

## Неустойчивость деформации и разрушение при температуре жидкого гелия

© В.И. Николаев, В.В. Шпейзман

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

(Поступила в Редакцию 21 ноября 1996 г.)

Изучена неустойчивость пластической деформации при растяжении и сжатии алюминия, растяжении титана и нержавеющей стали, определена температурно-скоростная область существования неустойчивости деформации. Исследована также форма скачков напряжений течения и их связь с макроскопической локализацией деформации и разрушением образца. Обсуждается роль локализации микродеформации в разрушении и в макроскопических проявлениях неоднородности деформации.

Характерным примером неустойчивости пластической деформации, приводящей к ее макромасштабной локализации, является скачкообразная деформация при гелиевых температурах. Для большинства материалов на кривых деформации образцов наблюдаются срывы, а волнистость внешней поверхности образцов прямо свидетельствует о прохождении локализованных сдвигов [1,2]. Существуют многочисленные литературные данные, описывающие влияние на появление и форму скачков различных факторов, как внешних (температуры, скорости деформации, размера и типа образца, качества его поверхности), так и внутренних (примесей, границ зерен, двойников и др.) [1–3], обсуждаются также механизмы скачкообразной деформации [3,4]. Однако вопрос о том, влияет ли неустойчивость деформации на разрушение, насколько нам известно, систематически не исследовался (за исключением, пожалуй, случаев разрушения при первом скачке деформации). Важность подобных исследований очевидна, поскольку именно локализация деформации и невозможность релаксации созданных ею высоких локальных перенапряжений могут привести к раннему разрушению. Этот аспект исследований низкотемпературной неустойчивости интересен еще и потому, что может быть использован в анализе разрушения при умеренных и даже высоких температурах, так как в большинстве случаев разрушение вызвано локализованной микродеформацией. Представляется, что на основе исследований более доступной макромасштабной локализации при низких температурах можно будет построить обобщенную модель разрушения вследствие локализации и торможения дальнейшего развития деформации.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные о различных формах проявления неустойчивости деформации при низких температурах и о возможном ее влиянии на разрушение.

### 1. Методика эксперимента

Опыты проводились на универсальной испытательной машине Instron 1342, специально приспособленной для работы с гелиевым криостатом фирмы Oxford. Для пред-

варительного охлаждения использовался жидкий азот, который заливался непосредственно в камеру с образцом. Далее жидкий азот испарялся и в тот же объем подавался гелий с помощью двух насосов, создававших в криостате слабое разрежение. Температура образца измерялась с помощью температурного контроллера ИТС4 фирмы Oxford, датчиками температуры служили термосопротивления RhFe.

