

УДК 548.0 : 539; 539.4.016.2

© 1990

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ NaCl : Ca ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Ю. С. Боярская, Р. П. Житару, Н. А. Палистрант

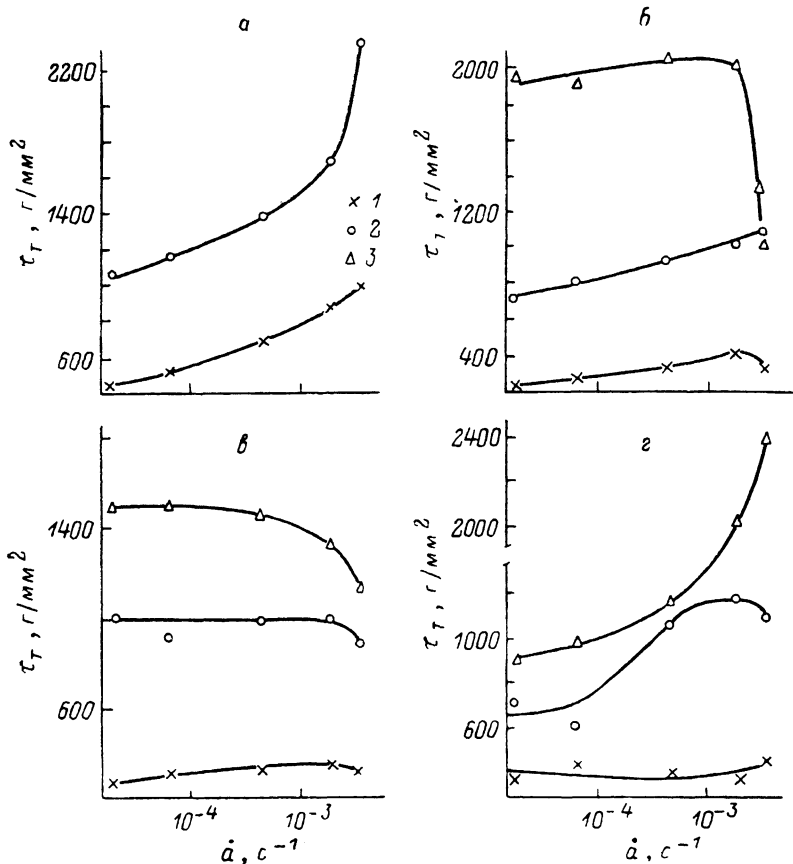
Монокристаллы NaCl : Ca подвергались одноосному сжатию в интервале скоростей деформирования  $8.3 \cdot 10^{-6} - 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и области температур 77—473 К. Обнаружены аномальные скоростные зависимости предела текучести. Это явление объяснено разбиением примесных комплексов в процессе пластической деформации.

Для понимания механизма пластической деформации кристаллов необходимо исследовать влияние различных факторов на параметры, характеризующие эту деформацию. Одним из таких факторов является скорость деформирования. В ряде работ, выполненных на ионных кристаллах [1-5], металлах [6-8] и полупроводниках [9], показано, что с ростом скорости деформации наблюдается возрастание предела текучести, деформирующего напряжения и протяженности первой стадии кривой упрочнения [1, 7]. Обнаружено, что скорость влияет на скачкообразность пластической деформации на стадии микропластичности [10] и более поздних стадиях кривой упрочнения [4]. Однако сравнительно мало исследований проведено на легированных кристаллах или кристаллах, содержащих радиационные дефекты [1-4]. Кроме того, полученные результаты в ряде случаев представляются противоречивыми [4, 10]. В связи с изложенным в настоящей работе поставлена цель: на кристаллах NaCl : Ca ( $\text{Ca}^{+2}$  — хорошо растворимая примесь, обладающая дырочно-акцепторными свойствами) изучить закономерности пластической деформации в широком интервале скоростей деформирования ( $8 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ) и в области температур 77—473 К. Кристаллы, содержащие концентрацию примеси  $C$  в пределах  $10^{-3} - 1.6 \cdot 10^{-1}$  мол. %, были выращены методом Чохральского. Образцы для исследования выкалывались по плоскостям спайности и имели размеры  $3 \times 3 \times 9$  мм. Сжатие кристаллов вдоль оси [001] осуществлялось на машине «Instron». Наряду с кривыми напряжение—деформация изучались и дислокационные структуры, возникающие при сжатии. Для этих исследований использовался метод избирательного травления.

На рисунке представлены зависимости предела текучести от скорости сдвиговой деформации  $\dot{\epsilon}$  для кристаллов NaCl : Ca, полученные при разных температурах. При температуре жидкого азота для всех исследованных кристаллов наблюдалось возрастание предела текучести  $\tau_f$  с ростом скорости деформирования, особенно ярко выраженное для образцов с концентрацией примеси  $C = 3.65 \cdot 10^{-2}$  мол. %. Кристаллы, содержащие максимальную концентрацию примеси ( $1.6 \cdot 10^{-1}$  мол. %), были настолько хрупки при 77 К, что нельзя было получить кривую упрочнения даже при самой низкой скорости деформирования. При травлении таких образцов полосы скольжения практически не выявлялись, а обнаруживались картины разрушения.

