

О достоверности определения механических характеристик материалов при низких температурах

Е. В. Воробьев

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

Исследованы эффекты, связанные с образцами и нагружающим устройством, при испытаниях металлов на растяжение в жестком режиме, в том числе в условиях криогенных температур до 4,2 К. Показано, как накопление потенциальной упругой энергии и ее последующая разрядка при развитии деформации образца влияют на кинетику процесса. Получены зависимости скорости от величины деформации и коэффициента жесткости (соотношения жесткостей образца и машины). Отмечается, что величины начальной и номинальной скоростей деформации в случае податливой машины могут различаться на порядок. Для получения близких для разных машин величин скоростей деформации на начальной стадии процесса предложена формула, которая позволяет рассчитать необходимую номинальную скорость. При температурах ниже 30 К влияние жесткости машины, размеров и формы образцов на получаемые характеристики резко усиливается, что требует специальных мер при проведении испытаний. Рассмотрен ряд международных и национальных стандартов. Показано, что в настоящее время состояние стандартизации испытаний металлов на растяжение является неудовлетворительным, а требования действующих нормативных документов – минимальными и не соответствующими темпам развития испытательной техники. Существенно повысить уровень достоверности получаемых механических характеристик позволили бы такие первоочередные меры, как ограничение податливости машин, сужение диапазона размеров образцов, наряду с нормированием коэффициента жесткости и обязательным выбором номинальной скорости деформации с учетом последнего.

Ключевые слова: жесткость, скорость деформации, масштабный эффект, криогенные температуры, стандартный метод.

Введение. Как известно, наиболее полная информация о механических свойствах материалов содержится в диаграммах деформирования образцов. Широкое распространение получили испытания на статическое растяжение, которые регламентируются многочисленными национальными и международными стандартами [1–5 и др.]. Этот метод испытаний весьма информативен – он позволяет получить около десяти различных характеристик: упругости; пластичности; прочности (ряд предельных напряжений); энергоемкости. На их основе решаются задачи обеспечения прочности и ресурса проектируемых конструкций. Однако практика и специальные исследования [6–17] показывают, что диаграммы растяжения и характеристики для одного и того же материала могут существенно различаться ввиду разной жесткости испытательных машин, формы и размеров образцов, скорости деформации.

Целью работы является анализ механизмов влияния указанных и других факторов на механические характеристики металлов и оценка возможностей его минимизации в рамках стандартных методик.

Природа и механизмы рассматриваемых эффектов. Очевидно, что накопление потенциальной энергии и последующая разрядка в процессе деформирования влияют на его кинетику. Можно показать, что при испытаниях материалов на растяжение скорость деформации образца определяется приближенной формулой

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_n}{l} (1 + \theta/K)^{-1}. \quad (1)$$

Здесь V_n – номинальная скорость перемещения подвижного захвата машины; l – длина рабочей части образца; θ – модуль деформационного упрочнения материала; K – приведенный модуль системы образец–машина, $K = (1/E + F/C_M l)^{-1} \approx C_M l/F$; E – модуль упругости; F – площадь поперечного сечения образца; C_M – жесткость машины.

Уравнение (1) преобразуем к виду

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_n \left(1 + k \frac{\theta}{E} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_n$ – номинальная скорость деформации, $\dot{\varepsilon}_n = V_n/l$; k – коэффициент жесткости системы, $k = C_0/C_M$; C_0 – жесткость образца.

Установить характер изменения скорости деформации в процессе растяжения и в зависимости от коэффициента жесткости можно с помощью следующей модели. Пусть полностью равновесная диаграмма деформирования образца в условных напряжениях и деформациях аппроксимируется функцией

$$\sigma = E\varepsilon - A\varepsilon^m, \quad (3)$$

где A – константа материала; m – показатель упрочнения, $m > 1$.

Вид такой диаграммы при $m = 1,5$ показан на рис. 1.

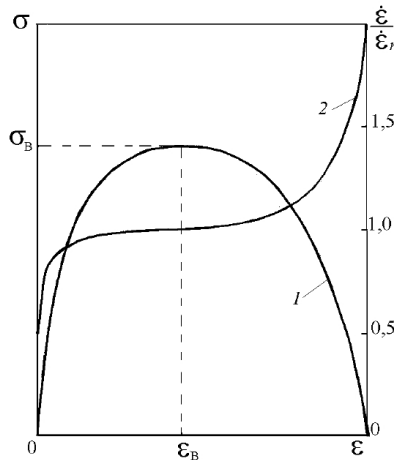


Рис. 1. График уравнения (3) как модельная диаграмма деформирования материала (1) и соответствующая зависимость скорости деформации при $m = 1,5$, $k = 1$ (2).

