

УДК 539.4.019.3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

О. А. ТРОИЦКИЙ, академик В. И. СПИЦЫН, П. Я. ГЛАЗУНОВ

ТОНКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБЛУЧАЕМЫХ КРИСТАЛЛОВ

При низких температурах электронная система металла может оказать существенное влияние на пластическую деформацию кристаллов. Это следует из обнаруженного недавно влияния сверхпроводящего перехода на прочность, пластичность ⁽¹⁻³⁾ и внутреннее трение ⁽⁴⁾ металлов. Указанные явления были объяснены взаимодействием свободных электронов с дислокациями ^(5, 6). Эксперименты ⁽⁷⁻¹⁰⁾ привели к установлению ряда закономерностей действия тока нетермической величины на низкотемпературную пластическую деформацию металлических кристаллов.

Целью настоящей работы было выделение возможного тонкого изменения прочности облучаемых кристаллов в радиационно-механическом низкотемпературном эффекте, связанного с возбуждением системы электронов. Радиационно-механический эффект оценивался по изменению предела текучести образцов, растягиваемых во время облучения. Применялись монокристаллы цинка (99,998% Zn), свинца (99,9995% Pb) и олова (99,9995% Sn) диаметром ~ 1 мм и длиной 15 мм средних ориентаций, которые при заданном внешнем напряжении имели максимально возможную сдвиговую компоненту в системе скольжения. Деформация и облучение осуществлялись в проточном жидком азоте.

Интенсивность потока электронов на уровне образцов, измеренная цилиндром Фарадея, составляла $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ а/см² (поток $\sim 10^{13}$ электрон/(см²·сек)). При выбранной относительно небольшой интенсивности облучения отсутствовали разряды и кавитационные явления в жидком азоте, а на образцах не возникала паровая рубашка. Энергия электронов была 2,3—2,7 Мэв.

Образцы испытывались растяжением со скоростью 0,4 мм/мин ($\sim 2,8 \cdot 10^{-2}$ мин⁻¹); точность определения нагрузок ± 2 г. Деформация проводилась непрерывным растяжением, а также в режиме пауз: 30 сек. растяжения, 3 мин. пауза релаксации напряжений с остановленным приводом машины, вновь растяжение и т. д.

На рис. 1 приведена зависимость удельных кристаллографических сдвигов облучаемых и необлучаемых кристаллов цинка от исходных значений угла χ_0 . Как видно из этого графика, инжекция электронов в процессе растяжения образцов приводит к увеличению предельных значений

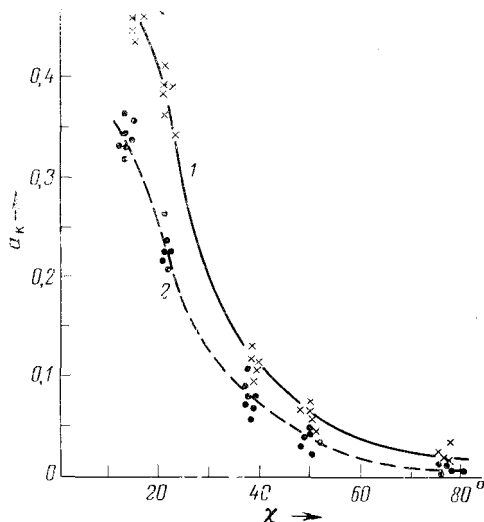


Рис. 1. Удельный кристаллографический сдвиг a_k облучаемых (1) и необлучаемых (2) кристаллов цинка для различных исходных ориентаций образцов (χ_0 — угол между плоскостью базиса и осью образца); $T = -196^\circ \text{C}$

