

Особенности шейкообразования при низкотемпературной прерывистой текучести металлов. Сообщение 1. Осесимметричная деформация

Е. В. Воробьев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

В связи с задачей определения достоверных значений механических характеристик металлических материалов при температурах ниже 30 К исследованы особенности многократного шейкообразования на цилиндрических образцах конструкционных сплавов криогенной техники при проявлении эффекта низкотемпературной прерывистой текучести. Выполненная оценка жесткости и неоднородности объемного напряженного состояния типичных шеек показала, что оно незначительно отличается от линейного, и использование таких образцов для стандартных механических испытаний в условиях глубокого охлаждения правомерно.

Ключевые слова: низкотемпературная прерывистая текучесть, образец, шейка, система напряжений, жесткость напряженного состояния, механические характеристики, стандартный метод испытаний металлов на растяжение.

Полагают, что образование шейки при растяжении образца происходит в результате только механической неустойчивости процесса, а не физических изменений в природе деформации, которые могут только зародиться и являться не причиной, а следствием [1], причем потеря устойчивости пластической деформации наступает при превышении интенсивностью геометрического разупрочнения образца интенсивности деформационного упрочнения материала. Соответственно перераспределяется вклад равномерной и локальной деформации в общее формоизменение образца. Однако в условиях охлаждения до температур ниже 30 К причиной шейкообразования является качественное изменение характера деформирования металлов – переход от непрерывной однородной деформации к адиабатической скачкообразной и локализованной в связи с проявлением эффекта низкотемпературной прерывистой текучести (ПТ). В этих условиях образование шеек, которые будем называть адиабатическими, – следствие именно физических изменений в природе пластической деформации, связанных с переходом от ее обычных механизмов (скольжение) к механизмам, реализация которых обусловлена дискретными пробоями барьеров мощными дислокационными скоплениями, дополняющимися термоактивированным движением дислокаций с локализацией тепловой энергии и деформации в ходе катастрофического течения [2, 3]. В данном случае также можно говорить о потере устойчивости процесса пластического деформирования, но иного рода, учитывая реализацию эффекта ПТ и, в частности, завершение стадии однородной деформации и появление первых скачков [4].

Изменение механизма деформирования обуславливает ряд существенных особенностей шейкообразования при низкотемпературной ПТ, основные из которых следующие:

образуется не одна, а множество шеек, число которых соответствует числу скачков деформации;

шейкообразование начинается не в верхней точке диаграммы растяжения, а на более ранних стадиях, в том числе непосредственно за пределом текучести;

процесс локализации деформации происходит скачкообразно, его длительность имеет порядок $10^{-4} \dots 10^{-2}$ с, а не 1...10 с;

шейкообразование происходит не в изотермических или близких к ним условиях, а в адиабатических и сопровождается скачком температуры, достигающим 200 К;

процесс локализации деформации не усиливается, смещаясь к наименьшему сечению, а прекращается с завершением скачка, и напряженно-деформированное состояние данной шейки “замораживается”;

материал в шейке не получает значительной поврежденности и анизотропии, а вплоть до разрушения остается относительно малоповрежденным, за исключением последней шейки.

Шейка является очевидным признаком неоднородности (локализации) деформации. При этом, независимо от механизма ее образования, реализуется объемное неоднородное напряженное состояние, причем радиальные растягивающие напряжения могут достигать значительных величин. В то же время сохранение однородности деформации и напряжения – одно из важных условий получения надежных экспериментальных данных. Поэтому при испытании материалов возникает вопрос о достоверности некоторых механических характеристик (предел прочности, относительное удлинение и относительное сужение образца после разрыва), получаемых в условиях реализации эффекта ПТ. Цель данной работы заключается в оценке степени жесткости и неоднородности напряженного состояния стандартных образцов, его отличия от линейного и выработке соответствующих рекомендаций по усовершенствованию и использованию метода испытаний металлов на растяжение [5].

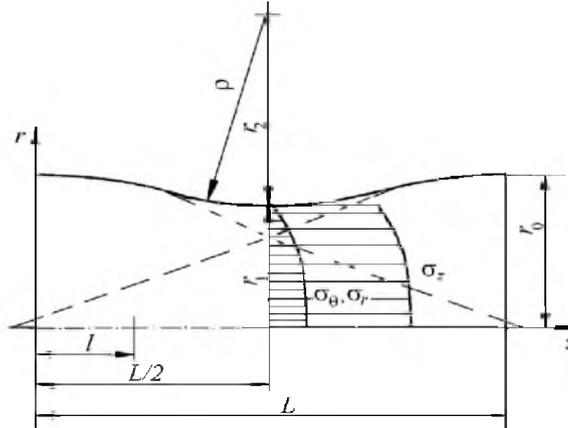
Напряжения рассчитываем по методу Бриджмена [6], согласно которому осевые напряжения в наименьшем сечении шейки с геометрическими параметрами r_0 , r_1 , r_2 (рисунок) представлены в виде суммы двух систем – постоянной компоненты осевого напряжения:

