

## О ПЛАСТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $He^4$

В.Л.Цымбаленко

В работе изучалось пластическое течение кристаллического гелия в диапазоне температур  $0,6 - 2,1$  К при давлениях  $25,7 - 40$  атм с абсолютными скоростями деформации  $5 \cdot 10^{-10} - 10^{-6}$  см/сек. Измерены зависимости скорости деформации от приложенной силы и температуры. На основании полученных данных делается вывод о дислокационной природе пластической деформации.

Большая величина амплитуды нулевых колебаний атомов в кристаллах гелия приводит к тому, что дефекты, в частности вакансии, при низких температурах должны рассматриваться как квазичастицы [1]. В таких условиях кристалл должен обладать аномально большой текучестью. В [2] не было обнаружено перемещения замороженного в кристалл гелия шарика диаметром  $1,3$  мкм под действием силы  $7,5$  Г со скоростью большей  $2 \cdot 10^{-7}$  см/сек. В работе [3], где изучалось пластическое течение поликристаллов гелия со скоростями  $10^{-4} + 10^{-1}$  см/сек, автор пришел к выводу, что основной механизм пластической деформации – движение дислокаций.

В настоящей работе изучалась пластическая деформация кристаллов  $He^4$  при предельно малых нагрузках и скоростях.

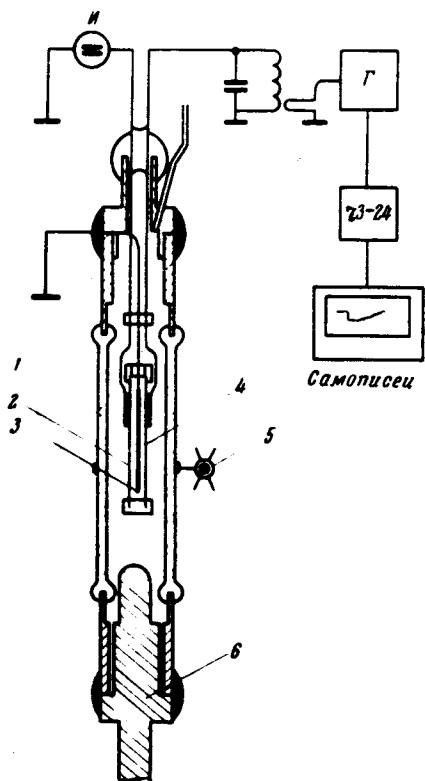


Рис. 1. Общий вид прибора: 1 – стеклянный контейнер, 2, 4 – неподвижные пластины, 3 – подвижная пластина, 5 – термометр сопротивления, 6 – медный холодопровод

На рис. 1 изображен использованный для этой цели прибор. Кристаллы гелия выращивались в условиях малого градиента температуры снизу вверх в вертикально расположенной ампуле со скоростями  $10^{-4}$  см/сек. В середине ампулы находился двойной конденсатор с пластинами из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм. Крайние пластины 2 и 4 размером  $14 \times 4$  мм<sup>2</sup> были жестко соединены друг с другом, а средняя пластина 3 размером  $10 \times 4$  мм<sup>2</sup> была укреплена на подвесе с минимальной жесткостью. Зазоры выдерживались с точностью 0,04 мм и составляли 0,35 мм. Конденсатор, образованный пластинами 3 и 4, входил в колебательный контур высокостабильного генератора, частота которого измерялась электронно-счетным частотомером и записывалась на самописце. Ошибка в абсолютном среднем перемещении пластины 3 составляла  $\sim 10^{-8}$  см, а небольшая величина собственного дрейфа генератора позволяла измерять скорости с ошибкой  $(2 + 5) \times 10^{-10}$  см/сек. При приложении между пластинами 2 и 3 разности потенциалов 10 кв развивалась сила  $\sim 55$  Г. Температура измерялась термометром сопротивления и в течение опыта поддерживалась с точностью 0,002 К.

