристаллов NaCl (линии 1 и 3). Для кристаллов LiF значения  $\sigma^*$  оказались несколько выше, чем  $\sigma'$  (кривые 2 и 4), однако наклон зависимостей  $\sigma'$  и  $\sigma^*$  от скорости деформации для микро- и макропластических экспериментов оказался одинаков. Таким образом, представляется возможным утверждать, что компонента эффективных напряжений формируется уже в микропластическом диапазоне. Небольшое различие в величинах  $\sigma^*$  и  $\sigma'$  для кристаллов LiF может быть отнесено за счет наличия амплитудного гистерезиса или временных зависимостей АЗВТ в кристалле LiF. Оно обсуждается подробнее в [5]. Продолжая аналогию с макроскопической деформацией, можно заключить, что вторая компонента приложенных напряжений, не зависящая от скорости микропластической деформации, представляет собой компоненту внутренних напряжений  $\sigma_i$ . Тогда квазистатическая петля образуется гистерезисом полей внутренних напряжений. Механизм силового квазистатического АЗВТ в этом случае согласуется с моделью, предложенной в [10]. Окончательно, как и для макроскопической деформации, приложенное напряжение

$$\sigma(t) = \sigma_i(t) + \sigma^*(t). \quad (2)$$

Для расчета двух компонент АЗВТ необходимо знать форму квазистатической ГП. В принципе для этого может быть использована регистрация микроползучести и возврата деформации при различных значениях приложенных напряжений  $\sigma$ . В [6] было предложено в расчетах представлять зависимость  $\sigma_i$  от  $\varepsilon_{in}$  в виде степенной функции

$$\varepsilon_{in}(t) = K_2 (\sigma_i(t))^n, \quad (3)$$

где  $K_2$  и  $n$  — некоторые постоянные. Симметрия и независимость формы ГП от статической нагрузки [3, 6] позволяют утверждать, что соотношение (3) справедливо для каждой из ветвей ГП (т. е. для участков нагружения и разгрузки). Начало координат при этом помещается в соответствующей вершине ГП.

### 3. Построение реологической модели и определение ее параметров

Выражения (1), (2) и (3) позволяют для описания обратимой неупругой деформации составить реологическую модель (рис. 5). Соотношение (1) описывает элемент вязкого трения  $D$  с нелинейной зависимостью от скорости деформации. Согласно [1], квазистатическая ГП в виде (3) представляется гистерезисным элементом распределенного трения  $H$  параллельно с источником возвращающей силы — элементом упругости  $S$ . Параллельное соединение  $D$ ,  $H$  и  $S$  означает суммирование, согласно (2), эффективных и внутренних напряжений на ветви ГП, соответствующей нагружению. Из (1), (2) и (3) следует

$$\varepsilon_{in}(t) = K_2 (\sigma(t) - K_1 (\dot{\varepsilon}_{in}(t))^m)^n. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее ветвь нагружения ГП. Ветвь ГП, соответствующая разгрузке, строится из соображений симметрии. Решив уравнение (4) для заданного закона  $\sigma(t)$ , можно получить ГП и определить все экспериментально определяемые

характеристики. Для расчетов необходимы значения четырех параметров реологической модели  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  и  $n$ . Как было показано выше, значения двух из них ( $K_1$  и  $m$ ) могут быть получены из данных о скоростной чувствительности напряжения течения (1). Оставшиеся два ( $K_2$  и  $n$ ) — из зависимости внутренних напряжений от микропластической деформации (соотношение (3)). В работе, однако, применялся иной способ определения параметров. При этом он служил дополнительной независимой проверкой применимости предложенных зависимостей (1) и (3). Уравнение (4) решалось численно методом Рунге—Кутты с использованием алгоритма [16] для произвольных значений параметров  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  и  $n$ . Численные значения этих параметров выбирались таким образом, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение рассчитанной и экспериментальной ГП.

При подборе параметров использовался метод случайного поиска [17], что позволило значительно сократить время вычислений. В качестве примера на рис. 4 линии 5 и 6 показывают область, соответствующую заданному диапазону поиска значений параметров  $K_1$  и  $m$  для кристалла NaCl, а линии 7 и 8 ограничивают область, соответствующую найденным их значениям. Видно, что эта достаточно узкая область хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями  $\sigma^*$  ( $\dot{\epsilon}_{in}$ ) как для микро-, так и для макропластической деформации. Это подтверждает корректность поиска параметров уравнения (4) в виде (1) и (3). Кроме того, этот метод нахождения  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  и  $n$  оказывается достаточно простым экспериментально, поскольку для его использования достаточно иметь только одну экспериментально определенную ГП для произвольной частоты и амплитуды деформации.

#### Список литературы

- [1] Gremaud G. // J. de Phys. 1987. V. 48. N 12. Coll. C8. P. C8—15—C8—30.
- [2] Asano S. // J. Phys. Soc. Jap. 1970. V. 29. N 4. P. 952—963.
- [3] Кустов С. Б., Голяндин С. Н., Кардашев Б. К. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 7. С. 2167—2176.
- [4] Кустов С. Б., Воинова О. А., Никифоров А. В. // Внутреннее трение в исследовании металлов, сплавов и неметаллических материалов. М., 1989. С. 245—248.
- [5] Кустов С. Б., Голяндин С. Н., Кардашев Б. К. и др. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 2. С. 260—263.
- [6] Кустов С. Б., Голяндин С. Н., Кардашев Б. К. // Препринт ФТИ-1456. Л., 1990. 51 с.
- [7] Гранато А., Люкке К. // Ультразвуковые методы исследования дислокаций: Пер. с англ. М., 1963. С. 27—57.
- [8] Indenbom V. L., Chernov V. M. // Phys. Stat. Sol. (a). 1972. V. 14. N 1. P. 347—354.
- [9] Ishii K. // J. Phys. Soc. Jap. 1983. V. 52. N 1. P. 141—148.
- [10] Kressel H., Brown N. // Dislocation Dynamics / Ed. A. Rosenfield et al. N. Y., 1968. P. 337—354.
- [11] Челноков В. А., Степанов В. А., Кузьмин Н. Л. // ФТТ. 1970. Т. 12. № 3. С. 841—847.
- [12] Лихачев В. А., Швецова В. А. // Проблемы прочности. 1984. № 11. С. 57—62.
- [13] Предводителев А. А., Ракова Н. К., Чеботарева Е. С. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 6. С. 1834—1838.
- [14] Смирнов Б. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л., 1981. 236 с.
- [15] Ивенс А., Роулингс Р. Термически активируемые процессы в кристаллах. М., 1973. С. 172—206.
- [16] Форсайт Дж., Малькольм М., Моулдер К. Машинные методы математических вычислений. М., 1980. 280 с.
- [17] Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М., 1975. 534 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
6 августа 1992 г.