

Влияние геометрии образцов на характеристики прочности и пластичности сталей при глубоком охлаждении

Е. В. Воробьев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты исследования деформативности и прочности конических и трубчатых образцов из сталей 03X20H16AG6 и 12X18H10T при одноосном растяжении в интервале температур 293...4,2 К. Показано, что деформационная способность указанных сталей зависит от геометрии испытываемых объектов, причем характер зависимости определяется уровнем температуры испытаний и классом стали. При температуре 4,2 К в связи с качественным изменением механизмов деформирования влияние конструктивных факторов также существенно изменяется. Наблюдается резкое снижение показателей пластичности для обоих видов образцов и значительное упрочнение тонкостенных трубчатых образцов из стали 03X20H16AG6.

Ключевые слова: прерывистая текучесть, скачок деформации, удлинение, деформационная способность, конусность, масштабный фактор, упрочнение.

Как известно, при охлаждении металлических материалов до температуры 20 К и ниже происходит качественное изменение механизмов деформирования – переход от однородного накопления деформации к дискретному локализованному и неизотермическому вследствие проявления эффекта низкотемпературной прерывистой текучести [1–3]. В этом случае механические характеристики материалов, определяемые при испытаниях стандартных образцов*, могут быть недостаточно адекватны прочностным и деформационным свойствам деталей даже простой формы (например, стержневые осесимметричные элементы).

В настоящем сообщении представлены новые результаты исследования влияния некоторых конструктивных особенностей образцов на указанные свойства, а также на параметры прерывистой текучести применительно к сплавам криогенной техники.

Материалы и методики. Объектом экспериментального исследования служили типичные материалы криогенного назначения – аустенитные стали 03X20H16AG6 и 12X18H10T. Исходные данные получены на стандартных пятикратных образцах с диаметром рабочей части 3 мм. Испытаниям подвергали образцы, отличающиеся наличием малой конусности (далее – конические) с углом α образующей относительно продольной оси z , равным 1° . Наибольший диаметр и длина рабочей части образцов составляли соответственно 3 и 15 мм. Также испытывали трубчатые образцы с внешним диаметром рабочего участка 3; 5,5 и 6 мм и отношением толщины стенки к наружному диаметру 0,09...0,5. При этом отклонение величин площади их поперечного сечения от исходной не превышало 40%, что практически исключало влияние масштабного фактора.

* Образец для испытаний на растяжение можно рассматривать как простейший конструкционный элемент, характеристики предельных состояний которого отождествляются с характеристиками прочности и пластичности материала.

Испытания на одноосное растяжение проводили на установке УМН-10 [3] при температуре 293, 77 и 4,2 К соответственно на воздухе, в среде жидкого азота и жидкого гелия. Скорость деформирования составляла $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, жесткость системы образец–машина – 12 МН/м.

Результаты и их обсуждение. Испытания показали, что диаграммы растяжения образцов различных видов из стали 03Х20Н16АГ6 качественно не отличаются. Для стали 12Х18Н10Т характерны следующие особенности: при температуре выше 20 К имеют место зуб и площадка текучести, которая у конических образцов преобразуется в длинную наклонную прямую. В условиях глубокого охлаждения площадка текучести становится зубчатой с равной амплитудой скачков, для конических образцов этот участок наклонный, причем относительная длина его на 80% больше, чем у цилиндрических. Отметим, что подобный вид имеют диаграммы растяжения цилиндрических образцов, предварительно подвергнутых деформированию кручением. Указанные отличия могут быть связаны с мартенситными превращениями этой стали.

По результатам испытаний проводилось сопоставление характеристик прочности и деформативности стандартных и нестандартных образцов. Поскольку напряженное состояние последних в процессе нагружения также оставалось линейным или близким к нему, определяли параметры, формально соответствующие стандартным пределам текучести (только на трубчатых образцах), прочности и относительному удлинению.

Пределы прочности конических образцов не отличаются от исходных значений, а условное относительное удлинение после разрыва $\delta' = \Delta l/L$ (Δl – удлинение; L – длина рабочей части образца) с понижением температуры для стали 03Х20Н16АГ6 уменьшается, а для стали 12Х18Н10Т немонотонно увеличивается (рис. 1,а), что примерно соответствует температурной зависимости относительного удлинения δ исходных образцов. При этом $\delta' < \delta$, отношение δ'/δ для стали 03Х20Н16АГ6 уменьшается, а для стали 12Х18Н10Т увеличивается.