Подобная диаграмма (с ниспадающей до нулевой нагрузки ветвью) может быть получена на достаточно жестких машинах при условии

$$k \leq 1. \quad (4)$$

Скорость деформации определим в трех характерных точках диаграммы: начальной ($\varepsilon = \varepsilon_b = 0$, $\sigma = 0$); серединой, соответствующей максимуму напряжения ($\varepsilon = \varepsilon_B$, $\sigma = \sigma_B$), где σ_B – предел прочности; и конечной ($\varepsilon = \varepsilon_f$, $\sigma = 0$).

Для указанных точек диаграммы из уравнения (3) имеем

$$\varepsilon_b = 0; \quad \varepsilon_B = \left(\frac{E}{mA} \right)^{1/(m-1)}; \quad \varepsilon_f = \left(\frac{E}{A} \right)^{1/(m-1)},$$

а для модулей упрочнения $\theta = d\sigma/d\varepsilon -$

$$\theta_b = E; \quad \theta_B = 0; \quad \theta_f = (1-m)E.$$

Тогда из уравнения (2) следует

$$\frac{\dot{\varepsilon}_b}{\dot{\varepsilon}_n} = \frac{1}{1+k} \tag{5}$$

и

$$\frac{\dot{\varepsilon}_B}{\dot{\varepsilon}_n} = 1; \quad \frac{\dot{\varepsilon}_f}{\dot{\varepsilon}_n} = \frac{1}{1+(1-m)k}.$$

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что с увеличением коэффициента k , т.е. с уменьшением жесткости машины, начальная скорость снижается, срединная всегда равна номинальной, а конечная возрастает тем интенсивнее, чем больше показатель m .

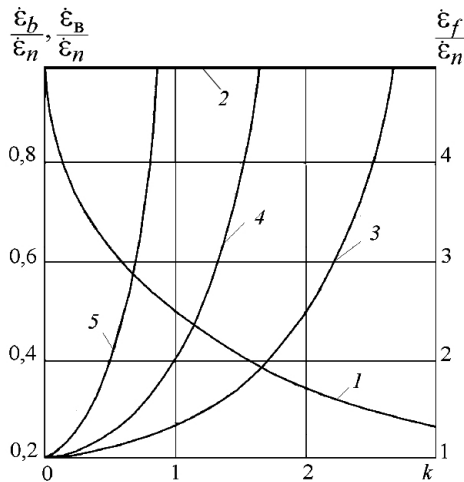


Рис. 2. Зависимости начальной (1), срединной (2) и конечной (3–5) скоростей деформации от коэффициента жесткости для различных значений m : 3 – $m = 1,1$; 4 – $m = 1,5$; 5 – $m = 2$.

Расчетное изменение скорости деформации (рис. 1) качественно соответствует экспериментальным результатам [8]. Начальная скорость в данном случае равна половине номинальной и зависит не от констант материала, а только от коэффициента жесткости системы.

Отношение начальной скорости деформации к номинальной при значениях $k = 1...4$ находится в диапазоне 0,5...0,2 (рис. 2).

Для очень податливой машины эти значения могут отличаться на порядок. Однако с развитием упругопластических деформаций начальная скорость приближается к номинальной (рис. 1). Поэтому, в отличие от верхнего, нижнего и условного пределов текучести, предел прочности практически не зависит от коэффициента жесткости.

Для получения близких значений скоростей на начальной стадии деформирования номинальные скорости можно выбирать с помощью уравнения (5) в виде

$$\dot{\varepsilon}_n = \dot{\varepsilon}_b (1+k), \tag{6}$$

где $\dot{\epsilon}_b$ – начальная скорость, принимаемая равной минимальной стандартной, в частности $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [2].

С началом спада нагрузки скорость деформации повышается. Величина $\dot{\epsilon}_f$, соответствующая полной разгрузке, может неограниченно возрастать в области асимптоты $k = (m-1)^{-1}$ (рис. 2). В действительности процесс демпфируется силами инерции и вязкого сопротивления. Однако на этапе, предшествующем разрушению, ускорение деформации увеличивается в результате ее локализации в образующейся шейке, разрыхления материала и появления трещин.

