

О взаимовлиянии эффектов масштаба и низкотемпературной прерывистой текучести

Е. В. Воробьев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Показано, что вследствие качественного изменения механизма деформирования при глубоком охлаждении относительно небольшие изменения размеров образцов могут существенно влиять на механические свойства и прерывистую текучесть. Предложены критерии энергетического подобия условий механических испытаний для исследования проявлений масштабного эффекта и получения сопоставимых характеристик различных материалов.

Ключевые слова: масштабный фактор, прерывистая текучесть, скачок деформации, жесткость, запас упругой энергии, механические характеристики, критерий энергетического подобия.

Обозначения

W	– запас упругой энергии, Дж
C	– жесткость системы образец–машина, МН/м
C_0	– жесткость образца, МН/м
C_1	– жесткость машины, МН/м
σ_v	– предел прочности материала, МПа
$\sigma_{0,2}$	– условный предел текучести, МПа
E	– модуль упругости, МПа
δ	– относительное удлинение
N	– число скачков деформации
ε_c	– усредненная деформация зоны течения
Δl_c	– скачкообразный прирост удлинения, мм
l	– длина зоны течения, мм
L	– длина рабочей части образца, мм
r	– радиус поперечного сечения образца, мм
F	– площадь поперечного сечения образца, мм ²
ΔT	– прирост температуры зоны течения, К
k_T	– коэффициент термического разупрочнения, МПа/К
K	– эффективный модуль системы образец–машина, МПа
θ	– модуль деформационного упрочнения, МПа
σ_0	– напряжение начала скачка, МПа

Введение. Известно, что механические характеристики материалов зависят от условий нагружения и конструктивных особенностей, в частности от размеров тела. Их влияние на прочность и деформативность, связанное со статистическими, технологическими, механическими и энергетическими

факторами, хорошо изучено. Увеличение на несколько порядков диаметров или толщин образцов вызывает некоторое снижение характеристик пластичности и прочности.

При $T_0 \leq 20$ К происходит качественное изменение характера пластического деформирования металлов – реализуется низкотемпературная прерывистая текучесть (ПТ). Закономерности ее проявления, а значит, и механические характеристики существенно зависят от масштабного фактора [1–3], а главную роль среди условий нагружения (при жестком режиме нагружения и стандартных скоростях деформирования [4]) играет жесткость системы образец–машина [5, 6]. Ее влияние на кинетику деформирования и разрушения структурно-однородных материалов обнаруживается лишь в неравновесном состоянии системы – на ниспадающей ветви диаграммы деформирования [7, 8], а при $T_0 \leq 20$ К практически весь процесс пластического деформирования образца сопровождается многократными спадами нагрузки. Деформирование происходит самопроизвольно, только за счет запаса упругой энергии, определяемой величинами σ , F и C . Тем самым влияние жесткости проявляется через энергетический фактор, эффект воздействия которого суммируется и накапливается. Согласно действующему стандарту [4], жесткость машин не регламентируется и может отличаться на порядок и более. Диапазон предельных нагрузок разрывных машин составляет 0,5...1000 кН [9]. При этом допускается использование образцов широкого спектра типоразмеров ($F = 5...79$ мм²) [4], а в практике низкотемпературного эксперимента, в силу его специфики, часто применяют так называемые микрообразцы ($F = 1,5...3$ мм²) [10, 11]. Очевидно, что значительные отличия используемых образцов и машин в ряде случаев не позволяют корректно сравнивать механические характеристики, что необходимо при выборе материалов на стадии проектирования конструкции. Кроме того, при исследовании влияния масштабного фактора также необходимо учитывать указанные изменения энергетики процесса деформирования металлов при $T_0 \leq 20$ К. Однако до настоящего времени такой учет отсутствует.

Целью данной работы является формулировка условий энергетической эквивалентности процесса ПТ как при испытаниях образцов различных материалов с целью сопоставления их механических свойств, так и одного применительно к проводимому исследованию масштабного эффекта.

