

# Локальный разогрев при деформации в области гелиевых температур и его измерение с помощью тензодатчиков

© В.И. Николаев, В.В. Шпейзман, М.В. Суханова\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* ФГУП „Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова“,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 июля 2007 г.)

Показано, что скачкообразная деформация образцов нержавеющей стали в жидком гелии сопровождается локальным разогревом с повышением температуры при каждом скачке до  $\sim 80$  К. Измерения проводились с помощью проволочных тензодатчиков, которые наклеивались на образец, и в области малых деформаций использовались для определения модуля упругости и предела текучести. В области деформаций  $\varepsilon \sim 0.06-0.08$  датчики самопроизвольно, из-за разрушения клеевого слоя, разгружались и реагировали только на изменения температуры образца при скачках деформации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-01204).

PACS: 62.20.-x, 61.43.Gt

## 1. Введение

Проведенные ранее исследования проникновения атомов He в процессе деформации меди и железа в среде жидкого He [1,2] показали, что при анализе полученных результатов нужно иметь представление о реальной температуре образца, которая, как известно, может существенно отличаться от температуры окружающей среды, в котором проводят испытания.

Попытки измерить или рассчитать температуру образца при скачкообразной деформации предпринимались ранее неоднократно. Как следует из [3–9], значительный локальный разогрев кристаллических материалов при очень низких температурах зависит как от их теплоемкости и теплопроводности, так и от температуры среды, коэффициента теплоотдачи (поверхностного теплообмена) деформируемых образцов и скорости их деформации в среде жидкого или газообразного гелия. Чем глубже скачок на диаграмме растяжения, тем больше разогрев образца. Расчетные оценки теплового эффекта в предположении, что процесс деформации является адиабатическим, дают в зависимости от степени локализации деформации от единиц до 100–200 К [6]. Измерение температуры занимает время, значительно большее, чем время прохождения локализованного сдвига, которое по различным оценкам составляет  $10^{-5}-10^{-3}$  с [5–8,10–12]. Чаще всего измерения температуры производят с помощью термпары, прижатой к образцу или помещенной в специально сделанное в образце углубление. Оригинальный метод наблюдения тепловых эффектов при деформации образца в жидком гелии — по вскипанию гелия и образованию пузырьков в местах выхода полос скольжения на поверхность, использован в [7]. В [13] предложено экспериментально определять ве-

личину разогрева при скачкообразной деформации с использованием перехода ниобия в сверхпроводящее состояние при  $T = 8.7$  К. Если измерять электросопротивление полоски ниобия, помещенного в He на некотором расстоянии от деформируемого образца, то по величине максимального расстояния, на котором ниобий переходит в нормальное состояние, можно судить о тепловом эффекте в момент скачка деформации. Оценка показала, что величина разогрева полосы локального сдвига при сжатии ниобия может превышать 200 К, а образца в целом — 70 К.

Целью настоящей работы было измерить тепловые эффекты в скачках деформации на протяжении всей кривой растяжения вплоть до разрушения образца, используя стандартную для определения характеристик кривой растяжения аппаратуру, и проанализировать возможности предлагаемого метода измерений.

## 2. Экспериментальная методика

При разработке конструкций, работающих при криогенных температурах, требуется знание целого ряда механических характеристик материала, из которых одними из важнейших являются модуль упругости и предел текучести при растяжении. Для точного их определения применяются низкотемпературные экстензометры или специальные тензодатчики, которые имеют линейную характеристику при комнатной температуре до деформации  $\varepsilon_{\max} = \pm 1.5\%$ .<sup>1</sup> Если требуется довести

<sup>1</sup> Наши измерения показали, что при низких температурах можно использовать тензодатчики с меньшим значением  $\varepsilon_{\max}$ . Это связано с тем, что при охлаждении из-за разницы в коэффициентах линейного расширения материала датчика (константан, нихром) и полимерной пленки в сплаве создаются сжимающие напряжения, поэтому при измерении датчик вначале разгружается и затем растягивается.

