

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ  
ТВЕРДОГО ВОДОРОДА*И. Н. Крупский, А. В. Леонтьева, Л. А. Индан, О. В. Евдокимова*

Обнаружена существенная зависимость скорости установившейся ползучести  $H_2$  в области гелиевых температур от орто-пара состава образцов. При уменьшении концентрации ортомодификации до 0,2% скорость деформации водорода возрастает более, чем в 50 раз.

В последние годы заметно возрос интерес к исследованиям свойств пластичности кристаллов в области низких температур. Как показано в [1 - 3] поведение кристалла под действием нагрузки может иметь здесь качественно иной характер, что связано с влиянием на процессы пластической деформации квантовых эффектов. Вследствие малой массы молекул и сравнительно слабого ван-дер-ваальсовского взаимодействия между ними в решетке влияние квантовых эффектов должно быть особенно велико в случае твердых гелия и водорода. Исследования пластичности водорода в интервале 1,4 - 4,2 К [4] привели однако к выводу, что деформация его вплоть до 1,4 К определяется термоактивированным движением дислокаций. Малые значения энергии активации процесса ( $U < 20$  кал/моль) позволили предположить, что пластическая деформация  $H_2$  в области гелиевых температур связана с преодолением дислокациями барьеров Пайерлса. Обращает однако внимание тот факт, что скорость деформации водорода  $\dot{\epsilon}$  в ориентационно разупорядоченной фазе ( $T > 1,6$  К) оказалась зависящей от орто-пара состава образцов. Уменьшение концентрации о- $H_2$  от 75 до 2% во всем изученном интервале температур приводило к более чем двухкратному росту  $\dot{\epsilon}$ . Учитывая чувствительность ряда кинетических свойств  $H_2$  в области низких температур к наличию малых количеств орто-примеси [5 - 7], нами были проведены исследования пластичности водорода в интервале 2 - 4,2 К на образцах, в которых содержание о- $H_2$  было доведено до 0,2%.

Исследована скорость пластической деформации р- $H_2$  при одноосном растяжении образцов под действием постоянно приложенной нагрузки. В широком интервале температур и напряжений проведены также исследования пластичности нормального водорода (75% о- $H_2$ ). Все измерения выполнены на совершенно прозрачных поликристаллических образцах ( $l = 30$  мм,  $d = 6$  мм), полученных из жидкой фазы и в дальнейшем освобожденных от стенок стеклянной ампулы откачкой паров над образцом. Результаты, полученные для твердого п- $H_2$  при напряжении  $\sigma = 5,5$  г/мм<sup>2</sup> ( $\sigma/G = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $G$  - модуль сдвига), представлены на рис. 1. Анализ показывает, что при  $T > 9$  К температурное поведение скорости установившейся ползучести п- $H_2$  описывается обычной термоактивационной зависимостью с  $U = 200$  К, что совпадает с энергией активации самодиффузии [8]. Для этой области температур установлено наличие степенной зависимости  $\dot{\epsilon}$  от  $\sigma$  с показателем  $n = 3 - 3,5$ . Полученные данные указывают на то, что пластичность водорода при  $T > 9$  К определяется одним из диффузионных механизмов открепления дислокаций от ступороз.

В области гелиевых температур скорость деформации твердого  $n\text{-H}_2$  сравнительно слабо зависит от температуры и при малых значениях деформирующего напряжения ( $\sigma < 15 \text{ г/мм}^2$ ) линейно зависит от него. Полученные здесь значения скоростей хорошо согласуются с данными [4]. Измерения, проведенные в области гелиевых температур на образцах, очищенных от ортопримеси, обнаружили аномально высокие значения  $\dot{\epsilon}$ .