Критерии энергетической эквивалентности процесса прерывистой текучести. Запас упругой энергии системы образец–машина к моменту начала скачка составляет

$$W = \sigma_0^2 F^2 / 2C. \quad (1)$$

Увеличение жесткости системы, как и уменьшение F , вызывает снижение запаса упругой энергии и, как следствие, уменьшение величин Δl_c и ε_c , изменение характеристик пластичности и параметров ПТ [6]. Взаимосвязь между жесткостью образца $C_0 = EF/L$, машины C_1 и системы C описывается соотношением $C = C_0 C_1 / (C_0 + C_1)$. Зависимости жесткости системы от площади, длины и общей деформации, в том числе для геометрически подобных образцов, приведены в [3]. Как следует из (1), постоянство жесткости системы не обеспечивает идентичности энергетических условий де-

формирования материала. Рассмотрим возможности приведения условий ПТ в энергетическое подобие. В качестве критерия энергетического подобия используют отношение энергии упругой деформации образца W_0 к энергии машины W_1 [12]. Его можно представить в виде

$$\lambda = C_1/C_0. \quad (2)$$

Физически более обоснованным является критерий [13]

$$v = W/V, \quad (3)$$

$[v] = \text{Дж/м}^3$, учитывающий кроме жесткости системы прочностные характеристики и объем V образца.

Величина скачкообразной деформации $\varepsilon_c = \Delta T k_T / (\theta + K)$ [5], где $K = Cl/F$, определяющая удельную работу деформирования, существенно зависит не только от жесткости системы и размеров образца, но и от модуля деформационного упрочнения, так как он, в свою очередь, в значительной степени определяет удельную энергопоглощающую способность материала на единицу деформации. Поэтому в качестве безразмерного критерия, комплексно характеризующего энергетический баланс процесса ПТ, целесообразно принять отношение удельной упругой энергии, запасенной в системе на момент начала скачка деформации, к модулю упрочнения материала:

$$\chi = W_0/\theta. \quad (4)$$

Здесь $W_0 = W/V_0$, где V_0 – объем участка образца, охваченного локализованным течением.

Принимая $V_0 \sim r^3$, когда длина участка пропорциональна радиусу [14]*, из (1) и (4) получаем для отдельно взятого скачка деформации с точностью до постоянного множителя критерий энергетического подобия:

$$\chi = \sigma_0^2 r / C\theta. \quad (5)$$

Поскольку по мере накопления деформации напряжение начала скачка увеличивается, а модуль деформационного упрочнения снижается, для определения критерия χ могут быть использованы усредненные величины σ_c и θ_c . При аппроксимации диаграммы деформирования ломаной линией σ_c и θ_c можно представить в виде $\sigma_c = \sigma_{0,2} + 0,5\gamma$ ($\gamma = \sigma_b - \sigma_{0,2}$) и $\theta_c = \gamma/\varepsilon_b$ (ε_b – общая деформация образца, соответствующая пределу прочности). Величину θ_c более точно можно получить из истинной диаграммы деформирования образца при $T = T_0 + \Delta T$ или методом интерполяции. С учетом соотношения

$$C = C_1 / (1 + C_1/k_0 r), \quad (6)$$

* Такое допущение правомерно на стадии развитой ПТ, когда от одного скачка к другому σ_0 и θ изменяются незначительно.

где коэффициент жесткости пропорционального цилиндрического образца равен $0,1\pi E$ или $0,05\pi E$ соответственно для 5- или 10-кратных образцов, критерии (3), (4), (5) принимают вид

$$\lambda = C_1/k_0 r; \quad (7)$$

$$v = \sigma_c^2 (r + C_1/k_0)/C_1; \quad (8)$$

$$\chi = \sigma_c^2 (r + C_1/k_0)/C_1 \theta_c. \quad (9)$$

Энергетическое подобие ПТ образцов различных материалов и размеров обеспечивается при условии $\chi = \text{const}$ путем соответствующего подбора жесткости машины с помощью зависимости

$$C_1 = r \left(\frac{\chi \theta_c}{\sigma_c^2} - \frac{1}{k_0} \right)^{-1}.$$

Величину χ , как и λ или v для более высоких температур испытаний, определяют, задаваясь некоторыми параметрическими значениями, которые характеризуют базовую жесткость машины, исходный материал и его образец.

Возможности регулирования жесткости машины C_1 ограничены ее максимальной (исходной) величиной $C_{1и}$. Поскольку $C_1 \leq C_{1и}$, в качестве исходного материала выбирается тот, у которого величина σ_c^2/θ_c наибольшая. Характер взаимосвязи между σ_c , отношением σ_c^2/θ_c , радиусом образца r и выбираемой жесткостью машины C_1 при $\chi = \text{const}$ для 5-кратных образцов стали 03Х20Н16АГ6 при параметрических значениях $r = 1,5$ мм, $C_{1и} = 14,5$ МН/м, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_{сн} = 1415$ МПа, $\theta_{сн} = 2500$ МПа, $\chi = 9,64 \cdot 10^{-2}$ иллюстрирует рис. 1.