образец до разрушения и получить другие характеристики кривой растяжения в этом же опыте, такие как, например, максимальное напряжение на диаграмме и полное удлинение, то при использовании экстензометра приходится каким-либо способом его удалять, чтобы не испортить экстензометр при деформации, превышающей допустимые для него значения, или при разрыве образца. Тензодатчики, наклеенные на образец, как правило, разрываются при превышении предельной для них деформации. Однако оказалось, что можно путем термообработки наклеенных тензодатчиков добиться того, чтобы после поперечной деформации образца 3–4% датчики не разрывались, а отрывались с тонким слоем клея от поверхности образца. В этих случаях можно было определить модуль упругости и предел текучести, измеряя электросопротивление датчика до отрыва (в начальной стадии деформации, где сохраняется линейность его характеристики), а по измерениям после отрыва осуществить мониторинг температуры вблизи поверхности образца при каждом скачке деформации вплоть до разрыва.

Образцы для этих испытаний изготавливались в виде гантелей с резьбовыми головками и рабочей частью диаметром 4 и длиной 20 mm. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 1342 в гелиевом криостате фирмы Oxford. Предварительное охлаждение образцов до температур  $T \sim 100$  K осуществлялось с помощью жидкого азота. Жидкий гелий подавался в криостат с помощью двух насосов, создававших в криостате слабое разрежение. Скорость перемещения захватов машины составляла  $\sim 1$  mm/min. Всего было испытано семь образцов.

Два тензодатчика с базой 3 mm наклеивались симметрично относительно оси образца. Поскольку испытывались образцы сравнительно небольшого диаметра, подложки датчиков перекрывались, и после отрыва они образовывали цилиндрический „чулок“, расположенный с небольшим зазором вокруг поверхности образца. Измерения проводились в режиме постоянного по величине тока, напряжение на тензодатчике  $U$  определялось цифровым вольтметром и записывалось вместе с нагрузкой и удлинением на компьютере. После испытания в процессе отогрева криостата была измерена температурная зависимость электросопротивления деформированных тензодатчиков в интервале температуры от 4.2 K до комнатной; температура вблизи образца определялась с помощью стандартного Rh–Fe-термосопротивления. Для уточнения этой зависимости аналогичная процедура была проведена с ненагруженными деформированными датчиками и при охлаждении криостата. Усредненную характеристику  $U(T)$  можно описать линейной функцией  $U(T) - U(4.2) = c(T - 4.2)$ , где  $c = (0.175 \pm 0.003)$  mV/K, а  $U(4.2)$  — напряжение на датчике при  $T = 4.2$  K в mV.

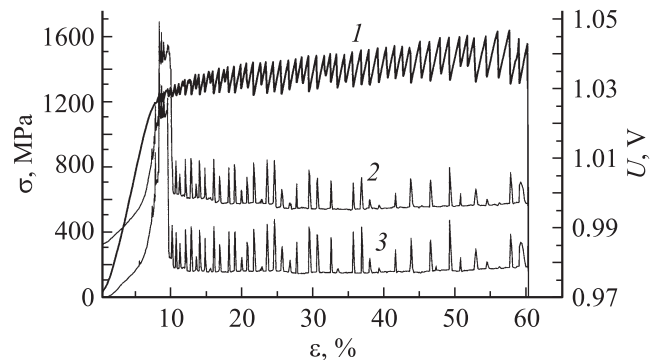


Рис. 1. Кривая растяжения нержавеющей стали при 4.2 K (1) и скачки электронапряжения на двух тензодатчиках (2 и 3), наклеенных симметрично вдоль оси растяжения образца.

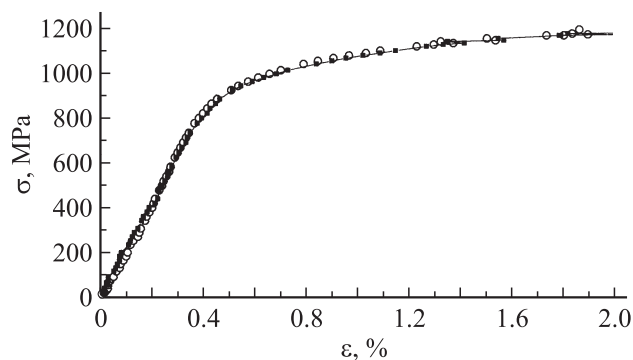


Рис. 2. Начальная стадия кривой деформирования при 4.2 K в координатах  $\sigma$ – $\epsilon$ .  $\epsilon$  — деформация наклеенного тензодатчика. Точки разного вида соответствуют показаниям двух датчиков.