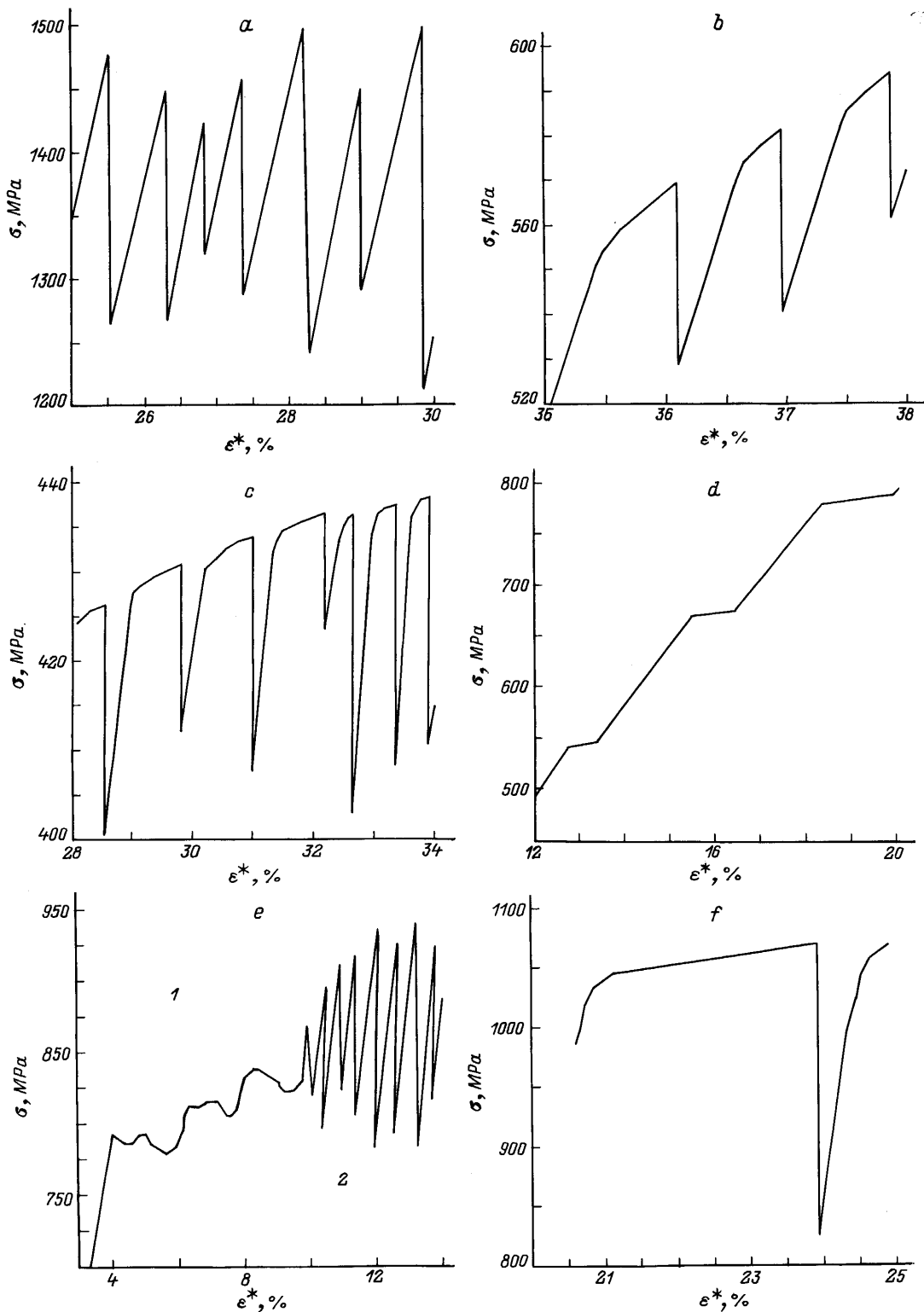
Для того чтобы сократить расход гелия и время испытаний, в ряде случаев была использована специальная многообразцовая кассета, позволяющая загружать в криостат сразу несколько однотипных образцов и последовательно испытывать их.

Режимы испытаний задавались с помощью компьютера HP300. Программа для испытаний с постоянной скоростью деформации была стандартного типа и позволяла записывать данные нагрузка–перемещение через равные промежутки времени. Скорость перемещения захватов машины составляла 0.7–3 mm/min. Программа для испытаний на усталость была разработана нами специально для того, чтобы иметь возможность записывать в течение длительного испытания циклы с заранее заданными номерами. При этом для повышения точности записи частоту измерительного цикла можно было уменьшить. В наших опытах частота, при которой производились измерения, была 0.1 Hz.

Испытания одноосным растяжением проводились на плоских и цилиндрических образцах из различных материалов: алюминия, титана, аустенитной стали. Первые имели толщину 1 и ширину 5 mm, вторые — диаметр рабочей части 4–5 mm; длина рабочей части в обоих случаях была 30 mm. Для сжатия использовались цилиндрические образцы диаметром 4–6 mm и высотой 8–14 mm.

### 2. Результаты опытов и их обсуждение

На рис. 1 показаны некоторые примеры проявления деформационной неустойчивости на диаграммах растяжения (сжатия) с постоянной скоростью в разных материалах и для разных условий нагружения. Иногда можно наблюдать регулярную картину ”классических” скачков



**Рис. 1.** Различные формы проявления неустойчивости деформации. *a* — нержавеющая сталь, 4,2 К,  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , растяжение, *b, c* — алюминий, 4,2 К,  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , сжатие (*b*) и растяжение (*c*), *d* — вид скачков при фиксированной скорости нагружения, титан, 4,2 К, 1 Гц; *e* — титан, 4,2 К, переход от скорости  $10^{-2}$  (1) к  $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (2); *f* — скачки вблизи границы области неустойчивости, титан, 16 К,  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Следует иметь в виду условность величины  $\epsilon^*$ , которая складывается из деформации образца и податливости машины. Последняя дает основной вклад в  $\epsilon^*$  на участке упругой деформации. При больших пластических деформациях эта величина практически совпадает с деформацией образца  $\epsilon$ . Экспериментальные данные сознательно не перестраивались в координаты  $\sigma - \epsilon$ , так как в этом случае скачки приняли бы непривычный вид: наклонный сброс нагрузки и вертикальный подъем (для упругого скачка).