$$\sigma_c = k_c \sigma_t \quad (1)$$

(σ_t – истинное напряжение, $\sigma_t = P/\pi r_1^2$; $k_c = 1/[(1 + 2r_2/r_1) \ln(1 + r_1/2r_2)]$) и переменной – гидростатического растягивающего напряжения:

$$\sigma_h(r) = \sigma_c \ln[(r_1^2 + 2r_1r_2 - r^2)/(2r_1r_2)], \quad (2)$$

достигающего максимального значения σ_{h_0} на оси образца ($r = 0$). Вторая система определяет также величины радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений. Схема распределения напряжений в наименьшем сечении шейки показана на рисунке.



Геометрические параметры шейки цилиндрического образца и схема распределения напряжений в ее наименьшем сечении.

В центральной точке шейки действуют следующие главные напряжения: $\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_{h_0}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{h_0}$ или в соответствии с (2):

$$\sigma_1 = \sigma_c [1 + \ln(1 + r_1/2r_2)]; \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c \ln(1 + r_1/2r_2). \quad (4)$$

Принимая в качестве условия эквивалентности соотношение Мизеса

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (5)$$

получаем $\sigma_e = \sigma_c$.

Из (1) следует, что $\sigma_e < \sigma_t$, т.е. шейка как своеобразный концентратор напряжений оказывает упрочняющее воздействие. “Упрочнение формы” в относительном выражении составляет

$$\eta_s = (\sigma_t - \sigma_e)/\sigma_t = 1 - k_c. \quad (6)$$

Жесткость напряженного состояния характеризуется параметром $k_r = \sigma_m/\sigma_i$, где $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – среднее напряжение; σ_i – интенсивность напряжений, $\sigma_i = \sigma_e = \sigma_c$. Для центральной точки, где напряженное состояние наиболее жесткое, с использованием (1), (3), (4) имеем

$$k_r = \frac{1}{3} + \ln(1 + r_1/2r_2), \quad (7)$$

где второе слагаемое показывает величину отклонения напряженного состояния в этой точке от линейного ($\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), для которого $k_r = \frac{1}{3}$.

Отметим, что с помощью такой характеристики, как параметр Лодена-Надаи $\chi_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$, в данном случае нельзя определить, как напряженное состояние отличается от одноосного растяжения, $\chi_\sigma = -1$, поскольку она характеризует только вид девиатора напряжений и не учитывает влияние компонентов напряжений, связанных с изменением объема.

Решение Бриджмена [6] для шейки хорошо описывает напряженное состояние и цилиндрических образцов с “мягкими” надрезами [7]. Рассматривая шейку как концентратор напряжений, распределение осевых напряжений σ_z вдоль оси r (рисунок) можно охарактеризовать градиентом напряжений и коэффициентом концентрации. Последний определяется как $K_t = \sigma_1/\sigma_t$ или с учетом (3) – $K_t = k_c [1 + \ln(1 + r_1/2r_2)]$. Поскольку $\sigma_z(r) = \sigma_c + \sigma_h(r)$, градиент напряжений выражается в виде

$$\frac{d\sigma_z}{dr} = -\frac{2\sigma_c r}{r_1^2 + 2r_1 r_2 - r^2}.$$

Величиной, характеризующей степень неоднородности напряженного состояния, является относительный градиент напряжений $\eta_\sigma = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dr}$, который для осевых напряжений можно представить следующим образом:

$$\eta_\sigma = -2r \left[(r_1^2 + 2r_1 r_2 - r^2) \left(1 + \ln \frac{r_1^2 + 2r_1 r_2 - r^2}{2r_1 r_2} \right) \right]^{-1}.$$

Он изменяется от нуля на продольной оси образца до величины, равной кривизне образующей шейки на его поверхности, $\eta_\sigma = -1/r_2$. Соответственно $d\sigma_z/dr$ изменяется от 0 до $-\sigma_c/r_2$.