В случае деформирования при комнатной температуре были сняты кривые упрочнения для всех исследуемых кристаллов NaCl : Ca, на ос-

новании которых были построены зависимости предела текучести. На рисунке, б в качестве примера приведены такие зависимости для образцов, содержащих три различные концентрации примеси. Обращает на себя внимание тот факт, что, помимо обычно наблюдаемого возрастания  $\tau_T$ , с ростом скорости деформации имеет место падение  $\tau_T$ , особенно резкое для максимальной скорости ( $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ) и максимальной концентрации примеси ( $1.6 \cdot 10^{-1}$  мол. %). Для кристаллов с  $C = 3.65 \times 10^{-2}$  мол. % зависимость  $\tau_T(\dot{a})$  имела обычный вид, однако аномальный



Зависимость предела текучести от скорости деформирования кристаллов NaCl : Ca. Температура деформирования, К: а — 77, б — 293, в — 373, г — 473. Концентрации примеси, мол. %: 1 —  $10^{-3}$ , 2 —  $3.65 \cdot 10^{-2}$ , 3 —  $1.6 \cdot 10^{-1}$ .

ход этой зависимости проявился при повышенных температурах (см. рисунок, в, г). Ярко выраженное падение  $\tau_T$  при повышении скорости деформирования наблюдалось при 373 К и для образцов, содержащих максимальную концентрацию кальция (см. рисунок, в). Однако при 473 К для таких образцов имел место обычный ход зависимости  $\tau_T(\dot{a})$  (см. рисунок, г).

Аномальное поведение предела текучести можно объяснить следующим образом. Под влиянием пластической деформации происходит изменение состояния примеси, в частности разбиение примесных комплексов. Если эти комплексы являются более сильными препятствиями для движения дислокаций, чем возникающие, более мелкие дефекты, то происходит разрушение кристалла. В ряде работ на ионных [11] и полупроводниковых [12] кристаллах, а также на металлах [13, 14] получены результаты, свидетельствующие о перераспределении примеси в процессе пластического деформирования, разрушении примесных комплексов [13, 15] и разбиении precipitates движущимися дислокациями [16].

В [14] показано, что механизм взаимодействия дислокаций с частицами, вкрапленными в матрицу, зависит от скорости дислокаций.<sup>1</sup> Критическая скорость пластической деформации, при которой происходит переход от одного механизма к другому, зависит от размера частиц и от температуры деформирования. Это соответствует нашим результатам; уменьшение  $\tau_T$  наблюдается при определенных концентрациях примеси (определенных размерах примесных комплексов) и определенных температурах. Область скоростей деформации, в которой экспериментально наблюдается переход от одного механизма деформирования к другому ( $10^{-3}$ — $10^{-2}$  с<sup>-1</sup>) [14], неплохо согласуется со значениями  $\dot{\epsilon}$ , при которых обнаружена аномалия  $\tau_T$ . Оценим примерно величину эффекта, который можно ожидать вследствие разрезания примесных комплексов движущимися дислокациями. Из картин декорирования золотом поверхностей кристаллов NaCl : Ca [11] следует, что в образцах с  $C = 5.8 \cdot 10^{-2}$  мол. % размер комплексов  $\sim 4 \cdot 10^{-2}$  мкм, при  $C = 10^{-3}$  мол. % скопления декорирующих частиц практически отсутствовали. При комнатной температуре  $\tau_T = 1500$  г/мм<sup>2</sup> для первых кристаллов и 300 г/мм<sup>2</sup> для вторых, т. е. изменение предела текучести с ростом концентрации примеси  $\Delta\tau = 1200$  г/мм<sup>2</sup>. На монокристаллах NaCl, содержащих точечные дефекты и деформированных одноосным сжатием ( $\tau_T = 325$  г/мм<sup>2</sup>), нами интерферометрическим методом были измерены ступеньки сдвига, средняя величина которых оказалась равной 0.4 мкм. При прохождении через кристалл дислокаций, дающих такую ступеньку сдвига, частицы размером 0.04 мкм могут быть разрезаны пополам. Это в свою очередь может привести к уменьшению  $\Delta\tau$  примерно в два раза, т. е.  $\Delta\tau \sim 600$  г/мм<sup>2</sup> (подчеркнем, что эта оценка весьма приближенна; помимо размера стопоров, на  $\tau_T$  влияют их количество, их природа),  $\Delta\tau/\tau_T = 40$  %, таким образом, можно ожидать, что уменьшение  $\tau_T$  при рассматриваемом процессе может достигать нескольких десятков процентов. Из рисунка следует, что при комнатной температуре для образцов с  $C = 1.6 \cdot 10^{-1}$  мол. % уменьшение предела текучести  $\sim 50$  %. При температуре 373 К эта величина составляет 20 и 10 % для кристаллов, содержащих концентрацию примеси  $1.6 \cdot 10^{-1}$  и  $3.65 \cdot 10^{-2}$  мол. % соответственно. Эти результаты свидетельствуют, что наблюдаемое разупрочнение при высоких скоростях деформации может быть связано с разбиением примесных комплексов.

