

Скачкообразная деформация как мера масштабного эффекта в деформированном объеме металла при глубоком охлаждении: эксперимент и моделирование

Е. В. Воробьев, Т. В. Анпилогова

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

Проведены испытания на растяжение образцов титанового сплава и аустенитной стали в интервале температур 300...4 К. В условиях глубокого охлаждения возникает новый вид масштабного эффекта – изменение величины низкотемпературной скачкообразной деформации, что обуславливает резкое изменение характеристики пластичности (относительное удлинение). В качестве меры масштабного эффекта принята разность величины скачкообразной деформации для максимального и минимального значений площади поперечного сечения стандартных цилиндрических образцов. Для стали 03Х20Н16АГ6 путем математического моделирования получены зависимости масштабного эффекта от наиболее важных факторов – стартового напряжения скачка и жесткости системы образец–машина. Исследована природа масштабного эффекта и рассмотрены возможности его минимизации в связи со стандартизацией механических испытаний.

Ключевые слова: скачкообразная деформация, криогенные температуры, масштабный эффект, нелинейная модель, механические характеристики, стандартный образец, жесткость испытательной машины.

Введение. Влияние размеров тела на его деформативность и прочность подтверждено многочисленными экспериментальными данными. Механические характеристики пластичных металлов в условиях статического растяжения начинают заметно снижаться только при увеличении площади поперечного сечения образцов на несколько порядков. В то же время в условиях глубокого охлаждения влияние размеров и формы образцов существенно усиливается [1, 2]. Это может быть связано с качественным изменением механизмов деформирования, т.е. переходом от непрерывного гомогенного накопления пластической деформации к дискретному локализованному. Скачкообразная деформация, или прерывистая текучесть металлов регистрируется в виде зубчатых диаграмм деформирования. Это характерно для широкого класса явлений различной природы, которые служат объектом многих исследований, в том числе методами математического моделирования [3–6]. В отличие от других видов неустойчивости пластической деформации, низкотемпературная скачкообразная деформация [7] сопровождается резким нагревом очередной зоны течения и глубокими спадами нагрузки. Это обусловлено достижением больших приростов деформаций, что представляет собой очевидную опасность для несущих элементов конструкций криогенной техники.

Стартовые механизмы низкотемпературной прерывистой текучести связывают с внутрикристаллическими взаимодействиями скоплений дислокаций с барьерами [8, 9], возникновением локальных тепловых вспышек при близких к нулю значениях теплоемкости [10]. Однако дальнейшее развитие процесса скачка проявляется уже как свойство системы образец–машина (деталь–конструкция) в зависимости от ряда ее характеристик. При достаточно медленном нагружении основными из них являются жесткость системы и размеры образца (площадь поперечного сечения). Именно они при заданном уровне нагрузки определяют количество упругой энергии, необратимо переходящей в работу деформации. Тем самым их влияние проявляется через энерге-

тический фактор, воздействие которого суммируется и накапливается с каждым скачком деформации.

Действующими стандартами на методы испытаний металлов на растяжение при криогенных температурах жесткость машин не регламентируется и может различаться на порядок и больше, как и площадь поперечного сечения образцов. Очевидно, что столь значительные различия в ряде случаев не позволяют корректно определять и сравнивать механические характеристики, что необходимо при выборе материалов и проектировании конструкций.

Цель данной работы заключается в экспериментальном и численном исследовании масштабного эффекта при скачкообразном развитии пластической деформации в среде жидкого гелия, его количественной оценке в зависимости от уровня прочности материала и жесткости системы образец–машина, а также в определении условий минимизации эффекта.

Материалы и методы исследования. Для исследования могут быть использованы любые высокопрочные материалы, которые сохраняют пластичность при низких температурах. Таковыми являются аустенитные нержавеющие стали и сплавы на основе титана, которые широко применяются в криогенной технике. Поэтому для экспериментов были выбраны стабильно аустенитная сталь 03X20H16AG6 и титановый сплав 3М.