Напряженно-деформированное состояние конических образцов при растяжении является неоднородным по длине, и величина напряжения в сечении, отстоящем от наименьшего на расстоянии l , составляет

$$\sigma_z \approx \sigma_0 / \left(1 + \frac{2l \operatorname{tg} \alpha}{r_0} \right), \quad (1)$$

где σ_0 и r_0 – соответственно напряжение и радиус в наименьшем сечении.

Степень неоднородности напряженного состояния по длине характеризуется относительным градиентом напряжений $\eta_\sigma = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dl}$ [4], который с учетом (1) описывается зависимостью

$$\eta_\sigma = -2 \operatorname{tg} \alpha / (r_0 + 2l \operatorname{tg} \alpha).$$

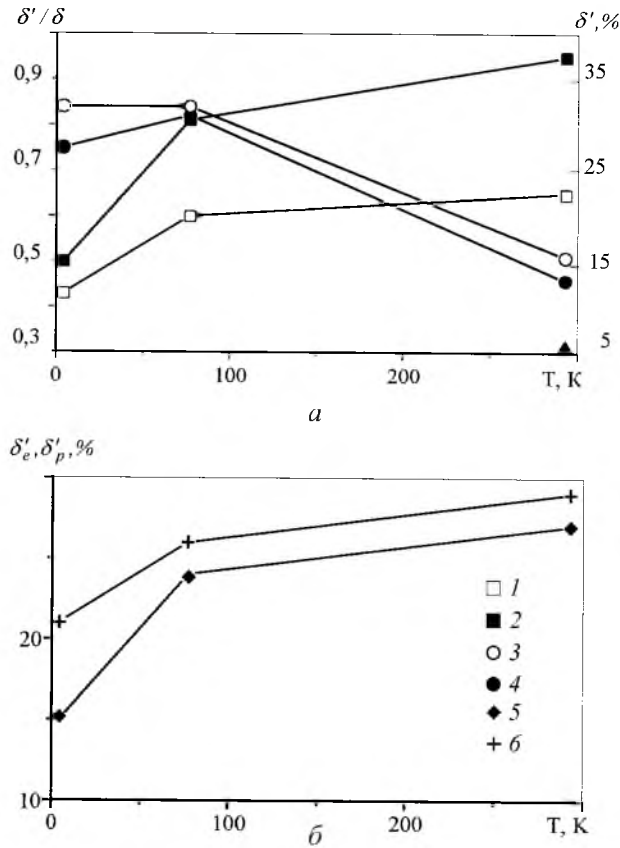


Рис. 1. Температурные зависимости удлинения конических образцов из сталей 03Х20Н16АГ6 (1, 2) и 12Х18Н10Т (3, 4) в оценках δ'/δ (1, 3) и δ' (2, 4) – а, а также экспериментальные (5) и расчетные (6) зависимости удлинения конических образцов из стали 03Х20Н16АГ6 до момента образования шейки – б.

Средняя величина этой характеристики для используемых образцов весьма мала, $\eta_\sigma = -2,4 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-1}$.

Для теоретической оценки удлинения конического стержня примем следующие допущения: пластическое течение, как и последующее разрушение, начинается в наименьшем сечении; его началу соответствует предел текучести σ_T , началу образования шейки – истинное напряжение $\bar{\sigma}_b$, соответствующее пределу прочности материала σ_B ; до появления шейки сохраняется распределение напряжений (1); упрочнение материала описывается уравнением Людвига

$$\sigma_z = a \varepsilon_z^n, \quad (2)$$

где ε_z – деформация; a, n – постоянные.