Для экспериментального исследования шейкообразования при низкотемпературной ПТ использовали стандартные пятикратные цилиндрические (диаметр 3 мм) образцы аустенитных сталей 03Х20Н16АГ6, 12Х18Н10Т и титановых сплавов 3М и ВТ5-1. Указанные материалы используются в криогенной технике, эксплуатируемой при температурах, близких к абсолютному нулю. Образцы испытывали на статическое растяжение согласно требованиям [5] на установке УМН-10 [8] в среде жидкого гелия при температуре 4,2 К. Жесткость системы нагружения, не регламентируемая стандартом [5], составляла 14,5 МН/м.

Как показывают измерения, наиболее выраженные шейки с наименьшей площадью сечения наблюдаются у образцов стали 03Х20Н16АГ6, а самая рельефная шейка, в которой происходит разрушение, соответствует последнему скачку, что согласуется с результатами [9]. Интенсификации локализации деформации на последнем скачке способствует накопившееся именно в этой шейке деформационное повреждение материала, так как его влияние качественно аналогично температурному разупрочнению [10].

Геометрические параметры r_0 и r_1 определяли путем непосредственного измерения, r_2 – по зависимости $r_1/r_2 = f(\varepsilon)$ [6], где ε – осевая логарифмическая деформация,

$$\varepsilon = \ln(r_0^2/r_1^2). \quad (8)$$

При $\varepsilon \leq 1$ соотношение радиусов можно представить в виде $r_1/r_2 = 0,75\varepsilon$. Параметры напряженного состояния рассчитывали для трех типов шеек образцов стали 03Х20Н16АГ6:

- 1) обычная шейка, соответствующая стадии развитой ПТ;
- 2) шейка, в которой произошло квазихрупкое разрушение;
- 3) шейка, в которой произошло разрушение по механизму адиабатического сдвига, т.е. в процессе скачка [11].

Результаты расчетов представлены в таблице.

Геометрические параметры и характеристики напряженного состояния в шейке цилиндрических образцов стали 03Х20Н16АГ6

Тип шейки	r_0 , мм	r_1 , мм	k_r	K_t	η_s	η_σ , мм ⁻¹
1	1,34	1,21	$\frac{1}{3} + 0,062$	1,032	0,033	0,116
2	1,29	1,10	$\frac{1}{3} + 0,113$	1,047	0,057	0,217
3	1,23	0,95	$\frac{1}{3} + 0,177$	1,08	0,082	0,406

При расчетах с использованием классического решения [12] для данных соотношений $r_1/r_2 \leq 0,38$ получены практически те же результаты с пренебрежимо малыми отклонениями параметров напряженного состояния от приведенных в таблице.

Отметим, что в целом методы [6, 12] дают достаточно точную оценку распределения напряжений при $r_1/r_2 \leq 0,77$ и только при $r_1/r_2 \geq 1$ получают существенно заниженные значения [13].

С использованием уравнения (8) для шейки типа 1 получим $\varepsilon = 0,204$, что близко к полной логарифмической деформации $\varepsilon_a = \ln(1 + \delta)$, где δ – относительное удлинение образца после разрыва. Для цилиндрического образца стали 03Х20Н16АГ6, испытанного на растяжение в указанных выше условиях, имеем $\delta = 0,350$, $\varepsilon_a = 0,300$. Таким образом, $\varepsilon_a > \varepsilon$, что невозможно в случае полной локализации деформации при ее скачкообразном развитии, т.е. данное неравенство свидетельствует о наличии некоторого вклада равномерной деформации. Оценка этого вклада путем учета деформационного упрочнения показывает, что для стали 03Х20Н16АГ6 он достигает 30% общего удлинения образца при скачке [2]. Такая величина соответствует и оценке деформационным методом: полагая, что вклад равномерной деформации составляет $\varepsilon_h \approx 1 - \varepsilon_a/\varepsilon$, получаем $\varepsilon_h \approx 0,320$.

В общем случае для аналитического описания профиля шейки используют гиперболические, параболические, экспоненциальные и другие зависимости. Для обычной шейки характерно интенсивное развитие деформации в центральной области – контур шейки сопрягается с линиями, касательными к образующей в точках перегиба (рисунок). В то же время, как отмечалось

выше, при ПТ для шеек типа 1 такое усиление локализации неприсуще. Точки перегиба образующей такой шейки имеют координаты $l_1 \approx \frac{1}{4}L$ и $l_2 \approx \frac{3}{4}L$ (рисунок), поэтому ее профиль может быть описан функцией вида

$$y(l) = \frac{r_0 + r_1}{2} + \frac{r_0 - r_1}{2} \cos \frac{2\pi l}{L}, \quad (9)$$

отвечающей данному условию.

