

Академик В. И. СПИЦЫН, О. А. ТРОИЦКИЙ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕТАЛЛА

Целью настоящей работы было исследование влияния импульсного магнитного поля на скорость ползучести металлических кристаллов. Большой интерес представляло также подтвердить наличие разупрочнения металла при воздействии переменным и постоянным током, что позволяет, с одной стороны, установить специфичность действия импульсного тока и, с другой стороны, не связывать электропластический эффект⁽¹⁻⁵⁾ исключительно с действием импульсного тока.

Для создания импульсных магнитных полей вокруг деформируемых образцов использовалась рамка с током. Схема опыта показана на рис. 1. Как известно, ток, текущий по круговой рамке радиуса R , создает в ее центре поле напряженностью $H=2\pi I/(10R)$. В работе была использована рамка радиуса $R=3,15$ мм и высоты, соответствующей рабочей длине образцов. При силе импульсного тока по рамке $1,5 \cdot 10^3$ а вокруг образцов, помещенных в ее центр, создавалось магнитное

поле напряженностью 3000 э, что соответствовало собственному полю образцов в опытах⁽¹⁻⁵⁾.

Для проведения экспериментов использовались кристаллы цинка (99,9998% Zn), индия (99,9995% In), олова (99,9995% Sn) и свинца (99,9995% Pb) длиной 16–17 мм и диаметром ~1 мм. Электрическое сопротивление образцов при температуре 80° К, при которой проводились опыты, составляло соответственно $20,8 \cdot 10^{-5}$; $38 \cdot 10^{-5}$; $43,5 \cdot 10^{-5}$ и $99 \cdot 10^{-5}$ ом. Ток подводился с помощью медных поводков длиной 70 и диаметром 0,3 мм, приваренных к головкам образцов. Сопротивление поводков $51 \cdot 10^{-6}$ ом.

Использовалась методика испытания образцов на ползучесть под постоянным приложенным напряжением. Выбирались кристаллы ориентации в середине стандартного треугольника. При выборе нагрузки учитывались величина фактора Шмида и критические скалывающие напряжения кристаллов с тем, чтобы нагрузка несколько превышала предел текучести образцов. Деформация осуществлялась в слабо проточном жидком азоте. Запись деформации осуществлялась с помощью самописца ЭПП-09. Электрический сигнал возникал от электронно-механического преобразователя Э-2Д1, установленного на подвижном зажиме испытательного устройства. Точность определения деформаций составляла 0,15% от исходной длины образцов.

После приложения нагрузки ток подавался на рамку или на образец. Кривая ползучести снималась до тех пор, пока она не выходила на установившуюся стадию. На этом участке измерялась деформация в течение 10 мин. Весь опыт длился примерно 15 мин. Из полученных кривых в известной мере произвольно (для получения лишь качественных представ-

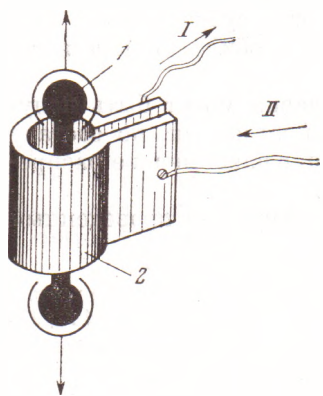


Рис. 1. Деформация образцов в импульсных магнитных полях, создаваемых рамкой с током

лений о влиянии тока или импульсного магнитного поля на процесс ползучести металла) определялась скорость неустановившейся ползучести за первые 3 сек. деформации, а также скорость «переходной» ползучести в промежутке между 30 и 60 сек. деформации. Поскольку ползучесть использованных металлов (за исключением олова) при низкой температуре характеризуется логарифмической исчезающей ползучестью (⁷⁻¹²), термин «установившаяся» в данном случае является условным.

Использованные токовые режимы не приводили к макроскопически заметному нагреву образцов в условиях азотных температур, что контролировалось приваренными к образцам дифференциальными термомпарами. Это подтверждается в случае импульсного тока следующим расчетом. Для образцов длиной l и сечением S , имеющих электрическое сопротивление R , тепловыделение во время действия тока можно рассчитать по формуле $Q = I^2 \rho \frac{l}{S} t = I^2 R t$. Подставляя сюда численные значения, например для

кристаллов цинка $R = 20,8 \cdot 10^{-5}$ ом, $I = 7,5 \cdot 10^2$ а и $t \approx 10^{-4}$ сек., получаем $Q = 11,7 \cdot 10^{-3}$ дж или, с учетом теплоемкости цинка при азотной температуре $c = 1,7$ дж/(см³·град), нагрев образцов порядка $\Delta T = 0,55^\circ$. Постоянный и переменный токи использованных величин в условиях охлаждения образцов жидким азотом также не приводили к нагреву образцов.