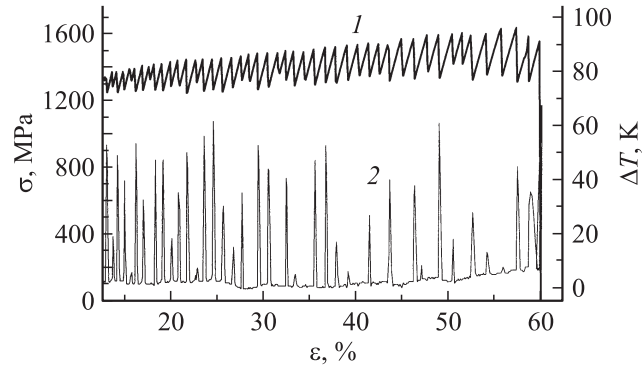
### 3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 в качестве примера приведены кривая растяжения образца аустенитной стали в координатах напряжение ( $\sigma$ )–деформация ( $\epsilon$ ) и показания двух тензодатчиков. На рис. 2 показана начальная часть кривой растяжения, по которой можно рассчитать модуль упругости и предел текучести, т.е. напряжение, соответствующее неупругой деформации  $\epsilon = 0.2\%$ . Точками разного вида обозначены показания двух датчиков, наклеенных на разных сторонах образца. Совпадение показаний датчиков свидетельствует об отсутствии изгиба образца при его растяжении. На рис. 1 масштаб на оси  $\epsilon$  выбран так, чтобы отчетливо были видны скачки напряжений и соответствующие им всплески температуры (электросопротивления тензодатчиков). Вид скачков на диаграмме свидетельствует о том, что пластическая деформация осуществляется только скачками, в промежутках между скачками упругая деформация растет, а пластическая не изменяется. На зависимости напряжения на тензодатчике (или его сопротивления)

от деформации можно выделить несколько участков (рис. 1). Первый (до  $\varepsilon \approx 8-9\%$ ) — изотермический участок, начальная часть которого показана на рис. 2, но в другом масштабе, позволяющем разделить упругую и неупругую области.<sup>2</sup> Далее начинается резкое возрастание электросопротивления, связанное очевидно, с локальным резким уменьшением сечения проволоки тензодатчика вследствие пластической деформации. Там же, как видно, начинаются заметные на кривой сжатия скачки напряжений, которые приводят к возрастанию электросопротивления как из-за увеличения деформации проволоки датчика, так и из-за роста температуры. Затем датчики отрываются от образца, та часть их сопротивления, которая вызвана упругой деформацией, становится равной нулю, и в дальнейшем они реагируют только на изменение температуры в момент скачка деформации.

Отметим следующие особенности кривых растяжения и связанных с деформацией тепловых эффектов. Практически каждому скачку напряжений на диаграмме соответствует пик напряженности на датчиках. Отсутствие пика при скачке наблюдается крайне редко. Как правило, показания обоих датчиков полностью идентичны, можно заметить лишь небольшие различия в амплитудах отдельных пиков. Иногда наблюдается более значительное расхождение в амплитудах пиков. Кроме того, отсутствует корреляция между величиной скачка напряжений на диаграмме и амплитудой пика сопротивления датчика. Если рассматривать пакет рядом стоящих скачков, то окажется, что амплитуды соответствующих им пиков могут существенно различаться. Пики напряжений на датчиках хаотичны по величине, а для скачков на диаграмме наблюдается в среднем рост их величины с деформацией. Все эти особенности могут быть связаны с геометрией деформации и расположением датчиков относительно места на образце, где развивается локализованная деформация, вызвавшая данный скачок. Первые заметные скачки обнаруживаются при  $\varepsilon \sim 10\%$ , т.е. при поперечной деформации  $\sim 5\%$ , что соответствует зазору между датчиком и образцом  $\sim 0.1$  мм, а при  $\varepsilon \sim 60\%$  этот зазор  $\sim 0.6$  мм. Если следовать оценкам температуры разогрева, приведенным в [13], и предположить, что в нашем случае нагревается вскипевший гелий в объеме между образцом и датчиками, то можно показать, что для разогрева на десятки градусов изменение температуры тензодатчика в первом приближении пропорционально расстоянию до очага разогрева. Из сравнения размеров датчика и образца следует, что датчик, расположенный до начала деформации в середине рабочей части образца, отстоит от ее края на 8.5 мм при  $\varepsilon = 0$  и 20.5 мм при  $\varepsilon = 60\%$ .