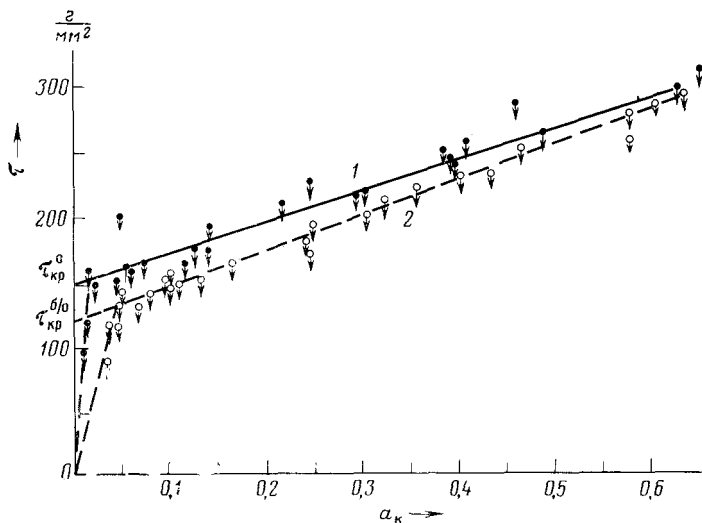


Рис. 2

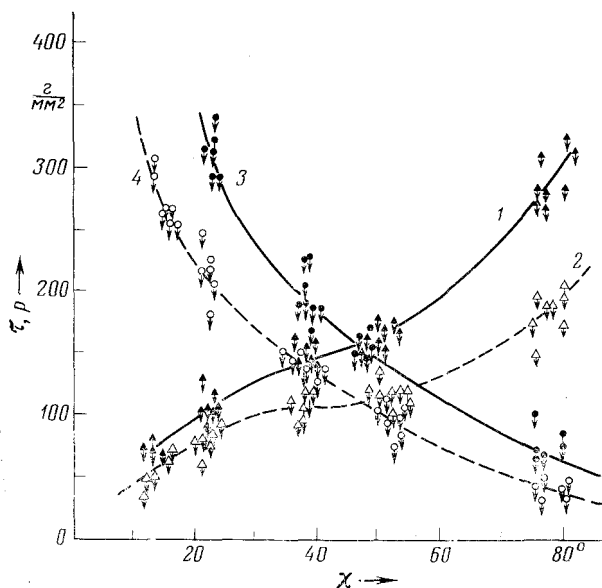


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость скалывающих напряжений τ на плоскости базиса кристаллов цинка от удельного кристаллографического сдвига α_k (кривые упрочнения) для облучаемых (1) и необлучаемых (2) образцов; $T = -196^\circ \text{C}$

Рис. 3. Нормальные p (1, 2) и скалывающие τ (3, 4) напряжения на плоскости базиса кристаллов цинка для различных исходных значений угла χ_0 облучаемых (1, 3) и необлучаемых (2, 4) образцов; $T = -196^\circ \text{C}$

кристаллографического сдвига α_k , т. е. увеличению пластической деформации цинка, предшествующей хрупкому разрушению.

На рис. 2 приведены зависимости скалывающих напряжений, действующих на плоскостях скольжения облучаемых и необлучаемых кристаллов цинка от удельного кристаллографического сдвига для момента хрупкого разрушения образцов. На рис. 3 показано изменение нормальных p и скалывающих τ напряжений в зависимости от значений угла χ_0 .

Как видно из приведенных графиков, предельные значения нормальных и скалывающих напряжений при облучении возрастают вследствие увеличения предшествующей хрупкому отрыву пластической деформации металла, поскольку при этом возрастают истинные значения прочности. Помимо этого, увеличение p и τ связано также с радиационным упрочнением металла. При столкновении электронов энергии 2,3–2,7 Мэв с атомами цинка последним передается энергия 250–330 эв, что вызывает смещение 5–6 атомов. Общее число выбитых атомов за время опыта ~ 2 мин. может составить $\sim 10^{15}$ атомов / см^3 . Экстраполяция приведенных на рис. 2

прямолинейных участков упрочнения до пересечения с осью ординат дает при «нулевом» кристаллографическом сдвиге значения критических напряжений для необлучаемых образцов $\tau_{кр}^{6/0} \simeq 120$ г/мм² а для облучаемых $\tau_{кр}^0 \simeq 150$ г/мм². Таким образом, разницу в 30 г/мм² можно считать возникшей за счет радиационного упрочнения, происходящего за время испытания образцов.

В результате испытаний свинца и олова, как и в случае цинка, было установлено, что облучение вызывает увеличение предела текучести образцов. Абсолютная величина эффекта составила 50—60 г/мм², что соответствовало 8—12% значений предела текучести необлучаемых образцов. Однако при сравнении с предварительно облученными образцами отмечалось, наоборот, снижение предела текучести на 15—20 г/мм².

Эффект радиационного упрочнения облучаемых во время деформации кристаллов ослаблен, как мы полагаем, процессом диссипации части энергии излучения на системе движущихся и взаимодействующих дислокаций, что приводит, в частности, к освобождению дислокаций от части радиационных дефектов. Для уточнения этого вопроса были поставлены опыты с использованием электронов различных энергий как выше, так и ниже пороговой энергии смещения атомов E_{min} . Расчеты, согласно ⁽¹⁾, показали, что E_{min} применительно к цинку, олову и свинцу составляет соответственно ~0,5; ~0,8 и ~1,2 Мэв. Использовались электроны: I режим 2,2—2,7 Мэв; II режим 2,0—2,3 Мэв; III режим 0,1—0,3 Мэв и IV режим < 0,1 Мэв (значения энергии электронов приведены с учетом замедления в жидком азоте). Плотность потока электронов на уровне образцов сохранялась постоянной и равной $\sim 10^{-6}$ а/см² ($\sim 6 \cdot 10^{12}$ электрон/(см²·сек)).

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, в результате облучения в процессе деформации кристаллов свинца при энергиях электронов выше E_{min} (I и II режим), как и прежде, имело место увеличение предела текучести на 8—12% по сравнению с необлучаемыми образцами. В то же время при сравнении с предварительно облученными кристаллами, получившими такую же дозу, отмечается уменьшение предела текучести образцов. В области энергий ниже E_{min} (III и IV режим) облучаемые во время деформации образцы характеризовались такими значениями предела текучести, которые ниже, чем для необлучаемых и для предварительно облученных образцов. Аналогичные эффекты при облучении электронами различных энергий наблюдались также на кристаллах цинка.