В табл. 1 приведены результаты испытаний образцов в трех постановках эксперимента: 1) без какого-либо воздействия; 2) при деформации в импульсных магнитных полях; 3) при деформации с импульсами тока через образцы. Во второй и третьей постановках эксперимента наведенное (с помощью рамки с током) и собственное магнитное поле образцов примерно совпадали по величине и были равны ~ 3000 э. Ориентации магнитных полей были разными. В табл. 1 приведены цифры, являющиеся средними величинами по результатам испытаний 6—7 кристаллов. Как видно из

Таблица 1

Влияние импульсного тока и импульсного магнитного поля на скорость ползучести металлических кристаллов (%·мин⁻¹)

Способ воздействия	Тип кристаллов											
	Моно-Pb <221> $P = 1200$ г/мм ²			Моно-Zn $\chi_0 = 35^\circ$ $P = 300$ г/мм ²			Моно-In $P = 450$ г/мм ²			Моно-Sn <110> $P = 1500$ г/мм ²		
	$v_{H/Y}$	$v_{пер}$	$v_Y \cdot 10^2$	$v_{H/Y}$	$v_{пер}$	$v_Y \cdot 10^2$	$v_{H/Y}$	$v_{пер}$	$v_Y \cdot 10^2$	$v_{H/Y}$	$v_{пер}$	$v_Y \cdot 10^2$
Контроль	146	0,56	9,6	44	0,31	4,6	52	0,47	7,0	64	0,8	14,4
Магнитное поле	146	0,67	10,2	48	0,46	5,3	47	0,41	8,3	62	0,78	14
Электрический ток	171	0,73	12,5	44	0,61	9,5	51	0,64	10,4	74	1,02	16,5
Величина эффекта по току	17%	30%	30%		97%	106%		36%	49%	16%	28%	15%

этих данных, скорость ползучести в магнитных полях использованных величин не изменяется существенно по сравнению с контрольными образцами.

На рис. 2 приведены зависимости скорости установившейся ползучести тех же кристаллов от силы постоянного (рис. 2а) и переменного токов (рис. 2б). Из этих данных следует, что при одной и той же плотности постоянный ток оказывает на пластическую деформацию металла более сильное действие, чем переменный ток (частота 50 гц). Наибольшая величина эффекта наблюдалась на кристаллах цинка и свинца.

Было проведено сравнение эффективности действия переменного, постоянного и импульсного токов. При этом использовалась одна и та же средняя плотность тока 7—8 а/мм². Частота посылок импульсного тока, как и переменного тока, составляла 50 гц. Средняя величина импульсного

Сравнение эффективности действия различных видов тока на скорость ползучести металлических кристаллов ($\% \cdot \text{мин}^{-1}$)

Тип кристалла и нагрузка	Без тока		Переменный ток		Постоянный ток		Импульсный ток	
	$v_{\text{пер}}$	$v_{\text{у}} \cdot 10^2$	$v_{\text{пер}}$	$v_{\text{у}} \cdot 10^2$	$v_{\text{пер}}$	$v_{\text{у}} \cdot 10^2$	$v_{\text{пер}}$	$v_{\text{у}} \cdot 10^2$
Моно-Pb $P=1350 \text{ г/мм}^2$	0,44	8,0	0,7	9,7	0,9	13,2	0,96	14,8
	0,47	8,7	0,88	9,0	0,96	12,3	0,98	13,7
	0,49	8,7	0,82	8,2	0,93	13,0	0,94	14,8
	0,45	6,9	0,88	8,8	0,86	12,8	0,96	13,4
	0,51	7,5	0,63	8,7	0,99	12,2	0,98	13,3
Величина эффекта Моно-Zn $\chi_0=45^\circ, 225 \text{ г/мм}^2$	—	—	42%	12%	70%	60%	75%	75%
	0,38	5,5	0,43	7,0	0,59	9,5	0,82	12,7
	0,30	5,5	0,42	8,7	0,53	9,2	0,96	12,0
	0,33	5,8	0,51	8,7	0,60	8,8	0,80	12,6
	0,34	5,3	0,44	7,6	0,61	9,2	0,83	12,5
Величина эффекта Моно-In $P=450 \text{ г/мм}^2$	—	—	30%	40%	75%	70%	150%	130%
	0,32	5,4	0,44	5,6	0,48	6,2	0,59	8,9
	0,37	4,8	0,40	6,0	0,47	6,8	0,43	8,0
	0,40	4,9	0,40	5,5	0,53	6,8	0,61	8,7
	0,40	5,8	0,42	5,8	0,44	6,5	0,48	8,8
Величина эффекта Моно-Sn $P=1500 \text{ г/мм}^2$	—	—	5%	12%	23%	23%	44%	65%
	0,62	10,9	0,92	13,3	0,67	13,3	1,05	16,0
	0,75	10,5	0,82	13,3	0,86	14,5	1,04	15,3
	0,62	10,0	0,85	13,5	0,70	13,2	1,03	15,2
	0,61	10,5	0,78	12,7	0,88	14,0	1,00	15,7
Величина эффекта	0,59	10,3	0,65	12,3	0,90	13,8	1,03	15,5
	—	—	17%	20%	25%	30%	60%	50%

