

В. И. ХОТКЕВИЧ, Э. Ф. ЧАЙКОВСКИЙ и В. В. ЗАШКВАРА

СКРЫТАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 15 III 1954)

§ 1. В соответствии с принятой в настоящее время точкой зрения, наблюдаемые в результате холодной обработки изменения физических свойств металла обусловлены наличием в кристаллической решетке последнего напряжений и остаточных микроискажений. Избыточная потенциальная энергия атомов, смещенных из равновесного положения (скрытая энергия деформации), является некоторым количественным выражением степени несовершенства кристаллической решетки, и естественно ожидать, что изменения свойств деформированного металла должны быть известным образом связаны с этой величиной. Изучение скрытой энергии деформации представляет также интерес с точки зрения развития представлений о механизме пластической деформации, о кинетике создания, накопления и снятия искажений решетки в процессе деформирования.

Известные по литературе (¹⁻¹⁰) исследования этого вопроса затрагивают небольшой перечень металлов и выполнены только при комнатной температуре. Представляло интерес расширить эти сведения, дополнив их данными о других металлах, в иной области температур деформирования.

§ 2. В недавно опубликованном сообщении (¹¹) была изложена методика импульсного определения теплоемкости металлов. Особенности методики, в частности возможность исключить в опыте тепловую изоляцию образца, делают удобным применение ее для измерения скрытой энергии деформации металлов. С целью повышения чувствительности, метод был применен в дифференциальной схеме, работающей по принципу разбалансированного моста. Это позволило производить измерения количеств тепла $\sim 10^{-3}$ кал. с погрешностью $\sim 7\%$.

Импульс тока продолжительностью 0,01—0,02 сек. проходит последовательно через два одинаковых (для уравнивания тепловых потерь) по размерам и форме образца, один из которых пластически деформирован, а второй, тщательно отожженный, является эталоном. Эти образцы составляют два плеча одной ветви моста, другая ветвь состоит из двух одинаковых калиброванных сопротивлений.

Вследствие различных сопротивлений деформированного и эталонного образцов между средними точками ветвей моста протекает дифференциальный ток I_d , записываемый шлейфовым осциллографом. Одновременно записывается также общий ток импульса, подающегося на мост, и общее падение напряжения на мосту.

§ 3. Образцы представляли собой проволоочки исследуемых металлов диаметров 0,2—0,3 мм, длиной около 50 мм. Рабочий образец, расположенный между полированными плоско-параллельными пластинами специального прессы (¹²), помещался в дьюаровский сосуд, наполненный жидким азотом, и постепенным увеличением нагрузки расплющи-

вался в тонкую равномерно деформированную пластинку. Эталонному образцу, также находившемуся в жидком азоте, такая форма придавалась заранее. По окончании деформации пластины пресса раздвигались и через мост пропусклся импульс постоянного тока, достаточный для полного отжига деформированного образца.

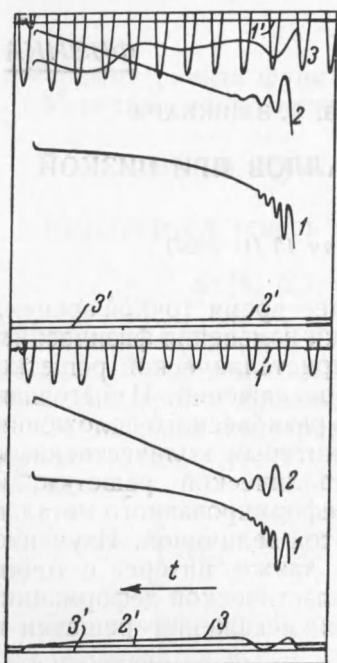


Рис. 1. Осциллограмма отжига образца кадмия, деформированного при $T = 77^\circ \text{K}$. Относительная деформация 65,8%. *a* — рабочая осциллограмма, *б* — контрольная (тот же образец после отжига). 1 — ток, 2 — падение напряжения, 3 — дифференциальный ток; 1', 2', 3' — соответствующие нулевые линии отсчета. Направление процесса указано стрелкой t

Отжигаясь, деформированный образец выделял скрытую энергию деформации, вследствие чего температура его оказывалась выше, чем это могло быть обусловлено сообщенным ему количеством тепла. Последнее обстоятельство вызывало соответствующее изменение дифференциального тока I_∂ . В результате опыта на осциллограмме получались кривые изменения тока I , падения напряжения V и дифференциального тока I_∂ в процессе нагрева образцов за время импульса. Типичный вид осциллограммы (кадмий) приведен на рис. 1. Изломы в начале кривых означают собственную частоту шлейфов.

