

Академик Викт. И. СПИЦЫН, О. А. ТРОИЦКИЙ,
П. Я. ГЛАЗУНОВ

СТИМУЛИРОВАННАЯ ТОКОМ РАДИАЦИОННОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛА

Как было показано (^{1, 2}), импульсы тока величиной 10^2 — 10^3 а/мм² продолжительностью $\sim 10^{-4}$ сек. вызывают скачки холодной пластической деформации металла. Величина скачков зависит в основном от скорости деформации и величины стимулирующего импульса тока. В настоящей работе изучалось влияние инжектируемых в металл электронов (с помощью ускорителя частиц) на величину пиков электропластической деформации с целью интенсификации холодной пластической деформации металла.

Теоретической основой этих опытов послужило положение, что электронная составляющая сил, тормозящих движение дислокаций в металле, изменяется при возбуждении электронной подсистемы металла.

Эксперименты проводились на монокристаллах цинка (99,998% Zn), олова (99,9995% Sn) и свинца (99,995% Pb). Образцы во время растяжения находились под одновременным действием импульсов тока и облучения. За один импульс через образец пропусклось $\sim 0,1$ кул. количества электричества. Импульсы повторялись через 5—10 сек. Учитывая длительность импульса $\sim 10^{-4}$ сек. и сечение образцов ~ 1 мм², плотность импульсного тока можно оценить величиной $\sim 10^{-3}$ а/мм². По расчетам и прямым измерениям нагрев металла в условиях интенсивного охлаждения не превышал долей градуса. Интенсивность потока электронов выбиралась также такой, чтобы не происходило нагревание образцов; этому отвечал поток $\sim 10^{12}$ эл/см²·сек. Энергия электронов была равна 3,5 Мэв; использовались также электроны меньших энергий в интервале от 1 до 3,5 Мэв. Интенсивность потока частиц во всех опытах сохранялась постоянной.

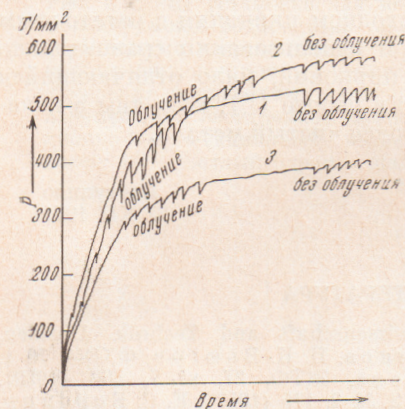


Рис. 1. Влияние инжектируемых электронов на величину электропластической деформации металла; моно- Zn, $\chi_0 = 29^\circ$, $T = -196^\circ$ С, $U = 150$ в, $v = 0,1$ мм в мин. $E = 3,0$ — $3,2$ Мэв (1); $E = 0,7$ — $0,8$ Мэв (2, 3)

Длина образцов составляла 15 мм, диаметр ~ 1 мм. Скорость растяжения от 0,025 до 1,6 мм/мин. Диаграммы растяжения в виде кривых изменения деформирующего усилия со временем при постоянной скорости растяжения записывались дистанционно с помощью испытательной машины, установленной под пучком ускорителя.

На зажимах испытательной машины укреплялась камера для регулируемого охлаждения образцов холодным азотом, снабженная окнами из алюминиевой фольги для входа и выхода электронного луча, контактными клеммами для подведения тока к образцам и термпарой из хромель-копелевой проволоки, приваренной к образцу-монитору. Последний также подвергался действию импульсов тока и облучения. При сравнении величины

пиков для облучаемых (ΔP_0) и необлучаемых ($\Delta P_{6/0}$) кристаллов использовались данные, относящиеся к одному уровню деформирующего усилия, поскольку с увеличением деформирующего усилия величина единичного пика ΔP несколько возрастала. Установка образцов в зажимах испытательного устройства производилась таким образом, что направление облучения совпадало с элементами скольжения кристаллов.

На рис. 1 показан пример влияния инжектируемых электронов на величину электропластической деформации металла. Облучение периодически включалось и выключалось во время деформации образцов. Наблюдаемые на диаграммах осцилляции связаны в основном с пластической деформацией металла во время импульсов тока. Однако при соответствующим равных величинах импульсов тока пики в участках диаграмм, полученных при одновременном облучении кристаллов, имеют заметно большую величину, чем без облучения. Возрастание пиков является следствием интенсификации электропластической деформации во время облучения.

