

05;12

## **Концентрационная зависимость влияния скорости деформирования на предел текучести при одноосном сжатии легированных кристаллов NaCl в интервале температур 77–773 К**

© Р.П. Житару, Н.А. Палистрант, В.А. Рахвалов

Институт прикладной физики АН Молдовы, Кишинев

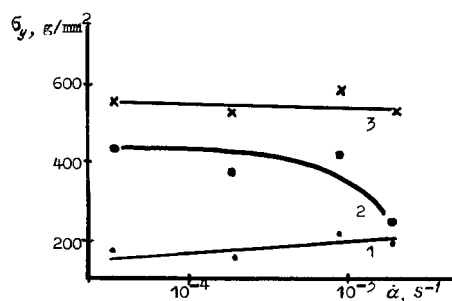
Поступило в Редакцию 10 июня 1997 г.

Описаны данные по аномалиям в зависимости предела текучести кристаллов каменной соли от скорости деформирования при варьировании состава и концентрации примесей и температуры.

Предложены объяснения аномалий на основе специфики движения дислокаций в атмосфере примесей.

Известно, что при повышении скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$  при одноосном сжатии щелочно-галогидных кристаллов предел текучести  $\sigma_y$  возрастает [1–4]. Однако такая скоростная зависимость предела текучести не всегда имеет место для легированных кристаллов; наряду с обычной зависимостью  $\sigma_y(\dot{\epsilon})$  при определенных условиях испытания и некоторых концентрациях примеси для кристаллов NaCl наблюдается и необычная, когда обнаруживается не увеличение, а падение предела текучести с ростом скорости деформации [5,6]. Противоречивыми в ряде случаев также представляются и результаты, полученные для легированных кристаллов в работах [3,7]. Это связано с тем, что сравнительно мало проведено исследований влияния скорости на процессы деформации кристаллов, содержащих примесные дефекты разного типа. В связи с изложенным, в настоящей работе изучено влияние типа и концентрации примеси на зависимость предела текучести от скорости испытания в широком интервале температур с целью более глубокого понимания механизма пластической деформации кристаллов.

Исследовались кристаллы NaCl, легированные Ca, Pb и Sr, выращенные по методу Чохральского в Томском политехническом институте.



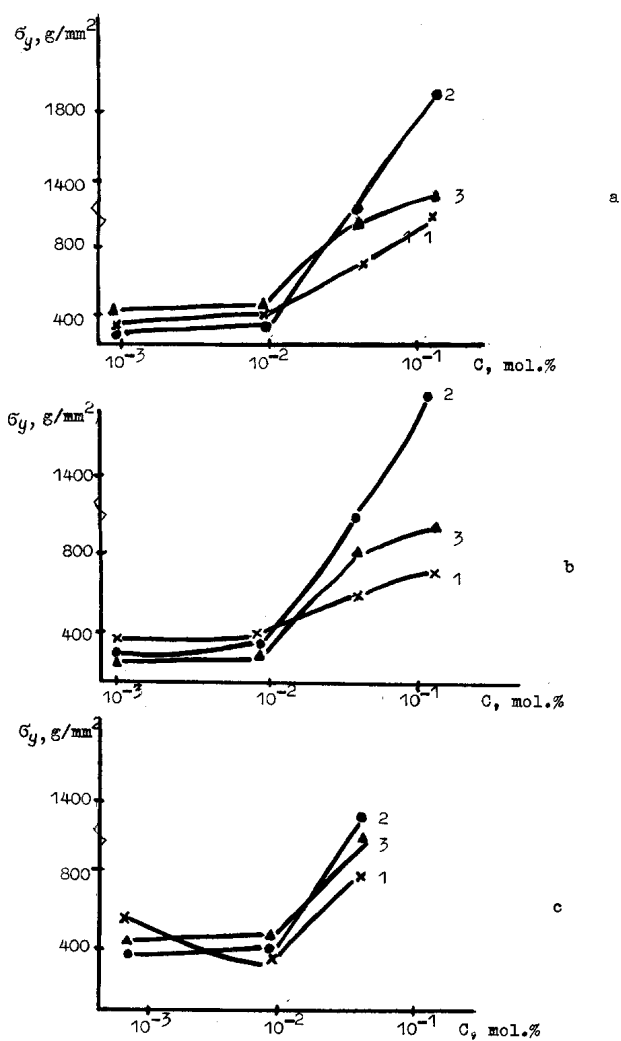
**Рис. 1.** Скоростная зависимость предела текучести для кристаллов NaCl:Sr.  $C$ , mol.‰:  $3.7 \cdot 10^{-4}$  (1);  $6 \cdot 10^{-3}$  (2) и  $1.8 \cdot 10^{-2}$  (3).

