

УДК 548.4

© 1990

## СБРОСООБРАЗОВАНИЕ В КРИСТАЛЛАХ ИОДИСТОГО ЦЕЗИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ

А. М. Петченко, Д. Л. Строилова, А. А. Урусовская,  
О. М. Смирнова

Исследовано явление сбросообразования в кристаллах CsI, деформированных вдоль оси сжатия, составляющей угол  $\alpha = 1 \div 7^\circ$  к направлению  $\langle 100 \rangle$ , в интервале температур 300—550 К и диапазоне скоростей  $3 \cdot 10^{-6} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . На основе анализа полученных данных сделан вывод о том, что до появления полос сброса в объеме кристалла протекает пластическая деформация. Кроме того, установлено, что закономерности изменения предела сбросообразования в зависимости от скорости деформации и температуры такие же, как и закономерности для предела текучести в случае деформирования кристалла вдоль направления  $\langle 110 \rangle$ . Обнаружено, что до предела сбросообразования, так же как и до предела текучести, при остановке сжимающих пуансонов не происходит релаксации напряжений.

При сжатии кристаллов CsI вдоль направления, близкого к одному из взаимно ортогональных направлений скольжения  $\langle 100 \rangle$ , наблюдается специфическое проявление пластической деформации — сбросообразование. До сих пор сбросообразование было исследовано в образцах с довольно сильным отклонением оси сжатия от  $\langle 100 \rangle$  — около  $10^\circ$  [ $1^{-3}$ ]. В предыдущих работах были получены указания на то, что сбросообразованию предшествуют скольжение и упрочнение кристалла. Представлялось интересным проследить за деформацией CsI с еще более жесткой ориентировкой и изучить влияние на деформацию таких образцов угла  $\alpha$  отклонения оси сжатия от  $\langle 100 \rangle$ , скорости и температуры деформации. Ранее было изучено влияние ориентировки образцов и температуры на предел сбросообразования CsI [ $4, 5$ ], однако авторы [ $4, 5$ ] обнаружили огромный разброс данных в области ориентировок  $\alpha < 10^\circ$  и температур ниже  $200^\circ \text{C}$ , который нуждается в объяснении.

Было также намерение изучить особенности термоактивированной деформации CsI перед сбросообразованием. Настоящая статья посвящена исследованию характеристик сбросообразования кристаллов CsI в зависимости от указанных выше условий.

Для изучения сбросообразования использованы кристаллы, выращенные в вакууме методом Киропулоса. Технология изготовления образцов и режим отжига на воздухе приведены в [ $6$ ]. Ориентировка образцов при изготовлении их определялась по фигурам удара. При последующем рентгенографическом контроле выяснилось, что изготовленные образцы имели ориентировку с углом отклонения  $\alpha$  от  $\langle 100 \rangle$  от  $20'$  до  $7^\circ$ . При обработке некоторых результатов мы полагали образцы с  $\alpha = 20' \div 1^\circ$ , имеющими  $\alpha = 1^\circ$ , с  $\alpha = 2^\circ 45' \div 3^\circ 20'$  —  $\alpha = 3^\circ$  и с  $\alpha = 6^\circ 45' \div 7^\circ 20'$  —  $\alpha = 7^\circ$ . Деформация сжатием осуществлялась на установке типа «Инстрон» при температурах 300—550 К в диапазоне скоростей  $3 \cdot 10^{-6} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

На рис. 1 приведены кривые сжатия  $\sigma - \epsilon$  кристаллов CsI с разным углом  $\alpha$ . Видно, чем больше угол  $\alpha$ , тем ниже напряжение появления первого сброса, тем меньше соответствующий скачок напряжений и угол наклона к оси деформаций непосредственно перед появлением сброса. По-

следующие сбросы появляются при все уменьшающихся напряжениях (вставка на рис. 1), причем относительный спад напряжений при сбросообразовании  $\Delta\sigma/\sigma_c = E_s$  линейно растет с ростом  $\alpha$  (рис. 2, кривая 3).

Спад  $E_s$  с ростом  $\alpha$  согласуется с представлением о связи сбросообразования с потерей пластической устойчивости [2]. Таким образом, даже при малейшем отклонении оси сжатия от направления скольжения  $\langle 100 \rangle$  сбросообразованию предшествует пластическая деформация. Это же подтверждает исследование ориентационной и температурной зависимости предела сбросообразования  $\sigma_c$ .

На рис. 2 показаны кривые  $\sigma_c(\alpha)$  для двух скоростей деформации. С этими зависимостями в точности совпадает зависимость от угла  $\alpha$  скальвающего напряжения, рассчитанного по  $\sigma_c$  и фактору Шмида для основной системы скольжения  $\{110\}\langle 100 \rangle$ . Такое совпадение ранее было предсказано Гилманом [7].