Сравнение осциллограмм показывает, что в результате отжига сопротивления образцов уравнились — мост сбалансирован и дифференциальный ток I_∂ практически равен нулю по всему интервалу времени.

§ 4. Параметры схемы подбирались таким образом, что токи через шлейфы не превышали нескольких миллиампер, в то время как ток через образцы достигал десятков (30—40) ампер, а через калиброванные плечи моста $\sim 1-2$ а. Это позволяет сделать упрощающие расчет пренебрежения.

В результате несложных вычислений можно получить выражение для разности сопротивлений ΔR образцов в каждый момент процесса:

$$\Delta R = \frac{I_\partial R (4R_\partial + 2R + r)}{I (2R - r)} \quad (1)$$

и для разности мощностей ΔW , выделяемых током на образцах

$$\Delta W = \frac{I_\partial R (4R_\partial + 2R + r) (2R - r)}{4R}, \quad (2)$$

где I_∂ — дифференциальный ток; I — общий ток через мост; R — сопротивление калиброванного плеча моста; R_∂ — сопротивление цепи «дифференциального» шлейфа (вместе со шлейфом); r — общее сопротивление моста. После калибровки осциллографа все эти величины находятся из осциллограммы.

Полученных данных оказывается достаточно для вычисления скрытой энергии деформации, выделившейся в процессе нагрева деформированного образца. Легко показать, что скрытая энергия деформации $Q_{\text{изм}}$ выражается:

$$Q_{\text{изм}} = \int_{T_2}^{T_1} c dT - \frac{1}{m} \int_0^t \Delta W dt, \quad (3)$$

где c — теплоемкость металла, m — масса образца, T_1 и T_2 — температуры рабочего и эталонного образцов, соответственно, в конце импульса.

Так как за время опыта происходит полный отжиг деформированного образца, можно считать, что его температурный коэффициент электросопротивления в конце импульса соответствует таковому для недеформированного металла. Тогда, зная сопротивление образцов в конце импульса, при известном температурном коэффициенте электросопротивления можно вычислить температуру каждого из них и выбрать по таблицам значения теплоемкости, соответствующие интервалу температур $T_1 - T_2$. Второй член уравнения (3) можно вычислить графическим интегрированием (2) по всему интервалу времени t .

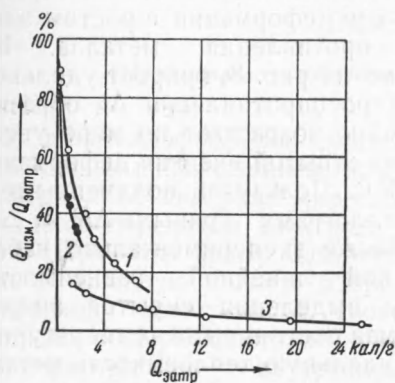


Рис. 2. Зависимость относительной величины скрытой энергии деформации от работы, затраченной на деформирование. 1 — кадмий, 2 — свинец, 3 — медь

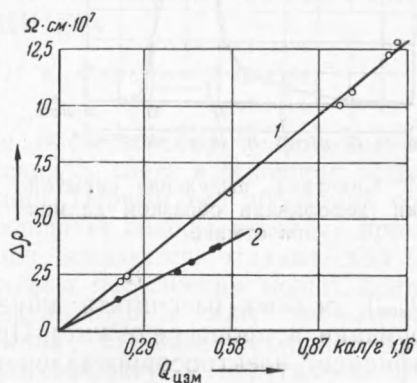


Рис. 3. Увеличение удельного электросопротивления кадмия (1) и свинца (2) по мере возрастания скрытой энергии деформации

§ 5. При помощи описанной методики были произведены измерения скрытой энергии деформации кадмия и свинца, деформированных при температуре жидкого азота, и меди — при комнатной температуре.

Как показали опыты, абсолютная величина скрытой энергии деформации возрастает по мере увеличения степени деформации. Предельное содержание скрытой энергии деформации, полученное нами при максимальных деформациях, составляет для кадмия 1,13 кал/г, для свинца 0,53 кал/г, для меди 0,77 кал/г.

Представляет интерес рис. 2, где скрытая энергия деформации $Q_{изм}$, выраженная в процентах от затраченной на деформирование работы $Q_{затр}$ ($Q_{изм} / Q_{затр} \%$), нанесена в зависимости от работы деформации $Q_{затр}$.

Обычно в литературе приводятся цифры, указывающие, что поглощенная при деформации энергия составляет $\sim 10\%$ от затраченной на деформирование работы. Из наших опытов следует, что такое соотношение неприменимо в общем случае и выполняется только в определенной области деформации. Как видно из приведенного графика, отношение $Q_{изм} / Q_{затр}$ изменяется от величины, близкой к 100% при малых деформациях, постепенно уменьшаясь с увеличением степени деформации.