В табл. 1 приведены значения скачков деформирующего усилия в связи с пластической деформацией различных металлов для облучаемых и необлучаемых образцов средние по измерениям 40—60 пиков на диаграммных лентях при различных температурах опыта и скорости растяжения $\sim 0,1$ мм/мин. Как следует из табл. 1, дополнительное облегчение деформации металла усиливается с понижением температуры.

Представляло интерес установить разницу в скоростной зависимости электропластической и радиационнопластической деформации. В табл. 2 приведены такие данные для кристалликов цинка. Из табл. 2 следует, что, хотя с увеличением скорости деформации пики электропластического эффекта убывают по своей величине, увеличение скорости деформации не оказывает такого же действия на собственно радиационнопластическую деформацию. В интервале скоростей 0,025—0,41 мм/мин имеет место некоторое возрастание эффекта, оцениваемого относительной величиной $(\Delta P_0 - \Delta P_{6/0}) / \Delta P_{6/0} \cdot 100$ (где ΔP_0 и $\Delta P_{6/0}$ — пики деформации соответственно для облучаемых и необлучаемых кристаллов).

Была исследована зависимость эффекта от величины энергии бомбардирующих электронов. Использовались энергии частиц 0,75; 1,65; 3,1 и

Таблица 1

Величина пиков электропластического эффекта для облучаемых (ΔP_0) и необлучаемых ($\Delta P_{6/0}$) кристаллов

Материал и условия опыта	Величина импульс. сов, γ	t , $^{\circ}\text{C}$	ΔP_0 , Г/мм ²	$\Delta P_{6/0}$, Г/мм ²	$\Delta P_0 - \Delta P_{6/0}$, Г/мм ²	$\frac{\Delta P_0 - \Delta P_{6/0}}{\Delta P_{6/0}} \cdot 100$
Монор- Zn, 99,998% Zn	$\chi_0 = 28^{\circ}$	100	12—14	9—10	3—4	33—40
		150	20—22	15—16	5—6	33—37
		100	20—24	12—14	8—10	67—72
		150	55—57	30—33	24—25	76—80
	$\chi_0 = 39^{\circ}$	100	6—7	4—6	1—2	25—33
		150	9—11	6—7	3—4	50—57
		100	10—12	6—7	4—5	67—72
		150	20—22	13—16	6—7	44—46
		100	12—14	6—8	4—6	67—75
		150	32—36	20—22	12—14	62—64
		100	15—18	9—10	6—8	68—80
		150	45—50	26—28	19—22	73—80
	$\lambda_1 = 30^{\circ}$	100	18—22	10—12	8—10	80—83
		150	45—55	22—25	23—25	105—120
	$\lambda_2 = 40^{\circ}$	100	20—26	10—14	10—11	80—100
		150	55—60	32—35	23—25	70—72

χ_0 , λ_1 , λ_2 — углы между действующими плоскостями скольжения и осью образцов.

Таблица 2

Влияние скорости деформации на величину пиков деформации
монокристаллов цинка $\chi_0=27^\circ$

№ образца	Скорость деформации, мм/мин.	Величина пиков электропластической деформации		$\Delta P_0 - \Delta \sigma_0$	$\frac{\Delta P_0 - \Delta P_{\sigma_0}}{\Delta P_{\sigma_0}} 100.$
		без облучения	с облучением $\varphi \approx 10^{12} \text{элг/}(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$; $E=3,5 \text{ Мэв}$		
1	0,025	18—20	24—26	6	32
4		24—26	30—32	6	24
8		26—23	34—36	8	29
9		22—25	32—35	10	43
10		20—24	28—30	6—8	32
2	0,1	8—10	14—16	6	67
3		14—16	22—26	8—10	60
5		12—14	20—22	8	62
6		16—18	26—28	10	59
7		14—16	22—24	8	53
11	0,41	6—8	10—12	4	57
12		10—12	14—16	4	37
13		4—6	6—10	2—4	60
14		4—6	10—12	6	100

3,5 Мэв. Для получения электронов различных энергий применялись фильтры из алюминия. Интенсивность потока частиц сохранялась постоянной. Было найдено, что увеличение энергии электронов приводит к возрастанию эффекта действия облучения на несколько процентов.

В связи с тем, что облучение электронами сильно влияет на процесс релаксации механических напряжений⁽³⁾, представляло интерес совместить действие импульсов тока и облучения в опытах с релаксацией напряжений.