Выбор конструкционного материала обычно производится из числа близких по механическим свойствам. Для материалов одного класса близки также величины C_1 . Например, для тех же образцов сталей 03Х20Н16АГ6 (исходный материал) и 12Х18Н10Т они составляют соответственно 14,5 и 13,4 МН/м. Однако для технического титана ВТ1-0 следует выбрать $C_1 = 8,1$ МН/м, а для алюминиевого сплава АМг6 – 0,9 МН/м. Сопоставление результатов испытаний материалов разного класса в условиях энергетической эквивалентности представляет интерес при изучении явления ПТ. Критерий (9) может быть использован и при сравнительном исследовании проявления масштабного эффекта для различных материалов.

Для исследования масштабного эффекта на одном материале может быть предложен также критерий, устанавливающий постоянство деформаций (2), в виде $\chi' = 1/K$. С учетом (6) и $l \sim r$ его можно записать так:

$$\chi' = (r + C_1/k_0)/C_1. \quad (10)$$

Параметрическими величинами здесь являются максимальные значения C_1 и r . Этому критерию тождественны критерии (8) и (9), если принять, что для образцов данного материала сомножители σ_c^2 и θ_c приблизительно постоянны и могут быть исключены. Однако в силу влияния собственно масштабного фактора эти сомножители в большей или меньшей степени изменяются. Поэтому критерий (10) может использоваться для оценки масштабного эффекта лишь в первом приближении. Более точную оценку можно получить с помощью безразмерного критерия (9) при проведении повторных экспериментов с корректировкой запаса упругой энергии системы путем дополнительного регулирования жесткости машины с учетом указанных изменений.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cн}}, \frac{\sigma_c^2}{\theta_c} \frac{\sigma_{cн}^2}{\theta_{cн}}, \frac{r}{rн}$$

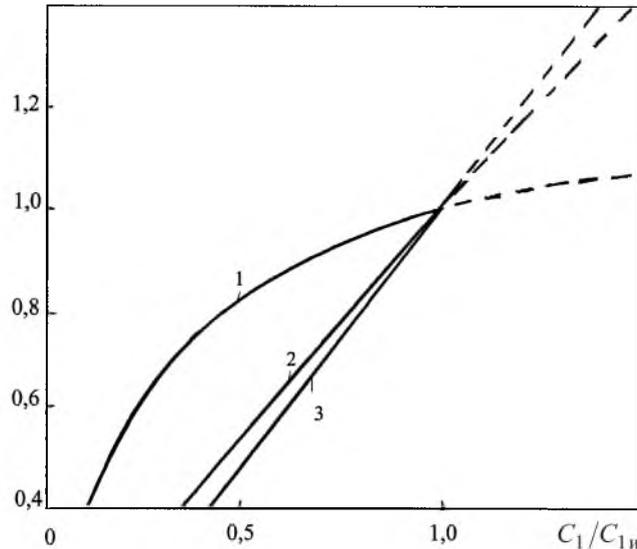


Рис. 1. Зависимость среднего напряжения σ_c (1), отношения σ_c^2/θ_c (2) и радиуса сечения образца r (3) от выбираемой жесткости машины C_1 при выполнении условия $\chi = \text{const}$.

Экспериментальные исследования масштабного эффекта в условиях энергетического подобия процесса прерывистой текучести. Объектом исследования служила аустенитная сталь 03Х20Н16АГ6. Испытания на одноосное растяжение проводились при температуре 4,2 К в среде жидкого гелия на установке УМН-10 [15]. Использовались микрообразцы стали диаметром 1; 1,5 и 2 мм и стандартные 5-кратные образцы диаметром 3 мм. У всех образцов сохранялось геометрическое подобие и идентичность технологии изготовления. Скорость деформирования составляла $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, а базовая жесткость машины — 14,5 МН/м. Энергетическое подобие обеспечивалось благодаря использованию критерия χ . Для соответствующего регули-

рования жесткости машины применяли устройство [16] в виде контейнера с набором тарельчатых пружин, определенное число которых включается в силовую цепь. Эксперименты показали, что с уменьшением площади поперечного сечения образцов значительно снижаются характеристики пластичности и относительное число скачков (рис. 2). На рис. 2 для сравнения приведены зависимости, полученные при постоянной жесткости машины [3].