с почти вертикальным передним фронтом (длительность скачка деформации, по данным наших измерений на осциллографе РМ3050 Phillips, составляла 5–7 ms, а общая длительность участка спада нагрузки с учетом релаксационных процессов в образце и инерционности машины равна 50 ms) и практически упругим нагружением до следующего скачка (рис. 1, а). В этом случае вся деформация образца представляет собой локализованную деформацию по полосам сдвига, которые хорошо видны на боковых поверхностях образца (рис. 2), а для начального толчка, вызвавшего лавинообразную деформацию, требуется очень малая ее величина. Такие скачки наблюдаются в наших опытах при напряжениях, близких к макроскопическому пределу текучести. Здесь уместно заметить, что, как показано в [5], микропластическая деформация, по своей природе являющаяся локализованной, всегда развивается неравномерно, т.е. микроскачками, что наблюдали в [5] с помощью прецизионных методов лазерной интерферометрии. Следовательно, в нашем случае на смену микролокализации сразу же приходит макролокализация, т.е. вся деформация вплоть до разрушения является локализованной.

В отличие от титана и нержавеющей стали, поведение которых при 4.2 К подобно описанному выше, скачки в алюминии появляются после значительной деформации. На рис. 1, b и c приведены участки диаграмм растяжения и сжатия алюминия при 4.2 К. Сброс нагрузки по-прежнему резкий, как и на рис. 1, а, но нарастание нагрузки идет с заметной однородной (нелокализованной) пластической деформацией. Интересно, что при сжатии скачки следуют с большим интервалом по деформации, чем при растяжении, если их сравнивать при одинаковой

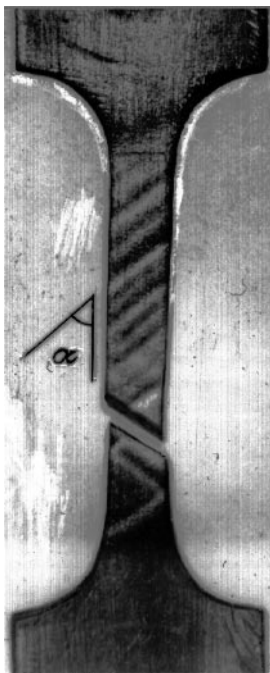


Рис. 2. Поверхность титанового образца после растяжения с постоянной скоростью при  $T = 4.2$  К. Угол  $\alpha \cong 55^\circ$ .

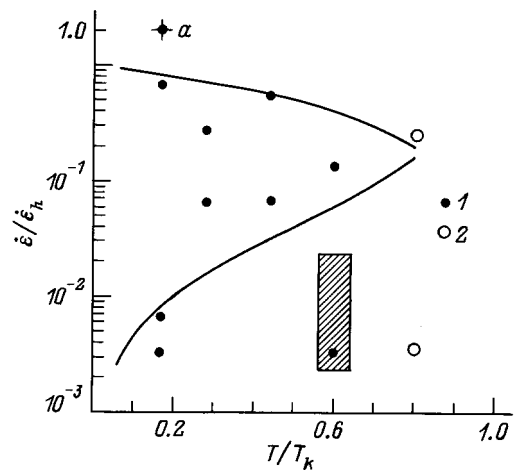


Рис. 3. Расчетные кривые границ существования скачкообразной деформации. Экспериментальные точки для титана: 1 — скачки наблюдались, 2 — скачки отсутствовали. Прямоугольником отмечена область, в которой наблюдались нерегулярные скачки деформации.

деформации  $\varepsilon$  (переход к истинным деформациям еще больше увеличит эту разницу). Очевидно, эту некоторую затрудненность скачка при сжатии можно связать с влиянием геометрии деформации: при растяжении локальная деформация приводит к уменьшению сечения и, следовательно, способствует дальнейшей локализации деформации; при сжатии, наоборот, деформация увеличивает сечение и при прочих равных условиях тормозит развитие неустойчивости.

При испытании с фиксированной скоростью возрастания нагрузки (в наших опытах этому условию соответствует первая четверть цикла в опытах с циклическим нагружением) скачки в тех же координатах выглядят как почти горизонтальные участки (рис. 1, d). При больших скоростях деформации скачки нагрузки могут размываться (рис. 1, e). Этот же рисунок демонстрирует изменение формы и положения скачков при изменении скорости деформации. Отметим аномальную скоростную зависимость напряжений течения: чем меньше скорость, тем больше напряжение. Однако было бы неверным считать это условие достаточным для развития деформационной неустойчивости. При более высоких температурах ( $> 20$  К), где нет скачков деформации, скоростная зависимость напряжений течения также была аномальной.