Кривизна образующей определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y''}{[1 + (y')^2]^{3/2}},$$

согласно которой для функции (9) при $l = L/2$ получим

$$\frac{1}{r_2} = 2\pi^2 \frac{r_0 - r_1}{L^2}.$$

Для шейки типа 1 расчетное значение кривизны составляет $1/r_{2p} = 0,13 \text{ мм}^{-1}$, что близко к значению, полученному из приведенной эмпирической зависимости $r_1/r_2 = f(\varepsilon)$ [6].

Анализ результатов показывает, что шейкообразование по типу 1, сопровождающее весь процесс низкотемпературной ПТ, за исключением последнего скачка, не приводит к существенному отклонению напряженного состояния образца от линейного. И только на заключительном этапе деформирования, который предшествует или сопутствует разрушению, появляется шейка, особенно типа 3, в которой действуют значительные растягивающие радиальные напряжения. При этом реализуется объемное напряженное состояние с коэффициентом жесткости до $k_r \approx 0,5$ (таблица).

Однако появление и развитие адиабатической шейки типа 3, как и "обычной", при более высоких температурах уже не оказывает значительного влияния на механические характеристики материала. Так, на последнем скачке (в случае квазихрупкого разрушения при последующем упругом нагружении [11]), т.е. в процессе образования шейки типа 2, удлинение образца Δl составляет 0,42 мм, и величины δ и ε_a без учета этого прироста соответственно равны 0,325 и 0,281. Нагрузка, соответствующая началу последнего скачка, как правило, практически не превышает или меньше таковой для предпоследнего скачка, поэтому предел прочности не изменяется. И лишь величина относительного сужения образца после разрыва ψ полностью определяется по последней шейке. Однако эта характеристика не является в данном случае достаточно информативной, поскольку существенно зависит от характера разрушения образца: квазихрупкого или путем адиабатического сдвига. Так, для шеек типа 2 и 3 величина ψ соответственно составляет 0,257 и 0,329. Вероятность разрушения по

механизму адиабатического сдвига увеличивается с уменьшением жесткости системы нагружения [11].

Поэтому использование цилиндрических образцов для определения механических характеристик при стандартных механических испытаниях, несмотря на появление многочисленных шеек, следует признать правомерным и в условиях глубокого охлаждения.

Резюме

У зв'язку із задачею визначення достовірних величин механічних характеристик металевих матеріалів за температур нижче 30 К досліджено особливості багаторазового шийкоутворення на циліндричних зразках конструкційних сплавів криогенної техніки при реалізації ефекту низькотемпературної переривчастої текучості. Виконана оцінка жорсткості та неоднорідності об'ємного напруженого стану типових шийок показала, що він несуттєво відрізняється від лінійного, і використання таких зразків для стандартних механічних випробувань в умовах глибокого охолодження є правомірним.

1. Давиденков Н. Н. О природе шейки при растяжении образцов // Журн. техн. физики. – 1955. – 25, № 5. – С. 125 – 128.
2. Диденко Д. А. О механизме низкотемпературной скачкообразной деформации алюминия // Физические процессы пластической деформации при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1974. – С. 129 – 138.
3. Воробьев Е. В., Анпилогова Т. В. Особенности проявления эффекта низкотемпературной скачкообразной деформации металлов // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. – 26. – С. 166 – 172.
4. Vorob'ev Ye. New types of limit states of structural alloys related to the realization of the low-temperature discontinuous yielding effect // *Mechanika*. – 2006. – No. 1 (57). – P. 17 – 21.
5. ГОСТ 22706-77. Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°C. – Введ. 01.09.88.
6. Bridgman P. W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. – New York; Toronto; London: McGraw-Hill, 1952. – 424 p.
7. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 351 с.
8. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
9. Гордыцкий Н. И., Новиков Н. В., Стасюк С. З. Некоторые закономерности прерывистого течения металла при растяжении образцов из конструкционных материалов в жидком гелии // Пробл. прочности. – 1976. – № 6. – С. 69 – 71.
10. Степанов Г. В. Локализация деформации сдвига в металле при динамическом нагружении // Пробл. прочности. – 1995. – № 8. – С. 52 – 59.

11. *Воробьев Е. В.* О влиянии жесткости системы нагружения на сопротивление деформированию и разрушению образцов сплавов при глубоком охлаждении // Там же. – 2001. – № 1. – С. 98 – 104.
12. *Давиденков Н. Н., Спиридонова Н. И.* Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Завод. лаб. – 1945. – **11**, № 6. – С. 583 – 593.
13. *Резников В. И., Сегал В. М.* Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния в шейке цилиндрического образца при растяжении // Пробл. прочности. – 1980. – № 1. – С. 78 – 81.

Поступила 15. 03. 2007