Тогда расчетную величину удлинения до образования шейки $\Delta l_p = \int_0^L \varepsilon_z dl$ можно представить в виде

$$\Delta l_p = \int_0^L (\sigma_z/a)^{1/n} dl. \quad (3)$$

Поскольку при аппроксимации диаграммы растяжения степенной зависимостью (2) максимальная истинная деформация ε_b на момент потери устойчивости процесса пластического деформирования, когда нагрузка P максимальна и $dP = 0$, достигает величины n [5], с использованием уравнения (1) при $\sigma_0 = \bar{\sigma}_b$ из (3) получаем расчетную величину относительного удлинения:

$$\delta'_p = \frac{1}{L} \frac{n[(1 + kL)^{1-1/n} - 1]}{k(1 - 1/n)}. \quad (4)$$

Здесь $k = 2 \operatorname{tg} \alpha / r_0$ и проведена замена $(\bar{\sigma}_b/a)^{1/n} = n$, что следует из (2) при $\sigma_z = \bar{\sigma}_b$ и $\varepsilon_z = \varepsilon_b = n$.

Заметим, что деформируемый участок длиной L_p , на котором $\sigma_z(0) = \bar{\sigma}_b$ и $\sigma_z(L_p) = \sigma_T$, может быть меньше (теоретически – больше) реальной конечной длины рабочего участка образца $L_k = L + \Delta l$. С помощью указанных граничных условий из (1) получим $L_p = (\bar{\sigma}_b/\sigma_T - 1)/k$.

Как видно из формулы (4), удлинение δ'_p существенно зависит как от показателя упрочнения, так и (в отличие от цилиндрических образцов) от размеров, а именно: радиуса начального сечения и длины рабочей части. В предельных случаях, когда $r_0 \rightarrow 0$ или $L \rightarrow \infty$, получаем $\delta'_p \rightarrow 0$, при $r_0 \rightarrow \infty$ или $L \rightarrow 0$ – $\delta'_p \rightarrow n$. При $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow \infty$ имеем $\delta'_p \rightarrow 0$, при $\alpha \rightarrow 0$ получаем цилиндрический образец, и $\delta'_p = \varepsilon_b = n$. Таким образом, влияние размеров вызывает изменение δ'_p от 0 до n . При отсутствии упрочнения, когда $n \rightarrow 0$, из (4) получим $\delta'_p \rightarrow 0$.

Среди исследуемых материалов степенная зависимость (2) достаточно точно описывает диаграмму деформирования лишь стабильно аустенитной стали 03X20H16AG6, которая, в отличие от стали 12X18H10T, характеризуется протяженным участком упрочнения без площадки текучести. Поэтому проверка применимости зависимости (4) путем сравнения расчетных δ'_p и экспериментальных δ'_e значений удлинения при различных температурах проведена для образцов из этой стали (рис. 1,б). Здесь величины δ'_e , как и δ'_p , соответствуют удлинению лишь до начала образования шейки. Значения n получены из диаграмм деформирования цилиндрических образцов: $n = \varepsilon_b$. Расхождение между температурными зависимостями 1 и 2 (рис. 1,б) сравнительно невелико при температурах 293 и 77 К, однако при 4,2 К оно достигает 40%. Это объясняется тем, что показатель упрочнения n не является постоянным – он несколько отличается на начальном и последующем участках кривой растяжения [5]. Для стали 03X20H16AG6 изменение величины n имеет место при деформации около 7% [6]. Однако при температуре менее 20 К, когда деформация становится скачкообразной, положенная в основу (4) зависимость (2) – довольно грубое приближение и может использоваться лишь условно. А именно: адекватность этой модели процесса деформирования может быть частично восстановлена путем заме-

ны пилообразной диаграммы огибающей кривой. Тогда из уравнения (4) можно сделать правильные качественные и приемлемые в первом приближении количественные выводы.

Остановимся на особенностях деформирования конических образцов при температуре жидкого гелия. Снижение удлинения образцов из стали 03Х20Н16АГ6 при охлаждении до 4,2 К сопровождается уменьшением числа скачков деформации N'/N (по отношению к стандартным образцам), которое составляет 0,54. В то же время для стали 12Х18Н10Т этот показатель существенно выше (0,73). Корреляция между удлинением и числом скачков во всех случаях является очевидным следствием реализации механизма скачкообразного накопления деформации. В отличие от цилиндрических образцов, образующаяся при каждом скачке деформации шейка располагается не хаотично, а непосредственно за предыдущей, последовательно охватывая всю рабочую часть. Такое развитие локализованной деформации приводит к интенсивному увеличению амплитуды скачков нагрузки и деформаций и более крутому подъему огибающей пиков диаграммы деформирования.