Известно [6,7], что существует ограниченная область температур  $T$  и скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}$ , в которой можно наблюдать скачки. На рис. 3 приведен пример такой диаграммы для титана, темные точки соответствуют условиям, в которых обнаружены скачки деформации, светлые точки — условиям отсутствия скачков. Границы области, согласно [6], описываются следующими уравнениями:

$$\dot{\varepsilon}_1 \cong \dot{\varepsilon}_h \frac{(T/T_k)^{p+1}}{[1 - (T/T_k)^n] \ln \nu / \dot{\varepsilon}_0} \quad (1)$$

для нижней границы и

$$\dot{\varepsilon}_2 \cong \dot{\varepsilon}_h(1 - T/T_k) \quad (2)$$

для верхней границы.

Здесь  $p$  — параметр, характеризующий поверхностную теплоотдачу,  $p = 0$  для испытаний в газообразном гелии [6], величина  $n = 1$  для материалов с электронным типом теплоемкости при низких температурах и  $n = 3$  для материалов с фоновым типом теплоемкости [6],  $T$  и  $\dot{\varepsilon}$  — температура опыта и скорость деформации соответственно,  $\nu$  — предэкспонента в формуле для скорости деформации,  $\ln \nu/\dot{\varepsilon}_0 = 25$ ,  $T_k$  и  $\dot{\varepsilon}_h$  — некоторые константы, выражения для которых приведены в [6] (в настоящей работе они подбирались из условия лучшего совпадения с экспериментальными результатами).

На рис. 3 показана зависимость, которую дают формулы (1) и (2), и экспериментальные точки, согласованные с графиком при выбранных  $T_k = 25$  К и  $\dot{\varepsilon}_h = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Точка, обозначенная  $a$ , определена из данных с фиксированной скоростью нагружения (рис. 1,  $d$ ), причем скорость деформации рассчитывалась следующим образом:  $\dot{\varepsilon} = (d\sigma/dt) : (d\sigma/d\varepsilon)$ , величина  $d\sigma/d\varepsilon = 0.16$  МПа взята из сглаженной кривой деформации при 4.2 К, а  $d\sigma/dt$  — скорость нагружения. Несмотря на то что некоторые точки лежат вне области, предсказанной теорией, но достаточно близко к ней, совпадение эксперимента и теории можно считать удовлетворительным, особенно если учитывать некоторую условность средней величины макроскопической скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  для явно неоднородной деформации, которая имеет место при низких температурах.

Пограничные области следует рассматривать отдельно. В них диаграммы растяжения являются квазиустойчивыми: деформация может развиваться равномерно, без срывов, но эта равномерность может быть легко нарушена. Достаточно изменения условий отработки сигнала в цепи обратной связи испытательной машины для того, чтобы произошел срыв нагрузки, причем, как правило, более глубокий, чем в области регулярных скачков (рис. 1,  $f$ ). На рис. 3 эта область условно выделена прямоугольником.

### 3. Геометрия скачкообразной деформации и разрушение

Выше отмечалось, что на поверхности плоского образца видны полосы деформации, которые располагались под углом 50–55° к оси образца. Иногда можно было видеть два семейства почти параллельных полос, симметричных относительно оси образца (рис. 2). Плоскость разрушения располагались вдоль одной из таких полос. Заметим, что сказанное относится только к испытаниям при гелиевых температурах. В аналогичных испытаниях при комнатной и азотной температурах плоскость разрушения была перпендикулярна оси образца, не было и наклонных полос деформации. Разрушение и локализация

деформации в плоскости, расположенной под углом 55°, при растяжении наблюдались ранее во многих случаях, в том числе и не только при гелиевых температурах. Так, при растяжении тонких плоских образцов из холоднокатаной углеродистой стали и алюминиевого сплава в области нестабильной деформации при комнатной температуре наблюдались наклонные полосы деформации и плоскость разрушения [8]). Существуют различные варианты объяснения локализации деформации и разрушения по наклонным плоскостям. Например, если найти направление, вдоль которого нормальная составляющая деформации равна нулю, то при трех главных деформациях  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon/2$  и  $-\varepsilon/2$  получим

$$\varepsilon \left( \cos^2 \theta - 1/2 - \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) = (3 \cos 2\theta - 1)/4 = 0,$$

где  $\theta$  — угол между нормалью к площадке и осью образца. Отсюда  $\cos 2\theta = 1/3$  и  $\theta = 35^\circ$ , т.е. площадка наклонена к оси образца под углом 55°.