С уменьшением жесткости машины ниспадающая ветвь диаграммы $P-\Delta$ укорачивается и приподнимается, так как увеличивается сила скоростного сопротивления. Это влияет на характеристики пластичности. В работе [9] такая трансформация описана теоретически и показано, что относительное удлинение δ и относительное сужение ψ образцов после разрыва на очень податливой машине сильно уменьшаются (в рассмотренном примере в 1,7 и 2,2 раза соответственно). Экспериментальное подтверждение этих результатов содержится в работе [6]. По мере снижения жесткости машины (более чем в 70 раз) участок кривой растяжения образцов стали 30ХГСА справа от точки максимума уменьшается и распрямляется, и при $C_m = 0,75 \text{ МН/м}$ представляет собой очень короткую почти горизонтальную линию. Остановка привода податливой машины в точке P_{\max} дает старт “самопроизвольной” деформации образца.

Исследуемые механизмы действуют также, если изменять не C_m , а C_0 при использовании образцов различных размеров, т.е. масштабный эффект в кинетической и энергетической трактовках является лишь частным случаем эффекта жесткости. Однако необходимо учитывать и другие проявления масштабного эффекта, связанные со статистическим, структурным и технологическим факторами.

Влияние жесткости машины, а также размеров и формы образцов значительно усиливается при температурах ниже 30 К в связи с реализацией эффекта локализованной адиабатической скачкообразной деформации, или прерывистой текучести металлов. С уменьшением жесткости резко снижаются характеристики δ и σ_b , а в предельном случае разрушение образца происходит уже на первом спаде нагрузки [9]. Поскольку процесс отдельного скачка деформации очень скоротечен, внешнее нагружение практически отключается, и работа деформирования почти полностью обеспечивается запасом упругой энергии.

Действие кинетического механизма также весьма специфично – скорость скачкообразной деформации в зависимости от жесткости может достигать 20 с^{-1} [15]. При этом важное значение имеет номинальная скорость деформации [16]. Превышение некоторой ее критической величины приводит к значительному нагреву образца и подавлению эффекта прерывистой текучести либо его разрушению из-за непрекращающейся локализации деформации [17]. В связи с локальностью процесса масштабный эффект не сводится главным образом к изменению коэффициента жесткости. Его основной причиной является изменение удельного запаса упругой энергии в объеме зоны пластического течения [12].

Форма образцов также оказывает существенное влияние на механические характеристики. Установлено, что при испытании плоских образцов полученные значения пределов прочности и относительного удлинения обычно занижены по сравнению с таковыми для цилиндрических образцов [13]. А в условиях очень низких температур в результате многократного шейкообразования при скачкообразной деформации металлов для плоских образцов отмечается значительное отклонение напряженного состояния от линейного [17]. Поэтому расхождение между характеристиками прочности для образцов разной формы составляет около 10%, между характеристиками пластичности – 60%.

Ниже рассмотрены возможности учета рассмотренных факторов согласно действующим стандартам.

Минимизация влияния кинетического, энергетического и масштабного факторов. Периодическая поверка и калибровка оборудования в дальнейшем могут дополняться оценкой точности результатов механических испытаний на основе концепции “баланса погрешностей” [2]*. Однако для повышения достоверности результатов не менее важно найти нормативные возможности минимизации действия рассмотренных выше факторов.

Достоверность обеспечивается как точностью измерений, так и обоснованностью методики испытаний (т.е. стандарта), а подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью результатов. Максимальная воспроизводимость может быть достигнута благодаря применению в лабораториях единой методики, одинаковых машин и образцов. В частном случае использования образцов только одного типоразмера, как следует из уравнения (2), влияние кинетического фактора уменьшается при условии постоянства параметров $\dot{\varepsilon}_n$ и k (для отношения θ/E это требование невыполнимо). В общем случае необходимо выполнить условия подобия образцов, систем образец–машина и процессов деформирования:

$$k_p = \text{idem}; \quad (7)$$

$$k = \text{idem}; \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_n = \text{idem}, \quad (9)$$

где k_p – коэффициент пропорциональности, определяемый из соотношения $l_0 = k_p \sqrt{F_0/\pi}$.

К условию (8) следует добавить (4), а для низкотемпературных испытаний

$$W_{\max}/V = \text{idem}, \quad (10)$$

где $W_{\max} = P_{\max}/2C$; V – объем области скачкообразной локализованной деформации [12].

Указанные требования технически выполнимы и непротиворечивы. Однако на практике условие (4) реализуется редко (требуется очень жесткая машина), а (8) и (10) используются только для исследований [6, 7, 9] (необходимо изменять жесткость машины). Таким образом, в качестве полумеры остается учет модуля упругости и простых условий (7) и (9).