Эксперименты проводились на монокристаллах цинка при -196°C . После растяжения образца в течение 30 сек. привод испытательной машины останавливался и следовала двухминутная пауза с записью падения нагрузки, а затем вновь включался привод прибора и операция растяжения и релаксации повторялась. В следующих друг за другом циклах использовались четыре режима воздействия на кристалл: I — облучение; II — облучение совместно с действием импульсов тока; III — действие только импульсов тока; IV — без облучения и без импульсов тока. На одном образце снималось, как правило, 3—4 полных цикла деформации.

В табл. 3 приведены величины $\Delta \sigma$ — падения показаний динамометра испытательной машины в паузах с релаксацией нагрузки для указанных четырех режимов воздействия на кристаллы. Из этих данных следует, что наибольшая релаксация напряжений происходит при II режиме, когда деформируемые образцы находятся при одновременном действии импульсов тока и облучения. Несколько меньшая релаксация происходит при I режиме, когда действует только облучение. Наименьшая релаксация (в несколько раз меньшая, чем при режимах I и II) имеет место в последнем IV случае, когда деформация проходит без импульсов тока и без облучения.

Опыты с релаксацией приложенных напряжений показали, что как и в случае активной деформации, совмещение действия тока с облучением приводит к дальнейшей интенсификации пластической деформации металла. Из приведенных данных также следует, что облучение влияет на релаксационные процессы сильнее, чем на активную деформацию образцов, а импульсы тока, наоборот, оказывают существенное влияние на активную деформацию и слабо действуют на релаксационные процессы.

Релаксация нагрузки $\Delta\sigma$ в монокристаллах цинка при остановках растяжений

Условия опыта	№ паузы	$\chi_0 = 27^\circ$						$\chi_0 = 24^\circ$							
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8
I Облучение	1	40	55	52	46	50	48	35	54	40	36	32	44	38	42
	2	45	60	58	49	48	52	42	60	52	40	23	46	42	48
	3	50	70	64	58	54	56	54	72	70	50	46	52	44	54
	4	64	79	—	—	58	—	62	86	80	60	—	—	55	—
II Облучение + импульсы тока	1	52	60	59	60	68	70	53	72	60	64	62	70	68	72
	2	65	62	60	62	73	72	65	86	78	75	70	74	70	80
	3	78	74	70	68	85	76	76	100	85	88	85	80	86	84
	4	89	88	—	—	87	—	90	117	105	90	—	—	95	—
III Импульсы тока	1	23	14	16	18	20	16	17	24	23	18	16	20	16	18
	2	28	18	17	19	22	18	15	26	25	19	18	22	17	20
	3	34	20	19	21	20	20	18	28	28	22	20	20	21	22
	4	39	22	—	—	24	—	20	35	32	20	—	—	23	—
IV Без облучения и импульсов тока	1	83	6	5	6	8	9	7	7	5	4	6	12	10	11
	2	7	5	6	9	10	12	6	10	6	8	8	10	12	8
	3	8	6	8	10	11	12	8	10	9	7	10	11	8	6
	4	10	7	—	—	12	—	10	12	10	6	—	—	10	—

Касаясь объяснения полученных результатов, отметим, что во время облучения существенны нетермодинамические флуктуации тепла, происходящие в малых пространственно-временных объемах. Источник электронной температуры при облучении значительно мощнее, чем источник релаксационной температуры (хотя последний локализован в кристаллической решетке более узко). Это связано с тем, что энергия, передаваемая в систему электронов $\mathcal{E}_e$, примерно на порядок больше энергии $\mathcal{E}_r$, передаваемой на решетку. Кроме того, теплоемкость электронной подсистемы значительно меньше теплоемкости решетки. В силу передачи основной части энергии инжектируемых электронов на систему электронов металла, а также по причине малости электронной теплоемкости, температура электронной подсистемы кристалла изменяется значительно сильнее, чем решеточная температура.

В условиях интенсивного охлаждения в описываемых экспериментах решеточная температура во время облучения практически не изменялась, поэтому полученный результат можно объяснить диссипацией энергии электронов на системе движущихся и взаимодействующих дислокаций, что приводит к увеличению пиков электропластического эффекта и интенсификации релаксации механических напряжений.

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
28 IV 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ О. А. Троицкий, Письма ЖЭТФ, 10, 18 (1969). ² О. А. Троицкий, А. Г. Резно, ФТТ, 12, 203 (1970). ³ О. А. Троицкий, И. М. Кулешов, В. И. Лихтен, ФММ, 16, 44 (1963).