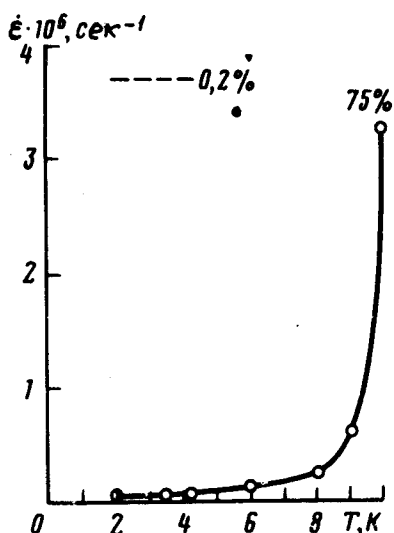


Рис. 1. Зависимость скорости установившейся ползучести  $\text{H}_2$  от температуры. Кривая — образцы нормального водорода, пунктир — образцы параводорода с 0,2% орто-модификации

Величина  $\dot{\epsilon}$  при этом оказалась весьма чувствительной как к качеству образцов, так и наличию в них посторонних примесей (исходная частота  $\text{H}_2$  была не хуже 99,9999%). Предельное значение  $\dot{\epsilon}$  для  $p\text{-H}_2$  при  $\sigma = 5,5 \text{ г/мм}^2$ , установленное по данным исследований 35 образцов составляет  $3,68 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$ , что более чем в 50 раз превышает величину, полученную для  $n\text{-H}_2$ . Несмотря на высокое качество кристаллов, указанное значение было достигнуто лишь в нескольких экспериментах. Для ряда образцов отмечено увеличение  $\dot{\epsilon}$  лишь в пределах 200 — 300%. Проведенный нами масс-спектрометрический анализ неожиданно выявил достаточно четкую корреляцию между величиной  $\dot{\epsilon}$  и содержанием в образцах дейтерия. Было установлено, что дейтерий накапливался в жидком  $p\text{-H}_2$  в процессе очистки его от ортопримеси. Минимальное полученное для  $p\text{-H}_2$  значение  $\dot{\epsilon} = 1,75 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1}$ , что соответствует концентрации дейтерия  $C_{\text{D}_2} = 0,22\%$ . Эксперименты показали, что при заданном  $C_{\text{D}_2}$  скорость деформации в интервале 2 — 4,2 К практически не зависит от температуры. Можно заключить, что в процессах открепления дислокаций от молекул  $\text{D}_2$  основную роль играют не термические, а квантовые флуктуации. В этом случае [9]:

$$\dot{\epsilon} \sim \exp[(U - \gamma\sigma)/T_{\text{эфф}}], \quad (1)$$

где  $U$  — величина барьера, препятствующего движению дислокаций,  $\gamma$  — активационный объем,  $T_{\text{эфф}}$  — эффективная температура. В области низких температур  $T_{\text{эфф}}$  с достаточной степенью точности может быть положена равной константе. Влияние на скорость деформации примеси  $\text{D}_2$

очевидно определяется зависимостью  $\gamma(C_{D_2})$ . При малой концентрации дейтерия  $\gamma$ , а следовательно и  $\ln \dot{\epsilon}$ , должны быть пропорциональны  $C_{D_2}^{-2/3}$ .

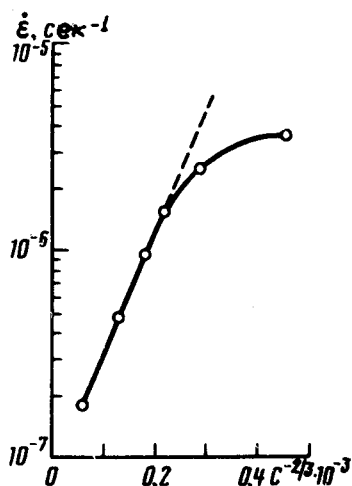


Рис. 2. Зависимость скорости установившейся ползучести параводорода от концентрации дейтерия