Таким образом у образцов, облучаемых во время растяжения в области энергий выше порога выбивания атомов, значения предела текучести оказываются промежуточными между значениями для необлучаемых и предварительно облученных образцов, а в области энергий ниже порога выбивания атомов — ниже соответствующих значений для необлученных и предварительно облученных образцов. Следовательно, в облучаемых кристаллах идут два конкурирующих процесса: упрочнение за счет созда-

Таблица 1

Предел текучести P (г/мм²), кристаллов свинца, облучаемых при 80° К электронами

Режим	№ партии	Предварит. облучение P^0	Облучение P^0	Без облучения $P^{6/0}$	$\frac{P^0 - P^{6/0}}{P^{6/0}} \cdot 100$
I	13	—	703	630	12
	32	—	666	612	9
	33	—	690	638	8
	3	—	668	627	7
	38	680	—	632	8
	18	648	636	—	—2
	9	658	638	—	—3
I	17	—	688	653	5
	19	682	668	—	—2
I	—	—	658	686	—4
	6	—	737	762	—3
	12	668	660	—	—1
IV	7	—	654	666	—2
	23	670	664	—	—1

Таблица 2

Анизотропия действия облучения электронами на процесс релаксации напряжений в кристаллах цинка при 80° К для партий №№ 20 и 22 (предел текучести, г/мм²)

№ обр.	А				Б			
	1-пауза		2-пауза		1-пауза		2-пауза	
	№ 20	№ 22	№ 20	№ 22	№ 20	№ 22	№ 20	№ 22
1	10	28	20	34	22	44	27	48
2	12	26	20	30	24	34	25	40
3	12	25	12	32	25	35	28	46
4	19	30	17	31	24	42	28	44
5	22	32	21	28	22	32	30	40
6	15	24	19	32	26	30	28	33
7	17	26	21	23	21	40	22	42
8	14	22	18	32	28	41	27	43
9	12	26	18	32	24	34	28	38
10	15	26	20	28	24	—	30	—
	Ср. 15	26	19	30	24	37	27	42

Примечание: А — облучение в направлении элементов скольжения (плотно упакованное направление), Б — облучение в перпендикулярном к А направлении.

ния радиационных дефектов и разупрочнение за счет возбуждения во время облучения системы электронов. Аналогичный результат для средних (комнатных) температур был получен в работе (^{12a}).

Нами была обнаружена также анизотропия радиационной релаксации напряжений в цинке. В табл. 2 приведены данные по релаксации напряжений и напряжениям деформации облучаемых кристаллов, бомбардировка которых проводилась во время деформации либо в направлении элементов скольжения, либо под углом 90° к нему. Как видно из этих данных, при облучении в направлении плоскостей скольжения наблюдается снижение релаксированной части напряжений. Радиационная релаксация напряжений в цинке, как и в графите (¹¹), связана в основном со скольжением и взаимодействием базисных дислокаций. Облучение интенсифицирует эти процессы, о чем свидетельствует значительное (на 100% и более) увеличение релаксации напряжений (^{12b}), а при облучении в условиях низких температур и энергиях частиц выше E_{min} часть дислокаций оказывается закрепленной радиационными дефектами. Этим можно объяснить (табл. 2) уменьшение релаксированной части напряжений при облучении вдоль плоскостей скольжения, когда взаимодействие радиационных дефектов с дислокациями усиливается за счет фокусирующихся столкновений.

Таким образом, инжекция электронов во время растяжения металлических кристаллов при низких температурах приводит к тонкому эффекту снижения предела текучести образцов, конкурирующему с процессом радиационного упрочнения (если энергия частиц превышает пороговую энергию выбивания атомов).

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
2 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. В. Пустовалов, В. И. Старцев, В. С. Фоменко, ФТТ, 11, № 5, 1382 (1969). ² И. А. Гиндин, В. П. Лебедев, Я. Д. Стародубов, там же, № 10, 2802 (1969). ³ И. А. Гиндин, Б. Г. Лазарев и др., Письма ЖЭТФ, 11, 288 (1970). ⁴ В. С. Постников, И. В. Золотухин, В. Е. Милошенко, там же, 13, 10 (1971). ⁵ A. Nikata, R. A. Johnson, C. E. Elbaum, Phys. Rev. Lett., 24, № 5, 215 (1970). ⁶ М. И. Каганов, В. Д. Нацик, Письма ЖЭТФ, 11, 550 (1970). ⁷ О. А. Троицкий, там же, 10, 18 (1969). ⁸ О. А. Троицкий, А. Г. Розно, ФТТ, 12, № 1, 203 (1970). ⁹ О. А. Троицкий, А. Г. Розно, ФММ, 30, № 4, 824 (1970). ¹⁰ О. А. Троицкий, ФТТ, 13, № 1, 185 (1971). ¹¹ Б. Келли, Радиационные повреждения твердых тел, М., 1970. ¹² Вият. И. Спицын, О. А. Троицкий, П. Я. Глазунов, ДАН, а) 196, 814 (1971); б) 201, № 2 (1972).