Концентрация примесей в расплаве  $C_{\text{ш}}$  варьировалась в интервале  $10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-1}$  mol.‰. Однако ее содержание в кристалле  $C$  отличалось от  $C_{\text{ш}}$ , зависело от типа примеси и варьировалось для Ca:  $10^{-3}$ – $1.6 \cdot 10^{-1}$ ; Pb:  $2 \cdot 10^{-4}$ – $1.65 \cdot 10^{-2}$  и Sr:  $2 \cdot 10^{-4}$ – $1.8 \cdot 10^{-2}$  mol.‰. Образцы для исследований выкалывались по плоскостям спайности и имели размеры  $4 \times 4 \times 12$  mm. Одноосное сжатие кристаллов вдоль оси [001] осуществлялось на машине "Instron" в интервале скоростей  $6.6 \cdot 10^{-5}$ – $3.4 \cdot 10^{-3}$  s<sup>-1</sup>. Температура деформирования изменялась в пределах 77–773 K.

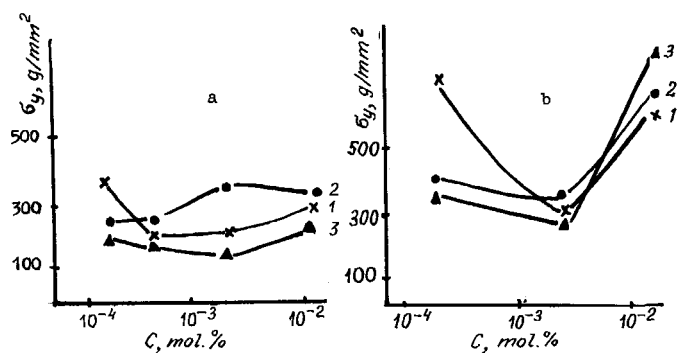
На рис. 1 представлены результаты изменения предела текучести  $\sigma_y$  от скорости сдвиговой деформации  $\dot{\alpha}$  для кристаллов NaCl:Sr, содержащих различные концентрации  $C$  стронция. Видно, что характер зависимости  $\sigma_y(\dot{\alpha})$  существенно отличается при переходе от одной концентрации к другой. Обычный вид зависимости  $\sigma_y(\dot{\alpha})$ , т. е. рост предела текучести с ростом скорости деформирования, наблюдается лишь для образцов, содержащих наименьшую концентрацию примеси (рис. 1, кривая 1). Для других образцов характерным является аномальное явление — уменьшение  $\delta_y$  при высоких скоростях (рис. 1, кривые 2, 3).

Существенное влияние концентрации примеси на скоростную зависимость предела текучести имело место и для других исследованных систем.

На рис. 2 представлены концентрационные зависимости предела текучести монокристаллов NaCl:Ca при разных скоростях и температурах деформации. Видно, что при всех температурах деформирования кристаллов NaCl:Ca влияние скорости на изменения предела



**Рис. 2.** Концентрационные зависимости предела текучести для кристаллов NaCl:Ca при разных скоростях сдвиговой деформации,  $\dot{\epsilon}, \text{s}^{-1}$ :  $3.4 \cdot 10^{-3}$  (1);  $3.4 \cdot 10^{-4}$  (2);  $6.6 \cdot 10^{-5}$  (3). Температура деформирования,  $T, \text{K}$ : 373 (a); 293 (b); 150 (c).