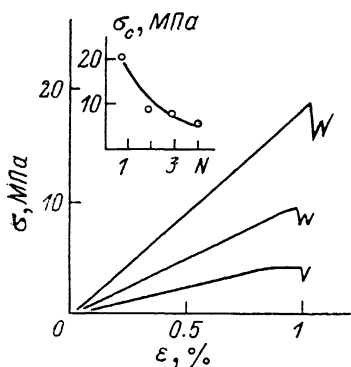


Рис. 1. Кривые сжатия кристаллов CsI до появления первых сбросов при различных углах отклонения оси сжатия от  $\langle 100 \rangle$ .

$\alpha^\circ$ : 1 — 1, 2 — 3, 3 — 7, 300 К.  
 $\dot{\epsilon}$  —  $10^{-5}$  с $^{-1}$ .

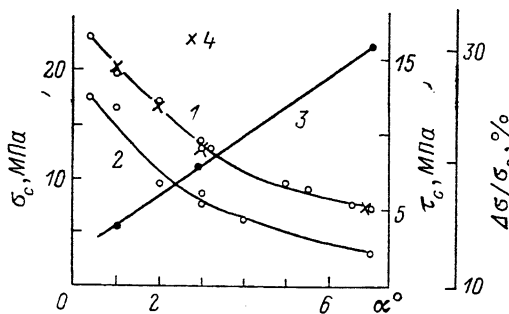


Рис. 2. Зависимости предела сбросообразования при скоростях деформации  $10^{-3}$  (1) и  $10^{-4}$  с $^{-1}$  (2) и приведенного напряжения при сбросообразовании от угла  $\alpha$  (3).

4 — скальвающее напряжение  $\tau_c$ , рассчитанное по  $\sigma_c$  и фактору Шмида. 300 К.

На рис. 3 приведены температурные зависимости  $\sigma_c$  при разных скоростях деформации  $\dot{\epsilon}$  для образцов с  $\alpha = 2^\circ$ .<sup>1</sup> Эти зависимости очень похожи на соответствующие кривые для предела текучести CsI ориентировки  $\langle 110 \rangle$  [8], в обоих случаях имеет место атермичность характеристик до 400 К. Следует обратить внимание на отсутствие разброса  $\sigma_c(\alpha, T)$ , что мы объясняем учетом истинной ориентировки каждого испытанного образца. Разброс экспериментальных значений  $\sigma_c(\alpha, T)$  в [4, 5] связан, по-видимому, с различной ориентацией испытанных образцов.

Рис. 4 иллюстрирует скоростную зависимость  $\sigma_c$  в образцах с различным  $\alpha$ . Видно очень сильное влияние угла отклонения оси сжатия от  $\langle 100 \rangle$  на ход  $\sigma_c(\dot{\epsilon})$ . Если эту зависимость перестроить в двойном логарифмическом масштабе, то выявится возможность аппроксимировать зависимость  $\sigma_c(\dot{\epsilon})$  выражением

$$\sigma_c \sim \dot{\epsilon}^n,$$

где  $n$  — функция угла  $\alpha$ . Для испытанных образцов  $n$  варьирует от 0.08 ( $\alpha = 1^\circ$ ) до 0.2 ( $\alpha = 7^\circ$ ). Таким образом, скоростная чувствительность  $\sigma_c$  растет с отклонением оси сжатия от направления скольжения.

Нашему намерению провести термоактивационный анализ зависимостей  $\sigma_c(T, \dot{\epsilon})$  помешали два обстоятельства: во-первых, атермичность  $\sigma_c$  в области температур, когда локальные препятствия стабильны (выше

<sup>1</sup> Эти зависимости получены на более жестких кристаллах CsI, поэтому значения  $\sigma_c$  выше, чем на других рисунках.

380 К происходит их перестройка [9]); во-вторых, отсутствие релаксации напряжений на всем участке кривой  $\sigma(\xi)$  до сброса, что не дало возможности оценить эффективные напряжения, действующие на дислокации. Анализируя экспериментальные результаты по сбросообразованию [10], нетрудно заметить, что для других кристаллов при  $\alpha \leq 10^\circ$  зависимость  $\sigma(\xi)$  имеет такой же вид, как и для CsI. А это может означать, что проведение термоактивационного анализа зависимости  $\sigma_c(T, \dot{\xi})$  для других кристаллов в силу вышеуказанных трудностей также является затруднительным.

В связи с этим для исследования процессов сбросообразования представляется уместным обратиться к акустической методике [11], которая позволяет следить за тонкими структурными изменениями в образце, не проявляющимися в макроопытах. Следуя этому, нами недавно были получены предварительные результаты на CsI [12], которые, по-видимому, оправдывают такой подход.