В действующих стандартах сохранение геометрического подобия (7) путем изготовления пропорциональных образцов не имеет обязательного характера, а коэффициент пропорциональности может быть равным 5,65, 11,3 и 2,82. Допускается использование непропорциональных образцов различных размеров как цилиндрических, так и плоских, т.е. условие пропорциональности (7) практически не выполняется.

Также неудовлетворительно решается задача выполнения кинетического условия (9). Точное регулирование номинальной скорости деформации, как и скорости нагружения, в настоящее время не вызывает затруднений. Тем не менее согласно стандартам сохраняется возможность выбирать их величины в пределах порядка

* Для оценивания погрешности необходимо определить реакцию материала на скорость деформирования. “Для некоторых видов материалов можно использовать некоторую ограниченную информацию” и примеры, приведенные в стандарте.

Стандартные диаметры образцов, скорости деформации и нагружения

Нормативный документ	Диаметр цилиндрических образцов, мм	Скорость деформации, c^{-1} , при определении		Скорость нагружения, МПа/с, при E , МПа	
		предела текучести	предела прочности (не более)	$\leq 1,5 \cdot 10^5$	$> 1,5 \cdot 10^5$
ГОСТ 1497-84 [1]	3–25	$2,5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$	$8,33 \cdot 10^{-3}$	1...10	3...30
EN 10002-1:2001 [2]	5–20	$2,5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	2...20	6...60
ISO 15579 [3]	Любой	$3 \cdot 10^{-5} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	6...60	6...60
ДСТУ 7305:2013 [4]	3–10	$1,5 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$, $2 \cdot 10^{-3}$, $1,5 \cdot 10^{-4}$, $0,5 \cdot 10^{-4}$	1...30, 1...5	1...30, 1...5
ISO 19819:2004 [5]	7 и др.	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5} \dots$ $\dots 1 \cdot 10^{-3}$	–	–

Примечание. Интервалы скоростей различаются для разных видов пределов текучести, температур и видов охладителей.

(таблица), а диапазоны скоростей нагружения для различных значений модуля упругости взаимно перекрываются. Так, скорость нагружения 6...10 МПа/с применима для любых величин модуля (таблица).

Заметим, что современные испытательные машины оснащаются приводом с цифровым управлением и автоматическим регулированием параметров, что позволяет с высокой точностью поддерживать постоянную скорость деформации. Это полностью решает проблему влияния жесткости при условии отсутствия скачков нагрузки.

Соотношение толщины и ширины плоских образцов, задаваемое стандартами, может быть различным, а диапазон толщин, как и диаметров цилиндрических образцов, – весьма широким. Показательны в этом отношении положения стандарта [1]. Диаметр цилиндрических образцов может изменяться от 3 до 25 мм, в результате расхождение в жесткости достигает 12 раз. Соответственно усиливается влияние не только кинетического, но и масштабного фактора. Жесткость машины согласно этому стандарту, как и другим, не регламентируется, однако задается диапазон предельных нагрузок $0,5 \leq P_l \leq 1000$ кН [18]. А поскольку $C_m \sim P_l$, жесткость испытательных машин может различаться на три порядка. Допуск по жесткости машин и узкий интервал диаметров образцов, причем $k_p = 5,65$, заданы лишь в стандарте [4] в связи с вышеуказанными особенностями механического поведения металлов при криогенных температурах ниже 30 К. В настоящее время согласно всем стандартам связь между коэффициентом жесткости и выбором номинальной скорости деформации отсутствует. Однако фактически допускается, с одной стороны, различная интенсивность изменения действительной скорости, с другой – произвольный выбор номинальной. Это существенно увеличивает возможное расхождение результатов, а дополнительный вклад вносит масштабный эффект.

Выводы

1. Нормативная база испытаний металлов на растяжение требует усовершенствования с целью приведения в соответствие современному состоянию испытательной техники.

2. Существенно поднять уровень достоверности получаемых механических характеристик позволили бы такие первоочередные меры, как ограничение податливости машин, уменьшение интервала размеров образцов, наряду с нормированием допускаемого диапазона коэффициента жесткости и обязательным выбором номинальной скорости деформации с учетом последнего, как это показано выше с помощью формулы (6).

3. Сведения о механических характеристиках должны дополняться данными о форме и размерах образцов, номинальной скорости деформации жесткости машины и коэффициенте жесткости.