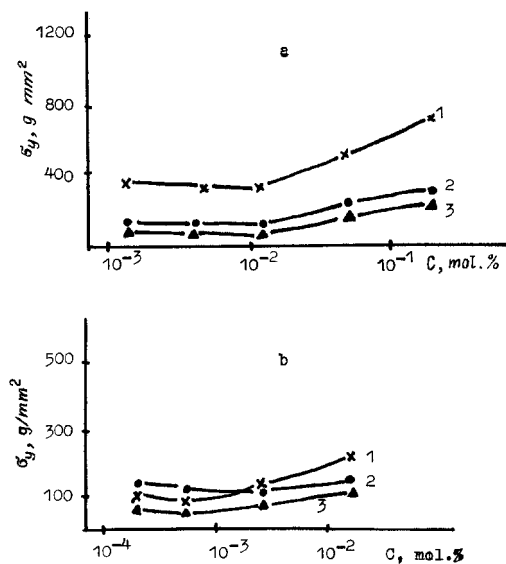
**Рис. 3.** Концентрационные зависимости предела текучести для кристаллов NaCl:Pb при разных скоростях сдвиговой деформации,  $\dot{\epsilon}, \text{s}^{-1}$ :  $3.4 \cdot 10^{-3}$  (1);  $3.4 \cdot 10^{-4}$  (2);  $6.6 \cdot 10^{-5}$  (3). Температура деформирования,  $T, \text{K}$ : 293 (a); 220 (b).

текучести существенно зависит от концентрации примеси: оно является заметным для  $C \geq 10^{-2} \text{ mol.}\%$  и практически отсутствует для малых  $C$  ( $C < 10^{-2} \text{ mol.}\%$ ).

Известно, что с ростом  $C$  примеси ее состояние в матрице кристалла изменяется<sup>1</sup> [8–9]. Учитывая этот фактор, можно заключить, что отмеченное выше различное влияние скорости на  $\sigma_y$ , по-видимому, связано с неадекватным состоянием примесных дефектов в области малых концентраций примеси и с области больших ее значений. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние скорости на предел текучести в значительной степени контролируется структурным состоянием примесных дефектов, определяемым концентрацией примеси.

Влияние концентрации примеси и ее состояния на  $\sigma_y(\dot{\epsilon})$  проявилось и для кристаллов NaCl:Pb (рис. 3). Как видно из рисунка, лишь для минимальной концентрации  $\text{Pb}^{2+}$  наблюдается обычная зависимость: рост  $\dot{\epsilon}$  сопровождается увеличением  $\sigma_y$ . Такая связь имела место практически при всех исследованных температурах. Однако иная картина выявилась

<sup>1</sup> При малых концентрациях примесь Ca в матрице кристалла в основном находится в виде диполей примесь–катионная вакансия и их агрегатов; при больших  $C$  — в виде сложных комплексов, преципитатов [8–9].



**Рис. 4.** Концентрационные зависимости предела текучести для кристаллов NaCl:Ca (a) и NaCl:Pb (b) при разных скоростях сдвиговой деформации,  $\dot{\epsilon}$ ,  $\text{s}^{-1}$ :  $3.4 \cdot 10^{-3}$  (1);  $3.4 \cdot 10^{-4}$  (2);  $6.6 \cdot 10^{-5}$  (3).  $T$ , К: 673 К.

для остальных  $C$  свинца (рис. 3). Оказалось, что при этом существенную роль играет температура испытания: изменение температуры приводило в ряде случаев к резко противоположным эффектам. Так, например, одинаковое измерение скорости от  $6.6 \cdot 10^{-5}$  к  $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  вызывало рост предела текучести при 293 К (рис. 3, a, кривые 2 и 1 лежат выше кривой 3) и его падение при 220 К (рис. 3, b,  $C \sim 10^{-2} \text{ mol.}\%$ , кривые 2) и 1 лежат ниже кривой 3); уменьшение  $\sigma_y$  при 373 К сменялось противоположным эффектом при 673 К. Следует отметить, что для всех исследованных концентраций  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  при  $T = 673 \text{ К}$ , при которой примеси диспергированы, рост скорости деформации сопровождается закономерным увеличением предела текучести, т. е. наблюдается обычная  $\sigma_y(\dot{\epsilon})$  (рис. 4).