Тот же результат получится, если исходить из условия минимума потенциальной энергии деформации или (что равнозначно) использовать деформационный критерий, согласно которому критические условия пластического течения определяются октаэдрическими касательными напряжениями, пропорциональными второму инварианту тензора напряжений.

Другим случаем разрушения и локализации деформации по наклонным плоскостям являются испытания при больших скоростях растяжения [9]. При этом причиной разрушения и сдвиговой деформации по плоскостям октаэдра считают адиабатический характер деформации и разрушения вследствие высокой скорости нагружения. При низких температурах деформация также развивается адиабатически [3,4], но по другой причине (низкая теплоемкость материала и малая скорость отвода тепла от поверхности образца в окружающую среду), что приводит к аналогичным макроскопическим проявлениям.

Как уже отмечалось, низкотемпературная локализация деформации не является кристаллографической в масштабе образца как целого, но, очевидно, в каждом отдельном зерне поликристаллического образца, расположенного в зоне локализованной деформации, сохраняются свойства скольжения дислокаций (или двойникования) по вполне определенным для данной структуры плоскостям. Разворот же зерен приводит к размытию границ области локализованной деформации, ее уширению, делает плавным переход от деформированной к недеформированной зоне. Другим и, вероятно, более существенным фактором, способствующим размытию и уширению области локализованной деформации, является плавное изменение температуры от центра области к ее периферии. Это отлучает макромасштабную некристаллографическую локализацию от описанной в [10,11] для монокристаллов LiF при повышенных температурах. Однако результаты, полученные в [10,11], могут быть использованы в качестве модели внутризеренной дефор-

магии при низких температурах. Естественно, при этом следует учитывать специфические низкотемпературные тепловые эффекты.

Что касается разрушения, то в [10] было показано, что магистральная трещина развивается по границе локализованного сдвига, несмотря на то что образующаяся поверхность разрушения явно больше сечения, перпендикулярного оси образца, и, следовательно, такое разрушение не является энергетически выгодным. В случае гелиевых температур разрушение идет по наклонной плоскости в самой узкой (деформированной) части — ”наклонной шейке” — и тоже невыгодно энергетически. Здесь наиболее правдоподобными его моделями представляются те, которые связывают рост магистральной трещины либо с поглощением ею микротрещин, возникших вблизи ее вершины в результате пластической деформации, либо с разрушением перетяжек между соседними трещинами. Очевидно, что при этом разрушение идет по той области, в которой предшествующая деформация была наиболее интенсивной. Подобные представления широко используются при описании разрушения при умеренных и повышенных температурах [12].

Авторы выражают благодарность Б.И.Смирнову и Г.А.Мальгину за обсуждение результатов работы.

## Список литературы

- [1] D.A. Wigley. Mechanical Properties of Materials at Low Temperatures. Plenum Press. N.Y.–London (1971). 373 p.
- [2] R.P. Reed, C.N. McCovan, N.J. Simon, J.D. McColsky. Advances in Cryogenic Engineering. Materials. Plenum Press, N.Y.–London (1991). V. 38A. P. 19.
- [3] В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. Металлургия, М. (1975). 328 с.
- [4] Г.А. Мальгин. ФММ **81**, 3, 5 (1996).
- [5] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, В.А. Степанов. ФТТ **26**, 8, 2387 (1984).
- [6] Г.А. Мальгин. ФММ **63**, 5, 864 (1987).
- [7] S.N. Komnik, V.V. Demirski. Cryst. Res. & Technol. **19**, 6, 863 (1984).
- [8] A. Nadai. Theory of Flow and Fracture of Solids. McGraw-Hill, N.Y.T.–London (1950). V. 1. 647 p.
- [9] J.S. Rinehart, J. Pearson. Behavior of Metals under Impulsive Loads. ASM, Cleveland, Ohio (1954). 296 p.
- [10] Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, В.А. Степанов, В.А. Шпейзман. Пробл. прочности, 3, 68 (1982).
- [11] Б.И. Смирнов, Р.С. Чуднова, В.В. Шпейзман. ФТТ **34**, 6, 1759 (1992).
- [12] Я.Б. Фридман. Испытания деталей машин на прочность. Машгиз, М. (1960). 247 с.