Нами были проведены эксперименты с кристаллами  $\text{He}^4$ , выращенными при давлениях 25,7 – 40 атм в диапазоне температур 2,1 – 0,6 К. Наиболее подробно было изучено пластическое течение кристаллов, выращенных при давлении 32,2 атм. На рис. 2 представлены зависимости скорости движения центральной пластины от приложенной силы. Видно, что скорость дрейфа зависит от силы нелинейным образом при всех температурах. Не удалось подобрать, однако, универсального закона, но каждую отдельную кривую в пределах ошибки эксперимента можно было аппроксимировать степенным законом  $v \sim F^\alpha$ , где показатель  $\alpha = 3 + 5$ . По мере деформации скорость дрейфа пластины падает, выходя на константу (рис. 2, вверху), т.е. кристалл "ужестчается". Это же явление иллюстрируется семействами кривых, снятых при постоянных температурах, но при различных суммарных деформациях (рис. 2, кривые 2а, в, с). После снятия нагрузки вблизи температуры плавления ( $T_{\text{пл}} - T = 0,05$  К) наблюдалось возвратное движение на величину  $\sim 3\%$  от предыдущей деформации.

Качественно подобные зависимости наблюдались при всех использованных давлениях как в ГПУ фазе, так и в ОШК фазе. На рис. 3 изображены температурные зависимости установившейся скорости дрейфа при постоянной силе для трех давлений: 40; 32,2; 25,7 атм. Приближая экспериментальные точки зависимостью  $v \sim \exp(-\Delta/T)$  получим для параметра  $\Delta$  значения 210, 110 и 250 К соответственно. Мы заменяли среднюю сплошную пластину на прессованную плоскую сетку, изготовленную из никелевых проволок  $\Phi 0,1$  мм с квадратными ячейками  $0,25 \times 0,25$  мм<sup>2</sup>. Абсолютные скорости дрейфа при этом возросли на два порядка но качественное подобие сохранилось (рис. 3). Было произведено несколько опытов с кристаллами, охлажденными до температур 1,3 и 0,6 К без предварительной деформации. Скорости пластического течения в этих экспериментах были за пределами чувствительности

При температурах  $\sim 1,3$  К заметное перемещение центральной пластины можно вызвать приложением силы  $\sim 25$  Г. Движение начиналось

с пороговой силы, скорость была непостоянна и равнялась  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  см/сек. Пороговая сила возрастала при понижении температуры. Последовательными деформациями жесткость кристалла можно было увеличить. После снятия нагрузки наблюдалась релаксация – возвратное немонотонное движение пластины с характерным временем установления  $\sim 3$  мин.