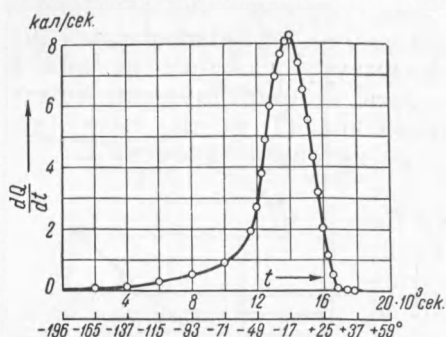
Такой вид зависимости $Q_{изм} / Q_{затр}$ от $Q_{затр}$, во всяком случае качественно, может быть истолкован как указание на то, что начальная стадия пластической деформации характеризуется образованием в кристаллической решетке металла искажений, устойчивых при температуре деформирования. Макроскопические перемещения в деформи-

руемом теле невелики, и в соответствии с этим работа деформации почти полностью переходит в потенциальную энергию искажений. Дальнейшая деформация, повидимому, понижает энергию активации процесса снятия этих искажений, так что последние при температуре опыта становятся неустойчивыми и частично снимаются, выделяя при этом в виде тепла свою избыточную энергию. Наряду с этим возрастает роль макроскопических перемещений, сопровождающихся выделением тепла, в результате чего относительное содержание скрытой энергии деформации понижается.

Данные наших опытов позволили сопоставить увеличение скрытой энергии деформации с ростом электросопротивления металла. Как видно из рис. 3, прирост удельного электросопротивления $\Delta\rho$ образцов линейно возрастает по мере увеличения скрытой энергии деформации.

§ 6. Пользуясь полученными из осциллограмм кривыми ΔR и ΔW , а также экспериментально наблюдаемой линейной зависимостью

Рис. 4. Кинетика выделения скрытой энергии деформации образцом кадмия при отжиге



$\Delta\rho(Q_{\text{изм}})$, можно рассчитать кинетику выделения скрытой энергии деформации в процессе отжига. Принимая постоянными температурный коэффициент электросопротивления и удельную теплоемкость металла (что допустимо для узкого интервала температур), можно показать, что справедлива формула:

$$\frac{dQ_{\text{изм}}}{dt} = \frac{\frac{d(\Delta R)}{dt} - \frac{R_0 \gamma}{mc} \Delta W}{\frac{R_0 \gamma}{mc} - a}, \quad (4)$$

где γ — температурный коэффициент электросопротивления; R_0 — исходное сопротивление недеформированного образца; t — время; a — тангенс угла наклона зависимости $\Delta\rho(Q_{\text{изм}})$.

Такой расчет кинетики выделения скрытой энергии деформации был произведен для образца кадмия, осциллограмма которого дана на рис. 1. Рассчитанная кривая $\frac{dQ_{\text{изм}}}{dt}(t)$ приведена на рис. 4, где также отмечены вычисленные через равные промежутки времени температуры процесса.

Площадь, ограниченная этой кривой и осью абсцисс, должна представлять собой полную скрытую энергию деформации $Q_{\text{изм}}$. Вычисленная таким образом величина $Q_{\text{изм}}$ оказывается равной 1,17 кал/г. По непосредственным измерениям $Q_{\text{изм}} = 1,13$ кал/г — вполне удовлетворительное совпадение.

Поступило
23 IV 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Федоров, ЖТФ, **11**, 999 (1941). ² Н. Кунин, Г. Сенилов, Тр. СФТИ, **4**, 132 (1936). ³ Ю. Студенок, ЖТФ, **20**, 431 (1950). ⁴ М. Дегтярев, ЖТФ, **20**, 440 (1950). ⁵ Н. Тыжнова, ЖТФ, **16**, 1389 (1946). ⁶ Б. Ровинский, ЖЭТФ, **7**, 963 (1937). ⁷ G. Taylor, W. Farren, Proc. Roy. Soc., **107**, 422 (1925). ⁸ G. Taylor, H. Quinney, *ibid.*, **143**, 307 (1934). ⁹ S. Sato, Sci. Rep. Toh. Univ., **20**, 140 (1931). ¹⁰ C. Smith, Proc. Roy. Soc., **125**, 619 (1925). ¹¹ В. Хоткевич, Н. Багров, ДАН, **81**, 1055 (1951). ¹² В. Хоткевич, В. Голик, Сборн., посвящ. 70-летию акад. А. Ф. Иоффе, Изд. АН СССР, 1950, стр. 355.