Испытания трубчатых образцов показали, что снижение их деформативности в оценке δ'_T/δ (δ'_T – условное относительное удлинение трубчатого образца) наблюдается при всех температурах испытаний и тем большее, чем меньше отношение толщины стенки к радиусу образца (рис. 2), что в условиях прерывистой текучести сопровождается соответствующим уменьшением числа скачков деформации. Для стали 12Х18Н10Т зависимости δ'_T/δ от Δ/R качественно подобны, но при охлаждении ее пластичность значительно увеличивается.

Если для стали 12Х18Н10Т наблюдается лишь небольшое изменение пределов текучести, то для стали 03Х20Н16АГ6 с уменьшением толщины стенки образца и с понижением температуры имеет место весьма существенное упрочнение – разность условных пределов текучести, полученных на трубчатых ($\sigma'_{0,2}$) и сплошных ($\sigma_{0,2}$) образцах, достигает 440 МПа (рис. 2). При этом пределы прочности практически не отличаются.

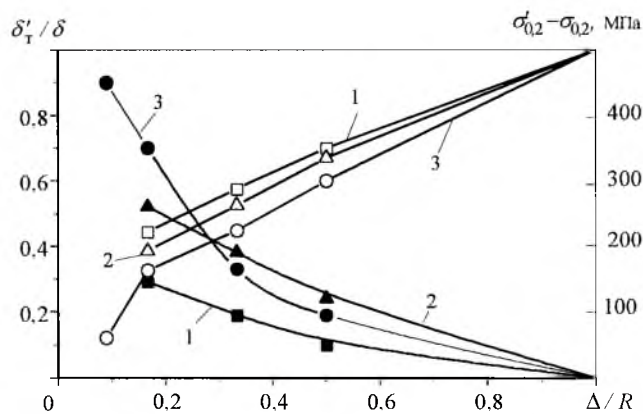


Рис. 2. Зависимости характеристик пластичности (светлые точки) и упрочнения (темные точки) трубчатых образцов из стали 03Х20Н16АГ6 от толщины стенки при температуре 293 (1), 77 (2) и 4,2 К (3).

Таким образом, деформационная и несущая способность даже простых осесимметричных стержневых элементов в условиях линейного напряженного состояния существенно зависит от конструктивных факторов, причем при криогенных температурах с переходом к скачкообразному деформированию такая зависимость усиливается. При охлаждении до 4,2 К наблюдается резкое снижение пластичности исследуемых конструкционных элементов и значительное упрочнение тонкостенных образцов из стали 03X20H16AG6. Получено аналитическое выражение, адекватно отражающее деформационную способность конического стержня в зависимости от геометрических факторов и показателя деформационного упрочнения материала.

Резюме

Наведено результати дослідження деформативності й міцності конічних та трубчастих зразків зі сталей 03X20H16AG6 і 12X18H10T при одновісному розтязі в інтервалі температур 293...4,2 К. Показано, що деформаційна здатність цих сталей залежить від геометрії випробуваних об'єктів, причому характер залежності визначається рівнем температури та класом сталі. За температури 4,2 К у зв'язку з якісною зміною механізмів деформування вплив конструктивних чинників також суттєво змінюється. Спостерігається різке зниження показників пластичності для обох видів зразків і значне зміцнення тонкостінних трубчастих зразків зі сталі 03X20H16AG6.

1. Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов при низких температурах. – М.: Металлургия, 1975. – 328 с.
2. Воробьев Е. В., Стрижало В. А. Развитие низкотемпературной скачкообразной деформации металлов и возможности ее устранения // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 41 – 52.
3. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
4. Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 267 с.
5. McClintock F. F. and Argon A. S. Mechanical Behavior of Materials. – Addison-Wesley Publishing Company, 1966. – P. 443.
6. Новиков Н. В., Городынский Н. И. Деформационное упрочнение хромоникелевых и хромомарганцевых сталей при низких температурах // Пробл. прочности. – 1979. – № 7. – С. 48 – 52.

Поступила 06. 06. 2001