<sup>2</sup> Заметим, что в величину  $\varepsilon$  на рис. 1, которая в отличие от данных рис. 2 рассчитывалась по перемещению подвижного захвата испытательной машины, входит деформация, не связанная с образцом, зависящая от жесткости машины и составляющая на уровне предела текучести  $\sim 6\%$ . Следовательно, деформация образца на изотермическом участке составляет  $\sim 2\%$ , что отчетливо видно на рис. 2, где появление первых малых скачков деформации можно заметить при  $\varepsilon \approx 1.3\%$ .



**Рис. 3.** Кривая деформирования (1) и скачки температуры (2) для образца из нержавеющей стали при больших деформациях растяжения в жидком гелии.

Отсюда можно сделать следующие выводы. Во-первых, в отличие от данных [14] локализованная деформация в нержавеющей стали развивается хаотически по длине образца, а не распространяется волной от первого скачка деформации. Во-вторых, увеличение зазора между образцом и датчиком способно компенсировать небольшой эффект, связанный с ростом величины скачков на диаграмме растяжения. Этим можно объяснить отсутствие увеличения амплитуды скачков электросопротивления тензодатчиков с ростом деформации образца. Отмеченное выше иногда наблюдаемое различие в показаниях двух тензодатчиков, расположенных на одном образце, может быть вызвано асимметрией отдельной полосы локализованного сдвига по отношению к тензодатчикам, например, из-за ее остановки внутри образца на некотором расстоянии от поверхности.

С использованием тарировки электросопротивления деформированных тензодатчиков по температуре были построены зависимости температуры от деформации для области  $\varepsilon > 10\%$ , где можно было быть уверенным в полной механической разгрузке датчиков (рис. 3). Как видно, измеряемая температура для разных скачков напряжений изменяется в пределах 5–80 К. Иногда наблюдалось небольшое увеличение средней температуры образца в области больших деформаций. Различия поведения образцов можно связать с индивидуальными особенностями структуры и со случайным характером распространения полос локализованного сдвига по длине образца. Максимальные значения измеренного разогрева согласуются с известными данными, приведенными в [3–9].

Таким образом, при помощи тензодатчиков оказывается возможным в одном опыте измерять механические характеристики (модуль упругости, предел текучести, максимальное напряжение на диаграмме, полное удлинение) и температуру образца на разных стадиях его деформации. Измерения показали, что для скачков величиной  $\Delta\sigma \sim 0.15\sigma$  при растяжении нержавеющей стали в жидком гелии подъем температуры в момент

скачка составляет  $\sim 80$  К. К началу следующего скачка температура среды возвращается к 4.2 К. Расположив тензодатчики в разных местах рабочей длины образца, можно попытаться связать скачки с местом на образце, где прошел локализованный сдвиг.

## Список литературы

- [1] О.В. Клявин, В.И. Николаев, Л.В. Хабарин, Ю.М. Чернов, В.В. Шпейзман. ФТТ **45**, 2187 (2003).
- [2] О.В. Клявин, В.И. Николаев, Б.И. Смирнов, Л.В. Хабарин, Ю.М. Чернов, В.В. Шпейзман. ФТТ **49**, 1590 (2007).
- [3] О.В. Клявин. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. Наука, М. (1987). 255 с.
- [4] Г.А. Малыгин. ФТТ **39**, 2019 (1997).
- [5] В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. Металлургия, М. (1975). 328 с.
- [6] А.Р. Бараз, Б.В. Молотилов. ФНТ **3**, 514 (1977).
- [7] О.В. Клявин, А.В. Никифоров. Изв. АН СССР. Сер. физ. **27**, 2411 (1973).
- [8] T. Ogata, K. Ishikawa, K. Nagai, O. Umezawa, T. Yuri. In: *Advances in cryogenic engineering materials* / Eds R.W. Fast, F.R. Fickett. Plenum, N. Y. (1990). V. 36, Pt B, P. 1249.
- [9] О.В. Клявин. ФТТ **35**, 513 (1993).
- [10] Г.А. Малыгин. ФТТ **37**, 2281 (1995).
- [11] В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, Б.И. Смирнов, А.Б. Лебедев, В.В. Ветров, С.А. Пульнев, В.И. Копылов. ФТТ **40**, 1639 (1998).
- [12] A.M. Dolgin, V.Z. Benguz. Phys. Stat. Sol. (a) **94**, 529 (1986).
- [13] В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, Б.И. Смирнов, А.Б. Лебедев, В.И. Копылов. ФТТ **42**, 1034 (2000).
- [14] J.C. Erdmann, J.A. Jahoda. J. Appl. Phys. **39**, 2793 (1968).