Как следует из рис. 2, указанная зависимость выполняется вплоть до  $C_{D_2} = 0,03\%$ . Предполагая, что пластическая деформация водорода связана со скольжением в базисных плоскостях и пользуясь соответствующим точным выражением для  $\gamma$ , из наклона прямой  $\ln \dot{\epsilon} \sim C_{D_2}^{-2/3}$  находим, что  $T_{эфф} = 12,7 \text{ К}$ . Полученное значение хорошо согласуется с величиной  $T_{эфф} = 13 \text{ К}$ , найденной по формуле [9]

$$T_{эфф} \approx T_{пл} \Delta_o^2 / \Delta_{пл}^2, \quad (2)$$

где  $T_{пл}$  — температура плавления, а  $\Delta_o^2$  и  $\Delta_{пл}^2$  — среднеквадратичные смещения молекул  $H_2$  при  $0 \text{ К}$  и  $T_{пл}$ . При  $C_{D_2} < 0,03\%$  экспериментально наблюдаемая скорость по-видимому определяется наличием в образцах остаточной примеси  $o\text{-}H_2$  ( $0,2\%$ ). Механизмом, ограничивающим длину свободного пробега дислокаций в кристалле, при этом может стать торможение их на кластерах ортомолекул. Известно, что электростатическое квадруполь-квадрупольное взаимодействие ортомолекул, являющихся ближайшими соседями в решетке, на  $4 \text{ К}$  превышает энергию взаимодействия парамолекул [10]. При малых концентрациях  $o\text{-}H_2$  и соответственно больших скоростях дислокаций преодоление кластеров скорее всего осуществляется за счет потери дислокациями части своей кинетической энергии. При больших концентрациях  $o\text{-}H_2$  основную роль очевидно начинают играть процессы активации. Экстраполяция к  $0 \text{ К}$  температурных зависимостей энергии активации в  $n\text{-}H_2$  и  $p\text{-}H_2$  с  $2\%$   $o\text{-}H_2$ , полученных в [4] для нескольких значений  $\sigma$ , приво-

дит к величинам соответственно равным  $4 \pm 0,2$  и  $4,5 \pm 0,5$  К, что фактически совпадает с энергией, характеризующей взаимодействие ортомолекул в кластере.

Таким образом, проведенные нами эксперименты не обнаружили какого-либо влияния пайерлсовского рельефа на скорость пластической деформации  $\rho\text{-H}_2$ . В абсолютно свободном от примесей параводороде скорость деформации может по-видимому достигать исключительно больших значений. Вопрос о том, достигается эта скорость в результате надбарьерного движения дислокаций или когерентного туннелирования их через барьеры Пайерлса, требует однако дальнейшего изучения. Перспективно в этом отношении исследование  $\epsilon$  в зависимости от  $\sigma$ . Если прикладываемое к кристаллу напряжение приводит к сбою уровней дислокаций в долинах пайерлсовского рельефа, в области малых напряжений должны наблюдаться аномальные зависимости  $\epsilon(\sigma)$ .

Авторы выражают благодарность М.А.Стржемечному и Ю.А. Фрейману за обсуждение полученных в работе результатов.

Физико-технический институт  
низких температур  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
28 июля 1976 г.

### Литература

- [ 1 ] А.Ф.Андреев, И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 56, 2057, 1969.
- [ 2 ] Б.В.Петухов, В.Л.Покровский. Письма в ЖЭТФ, 15, 63, 1972; ЖЭТФ, 63, 634, 1972.
- [ 3 ] А.Ф.Андреев. УФН, 118, 251, 1976.
- [ 4 ] Ю.Е.Стеценко. Пластическая деформация нормального водорода, парагидрогена и нормального дейтерия. Автореферат кандидатской диссертации. Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1971.
- [ 5 ] R.G.Bohn, C.F.Mate. Phys. Rev., B2, 2121, 1970.
- [ 6 ] L.J.Amstutz, J.R.Thompson, H.Meyer, Phys. Rev. Lett., 21, 1175, 1968.
- [ 7 ] В.Б.Кокшенев, М.А.Стржемечный. ФНТ, 2, 1076, 1976.
- [ 8 ] F.Weinhaus, H.Meyer. Phys. Rev., B7, 2974, 1973.
- [ 9 ] И.Н.Крупский, А.В.Леонтьева, Ю.С.Строилов. ЖЭТФ, 65, 1917, 1973.
- [ 10 ] T.Nakamura. Progr. Theor. Phys. (Kyoto), 14, 135, 1955.