Можно рассмотреть и альтернативное объяснение наблюдаемого в работе эффекта, связав его с проявлением сверхпластичности (СП). Это явление хорошо известно в металлах, а недавно было обнаружено и в ионных кристаллах типа NaCl [17]. Основными признаками СП являются высокая скоростная чувствительность напряжения течения и достижение больших степеней деформации [18, 19]. Нами были проведены специальные эксперименты на кристаллах NaCl : Ca для двух случаев: при наличии и отсутствии аномальной зависимости  $\tau_T$  ( $\dot{\epsilon}$ ). Обнаружено, что скоростная чувствительность  $\sigma$  в обоих случаях практически одинакова. Кривые  $\sigma(\dot{\epsilon})$  для условий деформирования, соответствующих аномальной скоростной зависимости  $\tau_T$ , не обладали аномальной протяженностью (кристаллы разрушались при  $\epsilon \sim 10$  %), тонкая структура на них за пределом текучести не наблюдалась.

Поэтому можно сделать заключение, что обнаруженная в настоящей работе аномальная скоростная зависимость предела текучести вряд ли связана с явлением СП. Для выяснения природы этого явления необходимо проведение дальнейших исследований.

#### Список литературы

- [1] Смирнов Б. И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 235 с.

<sup>1</sup> В работе [14] в отличие от нашей рассматриваются недеформируемые частицы. Однако для нас наиболее важным является тот факт, что механизм взаимодействия дислокаций с частицами при низких и высоких скоростях деформации резко различен.

- [2] Житару Р. П., Клявин О. В., Смирнов Б. И. // Изв. АН МССР, сер. физ. техн. и матем. наук. 1972. № 2. С. 39—46.
- [3] Клявин О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. М.: Наука, 1987. 255 с.
- [4] Orozko E., Agullo-Lopez F. // Acta Metall. 1986. V. 34. N 9. P. 1701—1709.
- [5] Urusovskaya A. A., Darinskaya E. V., Voszka R., Jansky J. // Cryst. Res. and Techn. 1981. V. 16. N 5. P. 597—601.
- [6] Шмид Е., Боас В. Пластичность кристаллов, в особенности металлических. ГОНТИ НКТП СССР, 1938. 316 с.
- [7] Бернер Р., Кронмюллер Г. Пластическая деформация монокристаллов. М.: Мир, 1969. 272 с.
- [8] Sample V. M., Fitzsimons G. J., de Ardo A. I. // Acta Metall. 1987. V. 35. N 2. P. 367—381.
- [9] Siethoff H., Völkl J., Gerthsen D., Brion H. G. // Phys. St. Sol. (a). 1987. V. 101. N 1. P. K13—K18.
- [10] Головин Ю. И., Шибков А. А. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 11. С. 3492—3499.
- [11] Боярская Ю. С., Кац М. С., Житару Р. П., Линте М. А. // Изв. АН МССР, сер. физ. 1984. Т. 48. № 9. С. 1667—1670.
- [12] Кожух М. Л., Кляцкина И. В., Рывкин С. М., Трупов В. А., Шлимак И. С. Легирование полупроводников. М.: Наука, 1982. 236 с.
- [13] Differt K., Essman U., Mughrabi H. // Phys. St. Sol. (a). 1987. V. 104. N 1. P. 95—106.
- [14] Huphreys F. J., Kalu P. N. // Acta Metall. 1987. V. 35. N 12. P. 2815—2829.
- [15] Берлов П. А., Буланый М. Ф., Омельченко С. А., Якунин А. Я. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2854—2856.
- [16] Milevskii L. S., Tkacheva T. M., Urusovskaya A. A., Knab G. G. // Cryst. Res. and Techn. 1981. V. 16. N 1. P. 95—99.
- [17] Линте М. А. // Автореф. канд. дис. Кишинев, 1985.
- [18] Бережкова Г. В., Регель В. Р., Салков А. В. // ДАН СССР. 1988. Т. 303. № 1. С. 102—104.
- [19] Кайбышев О. А., Имаев Р. М., Имаев М. Ф. // ДАН СССР. 1989. Т. 305. № 5. С. 1120—1123.

Институт прикладной физики АН МССР  
Кишинев

Поступило в Редакцию  
26 декабря 1988 г.  
В окончательной редакции  
11 августа 1989 г.