Суммируя полученные для исследованных систем NaCl результаты, можно заключить, что  $\sigma_y(\dot{\epsilon})$  контролируется структурным состоянием

примесных дефектов, определяемым концентрацией примеси и температурой испытания.

Однако полученные данные показывают, что влияние скорости деформации на изменения параметров пластичности определяется не только состоянием примеси, но и величиной скорости сдвиговой деформации.

Необычная закономерность зависимости  $\sigma_y$  от  $\dot{\epsilon}$  обнаружена для кристаллов NaCl:Ca,  $C \geq 10^{-2}$  mol.% (рис. 2). Для образцов, содержащих равные концентрации кальция (следовательно, одинаковое его состояние в матрице), рост  $\dot{\epsilon}$  вначале приводит к повышению  $\sigma_y$  (рис. 2, кривые 2 расположены выше кривых 1), что вполне закономерно. В противоположность этому дальнейшее возрастание  $\dot{\epsilon}$  вызывает не дополнительный рост  $\sigma_y$ , а наоборот, его резкое падение (кривые 3 расположены ниже кривых 2 и 1). Такая особенность скоростной зависимости предела текучести кристаллов NaCl:Ca является характерной для всех исследованных температур, данные при некоторых  $T$  представлены на рис. 2 *a*, *b* и *c*. И только при  $T = 673$  K имеет место обычная зависимость  $\sigma_y(\dot{\epsilon})$  (рис. 4, *a*). Как отмечалось выше, при такой высокой  $T$  состояние примеси резко меняется, оно становится более диспергированным. В связи с этим анализ приведенных результатов позволяет заключить, что необычное влияние скорости деформации на изменения предела текучести наблюдается, когда примесь  $\text{Ca}^{2+}$  представляет собой крупные агрегаты, сложные комплексы, так как имеет место для больших  $C$  и температур, при которых примесь еще недостаточно разбита на мелкие агрегаты.

Особенным и интересным результатом является то, что для одного и того же структурного состояния примесных дефектов (сечение по вертикали, рис. 2) обнаруживаются противоположные эффекты: рост  $\sigma_y$  по мере возрастания скорости деформации меняется резким его падением. Такое поведение  $\sigma_y$  при высоких скоростях деформации, скорее всего, связано со значительным изменением механизма взаимодействия движущихся дислокаций с примесным центром, что, по-видимому, обусловлено различием скоростей движения дислокаций при разных скоростях сдвиговой деформации. Предлагается механизм, объясняющий резкое падение  $\sigma_y$  при высоких  $\dot{\epsilon}$ . Учитывая, что скорость деформации  $\dot{\epsilon}$  выражается в виде  $\dot{\epsilon} = \mathbf{b}\rho\bar{v}$ , где  $\mathbf{b}$  — вектор Бюргерса,  $\rho$  — плотность подвижных дислокаций,  $\bar{v}$  — средняя скорость движения дислокаций, следует заключить, что рост скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  на стадии предела

текучести может быть осуществлен либо за счет роста средней скорости движения дислокаций  $\bar{v}$ ; либо за счет увеличения скорости размножения подвижных дислокаций  $\dot{\rho}$  [11]. Однако второй способ является менее доминирующим в нашем случае, так как специальные исследования показали, что при высоких  $\dot{\epsilon}$  плотность новых дислокаций на 2–3 и более порядка ниже  $\rho$  при малых  $\dot{\epsilon}$ . Следовательно, скорость размножения дислокаций  $\dot{\rho}$  в процессе деформации меньше при высоких скоростях пластической деформации, чем при малых  $\dot{\epsilon}$ . Это позволяет предположить, что для исследованных легированных кристаллов NaCl возрастание скорости деформации осуществляется главным образом за счет увеличения средней скорости подвижных дислокаций. Приняв этот факт, полученные в работе данные можно связать со следующим. Увеличение скорости сдвиговой деформации  $\dot{\epsilon}$  приводит к повышению кинетической энергии дислокации, что дает ей возможность частично оторваться от примесной атмосферы.<sup>2</sup> Однако этот отрыв не является полным, так как дислокация обладает еще недостаточной энергией для окончательного ее освобождения от атмосферы, а атмосфера уже не может поспеть за дислокацией, что вызывает существенное дополнительное упрочнение. Этим, по-видимому, и объясняется наблюдаемое в работе возрастание предела текучести при повышении  $\dot{\epsilon}$  в пределах  $10^{-5} - 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (рис. 2, кривая 2).