Экспериментальные процедуры. Использовались цилиндрические образцы с начальным диаметром $2R_0 = 3$ мм, начальной площадью поперечного сечения $7,07 \text{ мм}^2$ и начальной расчетной длиной 15 мм (исходные). Также использовались геометрически подобные образцы с начальным диаметром 2,0; 1,5 и 1,0 мм. Поверхность рабочей части всех образцов была механически полированная. Испытания проводили на разрывной машине УМН-10 с гидравлическим приводом, максимальной нагрузкой 100 кН. Податливость испытательной машины составляет 0,069 м/МН, соответственно ее жесткость $C_m = 14,5$ МН/м. Машина укомплектована криостатом и другим специальным оборудованием [11]. Испытания проводили при температуре 4, 77 и 293 К. При низкотемпературных испытаниях образец полностью погружался в жидкий гелий (в криостате) или жидкий азот (в криогенной емкости) с выдержкой в течение 5 мин. Во всех случаях образцы растягивались до разрушения с контролем по перемещению с номинальной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_n = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

На компьютере автоматически получали диаграмму нагрузка–удлинение. Механические характеристики рассчитывали путем усреднения результатов испытаний трех образцов каждого диаметра при данной температуре. Для сравнения некоторых характеристик скачкообразной деформации дополнительно в среде жидкого гелия испытывали исходные образцы метастабильной аустенитной стали 12X18H10T и алюминиевого сплава АМг6.

Метод численного исследования скачкообразной деформации и масштабного эффекта. Теоретическая часть работы выполнена применительно к стали 03X20H16AG6 при температуре 4 К с использованием локальной одномерной нелинейной многопараметрической математической модели [12], сформулированной в виде дифференциального уравнения динамического равновесия системы образец–машина при развитии скачка деформации:

$$\ddot{\varepsilon}_d (1 + \varepsilon_d) + a \dot{\varepsilon}_d + b \varepsilon_d (1 + \varepsilon_d) + c \varepsilon_d^m = p \sin \omega t. \quad (1)$$

Здесь ε_d – продольная скачкообразная деформация; t – время; a , b , c , p , m , ω – постоянные, причем

$$\varepsilon_d \geq 0; \quad \dot{\varepsilon}_d \geq 0; \quad \varepsilon_d(0) = \dot{\varepsilon}_d(0) = 0; \quad \varepsilon_d(\tau_D) = \varepsilon_D; \quad \dot{\varepsilon}_d(\tau_D) = 0,$$

где τ_D – длительность скачка деформации; множитель $(1 + \varepsilon_d)$ учитывает уменьшение площади поперечного сечения образца в области течения.

Рассматривается система, в которой деформация осуществляется только за счет запаса упругой энергии, и поэтому правая часть уравнения (1) не описывает режим нагружения. Скачок начинается по достижении критического напряжения σ_0 . При этом полагаем, что независимо от физической природы стартового механизма эффекта (например, прорыв барьеров дислокационными скоплениями) его движущей силой является перенапряжение в области развития катастрофического течения вследствие резкого и сильного нагрева материала в адиабатических условиях и его термического разупрочнения. Приняты также следующие гипотезы:

величина нагрева пропорциональна стартовому напряжению σ_0 с учетом коэффициента трансформации работы пластической деформации в тепло;

модель деформационного упрочнения определяется видом огибающей верхних пиков диаграммы растяжения, а характеристики упрочнения для заданного скачка являются функциями стартового напряжения;

длина области течения l (часть рабочей длины образца) равна радиусу поперечного сечения R цилиндрического образца, а выделение тепла и деформация гомогенны и ограничены этой областью;

значение параметра ω выбирается таким, при котором величина ε_D наибольшая, т.е. предполагается, что запас упругой энергии преобразуется в работу деформации наиболее энергетически выгодным путем.

Коэффициенты уравнения (1) определяются следующим образом: $a = \mu/u$; $b = K/u = C/M$; $c = A/u$; $p = k_T \Delta T_m / u$ (μ – коэффициент вязкости, k_T – коэффициент термического разупрочнения, ΔT_m – температура нагрева области течения, $K = Cl/F$, $u = Ml/F$, F – площадь поперечного сечения образца). К определяющим параметрам модели относятся величины, входящие в эти коэффициенты. Среди них основными являются стартовое напряжение σ_0 , от которого зависит величина коэффициента p , подвижная присоединенная масса M , жесткость системы образец–машина C и площадь поперечного сечения F .

Для идентификации модели использовались экспериментальные данные, полученные при испытаниях исходных образцов стали 03Х20Н16АГ6 в среде жидкого гелия. В качестве базовых принимались величины параметров, которые характеризуют условия данного эксперимента: $M = 300$ кг; $C = 12$ МН/м, $\sigma_0 = 1819$ МПа. Это значение напряжения соответствует середине диаграммы растяжения, когда общая деформация образца, накопленная к моменту начала скачка, $\varepsilon_t = 0,165$. Параметр F рассчитывается с учетом соотношения $R = R_0 / \sqrt{1 + \varepsilon_t}$.