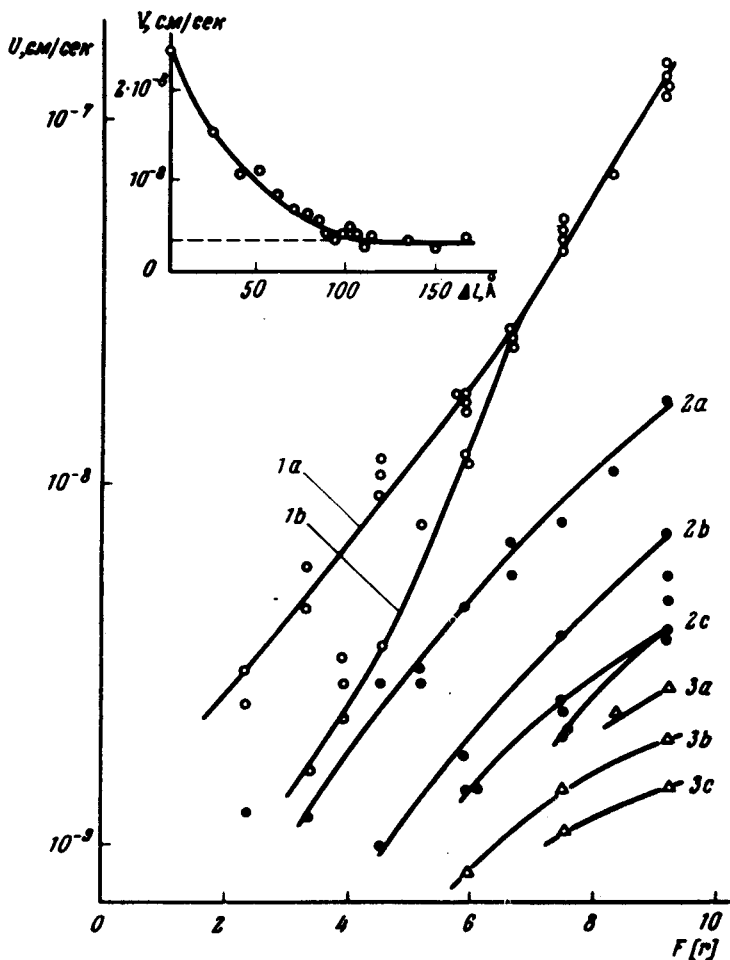


Рис. 2. Зависимость скорости пластической деформации от силы (32,2 атм):  $\circ$  –  $T = 1,76\text{K}$  1,а – без деформации, 1b – деформация 700 Å;  $\bullet$  –  $T = 1,67\text{K}$  2a – без деформации, 2b – деформация 50 Å, 2c – деформация 200 Å;  $\Delta$  –  $T = 1,64\text{K}$  3a – без деформации, 3b – деформация 50 Å, 3c – деформация 80 Å. Вверху: пример зависимости скорости деформации от деформации

Сравнивая полученные результаты с аналогичными зависимостями для обычных монокристаллов, нам кажется возможным предположить, что в исследованном диапазоне температур и давлений пластическое течение кристаллического гелия со скоростями  $\geq 5 \cdot 10^{10}$  см/сек осуществляется движением дислокаций. Это дает для скорости пластической деформации за счет движения вакансий величину  $v < 5 \cdot 10^{10}$  см/сек.

Используя результаты работы [4] можно вычислить длину свободного пробега вакансий вблизи температуры плавления  $l < 7 \text{ \AA}$ , зависящей от температуры как  $l = a (T_0/T)^9$  ( $a$  – среднее межатомное расстояние), откуда следует, что  $T_0 < 1,85 \text{ К}$ .

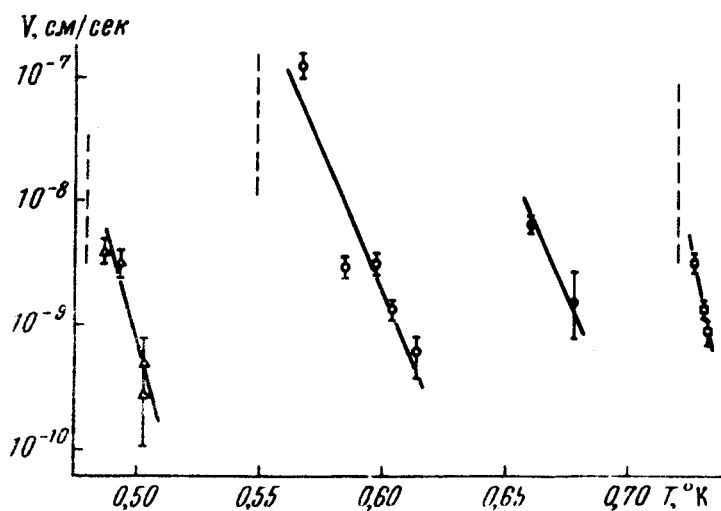


Рис. 3. Зависимость скорости пластической деформации от температуры при постоянной силе 9,2 Г. Вертикальные штриховые линии слева от экспериментальных точек – соответствующие температуры плавления:  $\Delta$  –  $P = 40 \text{ атм}$ , сплошная пластина,  $\circ$  –  $P = 32,2 \text{ атм}$ , сплошная пластина,  $\bullet$  –  $P = 32,2 \text{ атм}$ , сетка,  $\square$  –  $P = 25,7 \text{ атм}$ , сплошная пластина

Я благодарен П.Л. Капице за возможность выполнения этой работы, А.И.Шальникову за постановку задачи, постоянное внимание и помощь в работе, а также А.Ф.Андрееву, Н.В. Заваричкому, А.Э. Мейеровичу и Ю.В.Шарвину за ценную дискуссию.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
19 мая 1976 г.

### Литература

- [1] А.Ф.Андреев, И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 56, 2057, 1969.
- [2] А.Андреев, К.Кешишев, Л.Межов-Деглин, А.Шальников. Письма в ЖЭТФ, 9, 507, 1969.
- [3] Н.Suzuki. J.Phys.Soc.Jap., 35, 1472, 1973.
- [4] А.Э.Мейерович. ЖЭТФ, 71, вып. 9, 1976.