тока определялась по формуле $I_{\text{ср}} = I_{\text{имп}} k / Q = I_{\text{имп}} k \tau \nu$ (где $I_{\text{имп}}$ — амплитудное значение тока, k — коэффициент заполнения импульсов, $Q = 1 / (\tau \nu)$; Q — скважность импульсов, τ — длительность импульсов и ν — частота тока). При значениях $\nu = 50$ гц, $k = 0,7$, $\tau = 120 \cdot 10^{-6}$ сек. и $I_{\text{имп}} \approx 10^3$ а/мм² средняя величина тока через образцы соответствовала силе переменного и

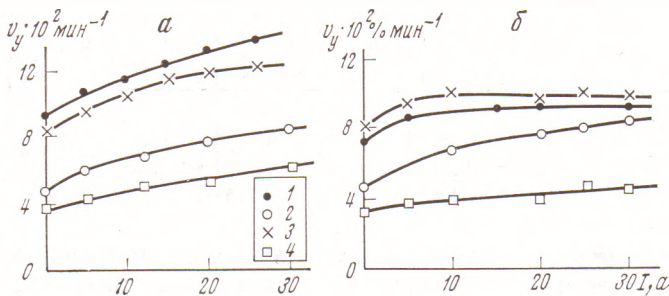


Рис. 2. Зависимость скорости установившейся ползучести металлических кристаллов от силы постоянного (а) и переменного (б) токов. 1 — Pb, $P=1050 \text{ г/мм}^2$, $\langle 221 \rangle$ и $\langle 211 \rangle$ (б); 2 — Zn, $P=300 \text{ г/мм}^2$, $\chi_0=35^\circ$ (а), $P=210 \text{ г/мм}^2$, $\chi_0=40^\circ$ (б); 3 — Sn, $P=1050 \text{ г/мм}^2$; 4 — In, $P=450 \text{ г/мм}^2$

постоянного токов. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Как видно из этих данных, скорость переходной и установившейся ползучести увеличивается в наибольшей мере при действии импульсным током. Различные виды тока распределяются по своей эффективности следующим образом: 1) импульсный; 2) постоянный и 3) переменный.

Таким образом, в настоящей работе показано, что импульсные магнитные поля, сопутствующие импульсному току, в пределах влияния ориентации магнитных полей* и предположения об однородном прохождении тока по образцам не оказывают существенного влияния на ползучесть металла. Тем не менее вопрос о роли пинч-эффекта в опытах (¹⁻⁵) остается открытым, поскольку пинч-эффект определяется взаимодействием поля с током. В работе показано также, что при действии постоянным и переменным током на процесс ползучести возникает снижение сопротивления металла пластическому деформированию. Этот результат позволяет считать, что электропластический эффект не возникает только при действии импульсным током, а имеет место при действии на пластическую деформацию металла любым видом тока.

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
11 XI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. А. Троицкий, А. Г. Розно, ФТТ, т. 12, № 1, 203 (1970). ² О. А. Троицкий, Физ. мет. и металловед., т. 32, № 2, 408 (1971). ³ В. И. Спицын, О. А. Троицкий, П. Я. Глазунов, ДАН, т. 199, № 4, 810 (1971). ⁴ В. И. Спицын, О. А. Троицкий, П. Я. Глазунов, ДАН, т. 201, № 2, 324 (1971). ⁵ О. А. Троицкий, В. И. Спицын, ДАН, т. 210, № 6, 1388 (1973). ⁶ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М., 1959, стр. 248. ⁷ А. Н. Kottrell, J. Mech. and Phys. Sol., v. 1, 53 (1952). ⁸ N. F. Mott, Phil. Mag., v. 44, 742 (1953). ⁹ А. Зегер, Дислокации и механические свойства кристаллов, ИЛ, 1960, стр. 179. ¹⁰ И. А. Гиндин и др., Физ. мет. и металловед., т. 29, № 4, 862 (1979). ¹¹ Н. Conrad, Acta Met., v. 8, 128 (1960). ¹² И. А. Гиндин и др., Изв. высш. учебн. завед., Физика, № 6 (109), 110 (1971).

* Возможное влияние ориентации магнитных полей вытекает из выражения для результирующей силы, действующей на кристаллическую решетку $\vec{F} = \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{H}]$, где \mathbf{j} и \mathbf{H} — плотность тока и напряженность поля, являющиеся векторными величинами.