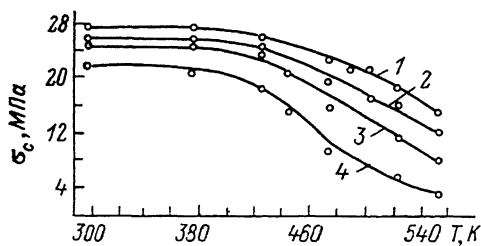


Рис. 3. Температурная зависимость предела сбросообразования при разных скоростях деформации ( $\sigma_c^{-1}$ ) для образцов с  $\alpha = 2^\circ$ .

1 —  $10^{-3}$ , 2 —  $5 \cdot 10^{-4}$ , 3 —  $10^{-4}$ , 4 —  $10^{-5}$ .

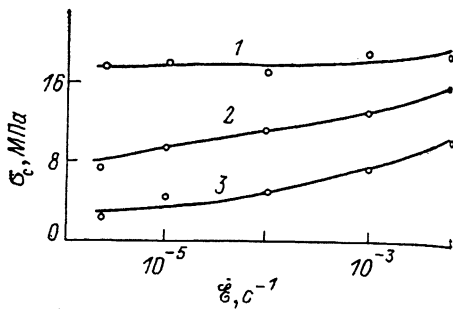


Рис. 4. Скоростная зависимость предела сбросообразования для образцов с  $\alpha = 1^\circ$  (1),  $3^\circ$  (2) и  $7^\circ$  (3).  $T = 300$  К.

В [12] одновременно записывались кривая нагружения  $\sigma - \xi$ , а также изменение затухания ультразвука. Оказалось, что если при деформировании кристалла произвести остановку штока деформационной машины, то наряду с отсутствием релаксации напряжений, о котором упоминалось выше, наблюдается заметный спад затухания упругих волн, что, вероятно, указывает на протекание процессов, связанных с перестройкой дислокационной структуры. Проводя повторные ступенчатые нагружения образца и измерения глубины возврата ультразвука  $\Delta\alpha_0$ , установили, что величина  $\Delta\alpha_0$  с ростом деформации изменяется по типу кривой с максимумом. При этом обнаружено, что сбросообразование всегда наступает лишь после того, как  $\Delta\alpha_0$  пройдет через максимум и снизится до минимального значения. Такое поведение  $\Delta\alpha_0$  с ростом деформации, по-видимому, свидетельствует о том, что процессу сбросообразования предшествуют скольжение и упрочнение кристалла, что согласуется с выводами [4, 5].

Разумеется, для большей обоснованности таких выводов потребуется проведение дополнительных акустомеханических и структурных исследований кристаллов CsI.

Итак, получены новые экспериментальные данные об ориентационной, температурной и скоростной зависимости сбросообразования в кристаллах CsI. Все они свидетельствуют о протекании пластической деформации до появления сброса, и все закономерности сбросообразования следуют закономерностям скольжения. Как до предела текучести, так и до предела сбросообразования при остановке сжимающих пуансонов не происходит релаксации напряжений.

- [1] Классен-Неклюдова М. В., Урусовская А. А. // Кристаллография. 1956. Т. 1. № 4. С. 410—418.
- [2] Urusovskaya A. A., Thyagarajan R. // Phys. St. Sol. (a). 1965. V. 10. N 1. P. 349—360.
- [3] Urusovskaya A. A., Chernysheva M. A., Klassen-Neklyudova M. V. // Cryst. Res. and Techn. 1982. V. 17. N 7. P. 871—873.
- [4] Бережкова Г. В., Регель В. Р. // Кристаллография. 1960. Т. 6. № 6. С. 140—143.
- [5] Регель В. Р., Бережкова Г. В. // Кристаллография. 1959. Т. 4. № 5. С. 761—767.
- [6] Петченко А. М., Строилова Д. Л., Урусовская А. А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 11. С. 3456—3459.
- [7] Gilman J. J. // J. Metals. 1954. V. 6. N 5. P. 621—629.
- [8] Урусовская А. А., Сизова Н. Л., Добржанский Г. Ф. // Кристаллография. 1975. Т. 20. № 2. С. 110—115.
- [9] Урусовская А. А., Гартманова М., Ганиц Ф. и др. // Кристаллография. 1984. Т. 29. № 3. С. 513—522.
- [10] Бирковский А. А., Владимиров В. И., Романов А. Е. // Дисклинации и ротационная деформация твердых тел. Л., 1988. С. 5—46.
- [11] Петченко А. М., Мозговой В. И., Сиренко А. Ф., Урусовская А. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 127—130.
- [12] Urusovskaya A. A., Petchenko A. M., Stroilova D. L., Smirnova O. M. // Coll. Abstracts 12 European Crystallographic Meeting (ECM-12). Moscow, USSR, August, 1989. P. 440.

Харьковский институт  
инженеров коммунального строительства  
Харьков

Поступило в Редакцию  
19 мая 1989 г.  
В окончательной редакции  
14 ноября 1989 г.