Тем не менее по мере дальнейшего увеличения скорости сдвиговой деформации до  $\dot{\epsilon} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  энергия дислокации увеличивается и, возможно, становится достаточной для полного отрыва дислокации от примесных атмосфер, что существенно облегчает ее движение и сопровождается уменьшением напряжения движения. Таким образом, отрывом дислокаций от примесных атмосфер можно объяснить резкое падение предела текучести кристаллов NaCl:Ca при высоких скоростях сдвиговой деформации (рис. 2, кривая 1).

Итак, для легированных кристаллов NaCl выявлено раздельное влияние на предел текучести двух различных факторов: а) структурного состояния примесных дефектов и б) скорости сдвиговой деформации. Установлено, что влияние скорости сдвиговой деформации на  $\sigma_y$  существенно зависит от структурного состояния примесных дефектов,

<sup>2</sup> Известно, что ядро дислокации в легированных щелочно-галогидных кристаллах окружено облаками из примесных дефектов (облака Коттрелла, Сузуки, Снука) [11]. Скорее всего, в случае больших  $C$  дефектная атмосфера вокруг дислокации представляет собой в основном комплексы типа пластин  $\{310\}$  и  $\{111\}$  [12].

определяемого концентрацией примеси и температурой испытания. Выявлены две области концентраций примеси: малые  $C$  — влияние скорости на  $\sigma_y$  практически отсутствует и большие  $C$  — наблюдается существенное влияние  $\dot{\epsilon}$  на  $\sigma_y$ .

Обнаружено для кристаллов NaCl:Ca, что в зависимости от скорости деформации при одном и том же структурном состоянии примеси имеют место противоположные эффекты: рост предела текучести с ростом  $\dot{\epsilon}$ , и его резкое падение при дальнейшем увеличении скорости деформации. Предложен механизм взаимодействия быстро движущейся дислокации с дефектами, объясняющий резко различное поведение  $\sigma_y$  с ростом  $\dot{\epsilon}$ .

## Список литературы

- [1] *Смирнов Б.И.* Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 235 с.
- [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] *Orozko E., Agulo-Lopez F.* // Acta Metall. 1986. V. 34. N 9. P. 1701–1709.
- [4] *Urusovskaya A.A., Darinskaya E.V., Voszka R.* et al. // Cryst. Res. and Techn. 1981. V. 16. N 5. P. 597–601.
- [5] *Боярская Ю.С., Житару Р.П., Палистрант Н.А.* // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 3. С. 769–772.
- [6] *Боярская Ю.С., Житару Р.П., Палистрант Н.А.* // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 11. С. 3433–3435.
- [7] *Головин Ю.И., Шибков А.А.* // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 11. С. 3492–3499.
- [8] *Сойфер Л.М.* // Физика конденсированного состояния. Харьков: ФТИНТ, 1973. В. 24. С. 45–64.
- [9] *Андреев Г.А., Смирнов Б.И.* // Проблемы прочности. 1971. № 10. С. 122–124.
- [10] *Orozko E., Mendoza A., Soullard I.* et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 2. P. 249–254.
- [11] *Новиков И.И.* Дефекты кристаллической решетки металлов. М.: Metallurgia, 1988. 188 с.
- [12] *Orozco E.M., Soullard I., Zaldo C.* et al. // Philos. Mag. A. 1984. V. 50. N 3. P. 425–440.