Резюме

Досліджено ефекти, пов'язані із зразками і навантажувальним пристроєм, під час випробувань металів на розтяг у жорсткому режимі, в тому числі в умовах криогенних температур до 4,2 К. Показано, як накопичення потенціальної пружної енергії та її подальша розрядка при розвитку деформації зразка впливають на кінетику процесу. Отримано залежності швидкості від величини деформації та коефіцієнта жорсткості (співвідношення жорсткостей зразка і машини). Відзначається, що величини початкової і номінальної швидкостей деформації в разі податливої машини можуть відрізнятися на порядок. Для отримання близьких для різних машин величин швидкостей деформації на початковій стадії процесу запропоновано формулу, яка дозволяє розрахувати необхідну номінальну швидкість. За температур нижче 30 К вплив жорсткості машини, розмірів і форми зразків на одержувані характеристики різко посилюється, що вимагає спеціальних заходів при проведенні випробувань. Розглянуто ряд міжнародних і національних стандартів. Показано, що на сьогодні сан стандартизації випробувань металів на розтяг є незадовільним, а вимоги діючих нормативних документів – мінімальними, що не відповідає темпам розвитку випробувальної техніки. Істотно підняти рівень достовірності отриманих механічних характеристик дозволили б такі першочергові заходи, як обмеження податливості машин, звуження діапазону розмірів зразків, поряд із нормуванням коефіцієнта жорсткості і обов'язковим вибором номінальної швидкості деформації з урахуванням останнього.

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Метод испытаний на растяжение. Введ. 01.01.86.
2. EN 10002-1:2001. Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Ambient Temperature.
3. ISO 15579:2000. Metallic Materials – Tensile Testing at Low Temperature.
4. ДСТУ 7305:2013. Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур. Чинний з 01.01.2014.
5. ISO 19819:2004. Metallic Materials – Tensile Testing in Liquid Helium.
6. Пашков П. О., Кириенко А. М. Особенности деформации и разрушения стали в конструкциях различной жесткости. *Пробл. прочности*. 1980. № 1. С. 52–55.
7. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Алфимов П. Т. Исследование влияния жесткости испытательных машин на закономерности деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов. *Пробл. прочности*. 1982. № 7. С. 64–67.

8. Попов Н. Н. Влияние жесткости нагружения на историю деформирования при квазистатических испытаниях металлов. *Пробл. прочности*. 1990. № 7. С. 70–75.
9. Воробьев Е. В. Влияние податливости машины на механические характеристики материалов при испытаниях на статическое растяжение. *Пробл. прочности*. 2015. № 4. С. 61–66.
10. Коршунов А. И. Масштабный эффект прочностных и деформационных характеристик сплава АМгб при статическом растяжении. *Физ.-хим. механика материалов*. 1984. № 5. С. 120–122.
11. Стрижало В. А., Бугаев В. Ю., Медведь И. И. Влияние масштабного фактора на особенности деформирования конструкционных сплавов при статическом растяжении в условиях глубокого охлаждения (4,2 К). *Пробл. прочности*. 1990. № 5. С. 61–66.
12. Воробьев Е. В., Анпилогова Т. В. Скачкообразная деформация как мера масштабного эффекта в деформированном объеме металла при глубоком охлаждении: эксперимент и моделирование. *Пробл. прочности*. 2014. № 6. С. 56–65.
13. Понер Д. М., Фрейдензон Ю. Е., Хабаров В. П. и др. Влияние формы разрывного образца на уровень механических характеристик толстых листов низколегированных сталей. *Завод. лаб.* 1975. **41**, № 6. С. 735–736.
14. Воробьев Е. В. Особенности шейкообразования при низкотемпературной прерывистой текучести металлов. Сообщ. 2. Плоская деформация. *Пробл. прочности*. 2008. № 4. С. 61–68.
15. Vorob'ev E. V. and Anpilogova T. V. Kinetics of low-temperature discontinuous deformation of metals. *Cryogenics*. 2015. **68**. P. 59–66.
16. Стрижало В. А., Бугаев В. Ю., Медведь И. И. Влияние скорости деформирования на поведение конструкционных сплавов при статическом растяжении в условиях глубокого охлаждения (4,2 К). *Пробл. прочности*. 1990. № 1. С. 3–8.
17. Воробьев Е. В. Влияние скорости деформирования на прочность и деформативность сплавов при температуре 4,2 К. *Пробл. прочности*. 2000. № 6. С. 84–92.
18. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. Введ. 01.01.1993.

Поступила 10. 04. 2017