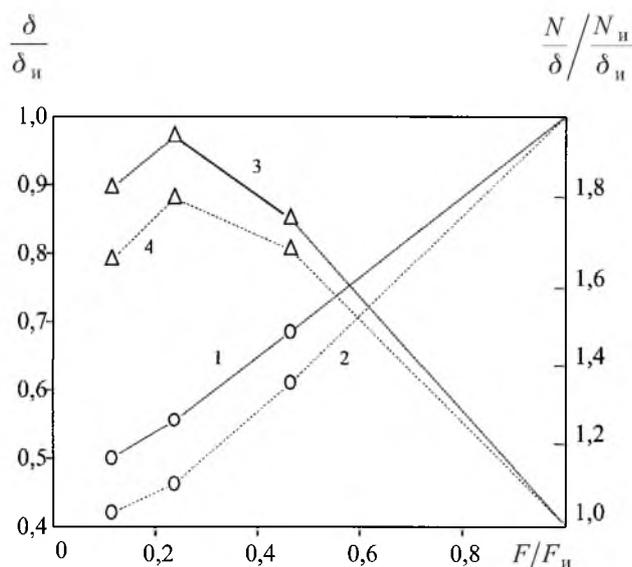


Рис. 2. Зависимости относительного удлинения (1, 2) и относительного числа скачков (3, 4) от площади поперечного сечения образцов стали 03X20H16AG6 при отсутствии (сплошные линии) и наличии (пунктирные линии) энергетического подобия ПТ.

Как видно, при сохранении качественного подобия данных зависимости имеют место значительные количественные отличия. Следует отметить и снижение более чем на 100 МПа предела прочности образцов наименьшего диаметра. Это можно объяснить тем, что при уменьшении жесткости, необходимом для постоянства χ , условие разрушения [17] по механизму адиабатического сдвига начинает выполняться на более ранней стадии деформирования.

Заключение. Исследование показало, что относительно небольшие изменения размеров образцов приводят к значительным изменениям механических характеристик и параметров ПТ. Наличие сильного масштабного эффекта указывает на неприемлемость использования микрообразцов при низкотемпературных испытаниях.

С целью получения сопоставимых результатов механических испытаний различных материалов при глубоком охлаждении необходимо применять образцы одного типоразмера при выполнении условия энергетического подобия ПТ. Предложен безразмерный критерий подобия, учитывающий как запасенную удельную энергию, так и энергопоглощающую способность материала. Условие энергетического подобия реализуется путем регулирования жесткости испытательной машины.

Резюме

Показано, що у зв'язку з якісною зміною механізму деформування за глибокого охолодження відносно невеликі зміни розмірів зразків можуть суттєво впливати на механічні властивості і переривчасту текучість. Запропоновано критерії енергетичної подібності умов механічних випробувань для дослідження масштабного ефекту й отримання зіставлюваних характеристик різних матеріалів.

1. Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов при низких температурах. – М.: Metallurgiya, 1975. – 328 с.
2. 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.
3. Воробьев Е. В. О прогнозировании проявлений масштабного фактора в условиях глубокого охлаждения // Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій: Праці Міжнар. конф. (6–9 червня 2000 р., Київ, Україна). – Київ: Логос, 2000. – Т. 1. – С. 449 – 453.
4. ГОСТ 22706-77. Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°C. – Введ. 01.09.88.
5. Воробьев Е. В., Стрижало В. А. Развитие низкотемпературной скачкообразной деформации металлов и возможности ее устранения // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 41 – 52.
6. 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.
7. Зилова Т. К., Новосильцева Н. И., Фридман Я. Б. Методы испытания с переменным запасом упругой энергии и его влияние на механические свойства // Завод. лаб. – 1969. – № 10. – С. 1229 – 1236.
8. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 12. – С. 104 – 106.
9. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. – Введ. 01.01.93.
10. Лебедев Д. В. Конструктивная прочность криогенных сталей. – М.: Metallurgiya, 1976. – 264 с.
11. Потапов Б. В., Ярошенко А. Г. Установки для испытания микрообразцов на растяжение и ползучесть в сильных магнитных полях // Завод. лаб. – 1977. – № 8. – С. 1020 – 1021.
12. Зилова Т. К., Петрунина Н. И., Фридман Я. Б. Кинетика процесса деформации и разрушения в связи с запасом упругой энергии // Некоторые проблемы прочности твердого тела. – М., 1959. – С. 297 – 311.

13. *Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Ламашевский В. П. и др.* Экспериментальное исследование влияния эффекта масштаба на прочность чугуна с шаровидным графитом // Пробл. прочности. – 1982. – № 12. – С. 15 – 18.
14. *Еремин В. И.* Геометрия области локализованной деформации при низкотемпературном скачкообразном течении металлов // Там же. – 1987. – № 2. – С. 37 – 39.
15. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
16. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного подгружения // Пробл. прочности. – 1997. – № 3. – С. 83 – 89.
17. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Низкотемпературная прерывистая текучесть упрочняющихся материалов // Там же. – 1994. – № 10. – С. 3 – 8.

Поступила 04. 09. 2001