Уравнение (1) решалось с помощью программы, основанной на методе конечных разностей [12]. В результате получали зависимости скачкообразной деформации от времени $\varepsilon_d - t$, откуда определялись конечные значения деформации ε_D . Решалась серия задач при последовательном изменении величины площади поперечного сечения образца F (и соответствующем изменении l) и постоянстве остальных параметров модели. В других случаях определенным образом изменялась также жесткость системы образец–машина. Набирая с некоторым интервалом ряд расчетных точек, получаем искомый график.

Результаты и их обсуждение. Эксперименты показывают, что уменьшение площади поперечного сечения образцов почти в десять раз при температуре 293 и 77 К практически не изменяет прочность и пластичность материалов. В то же время при температуре 4 К зафиксированы значительные изменения характеристик пластичности материалов и прерывистой текучести. Как для стали, так и для титанового сплава с уменьшением площади величины относительного удлинения δ снижаются соответственно в 2 и в 1,4 раза. При этом характеристики прочности изменяются

несущественно. Еще одной закономерностью является рост относительной величины количества скачков N/δ (для стали в 1,9 раза, для титанового сплава в 1,2 раза) или снижение средней деформации при скачке, т.е. для достижения определенной величины общей деформации требуется большее количество скачков. Учитывая, что характеристика пластичности изменяется только в условиях глубокого охлаждения, можно сделать вывод, что причина этого – потеря устойчивости деформации. Заметим также, что существует тесная взаимосвязь между скачкообразной деформацией и механическими характеристиками. Таким образом, указанные изменения в данном случае – это два проявления масштабного эффекта, причем первое обуславливает второе.

Численное исследование [13] показывает, что с увеличением площади поперечного сечения при постоянстве остальных параметров, в том числе C , величина скачкообразной деформации возрастает, асимптотически приближаясь к 0,25, причем наиболее интенсивный прирост от нуля до 0,143 происходит в начальном диапазоне $F \leq 3 \text{ мм}^2$. Однако в реальном эксперименте с использованием образцов с разными величинами F жесткость также меняется:

$$C = C_m / [1 + C_m / 0,075 E \sqrt{\pi F}] \quad (2)$$

(E – модуль упругости).

Расчетная зависимость скачкообразной деформации от площади поперечного сечения, полученная с учетом (2) при $C_m = \text{const}$, представлена кривой 2 на рис. 1. Поскольку жесткость при использовании образцов разных диаметров в данном случае изменяется несущественно, расхождение между кривыми для $C = \text{const}$ и $C_m = \text{const}$ не превышает 3%. С увеличением C_m оно значительно возрастает.

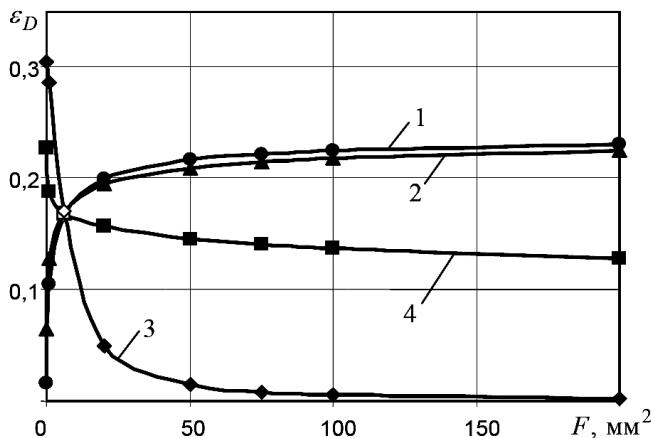


Рис. 1. Зависимость скачкообразной деформации от площади поперечного сечения образца стали 03X20Н16АГ6: 1 – при постоянстве жесткости системы, $\Delta_F = 0,047$; 2 – при постоянстве жесткости машины, $\Delta_F = 0,037$; 3 – при постоянстве полного запаса упругой энергии, $\Delta_F = 0,145$; 4 – при постоянстве удельного запаса упругой энергии, $\Delta_F = 0,018$.

Непосредственное измерение деформации ε_D на образце не позволяет получить результат с приемлемой точностью. В то же время другой деформационный показатель – скачкообразное удлинение Δl_D – может быть без затруднений определен из полученных диаграмм растяжения образцов разных диаметров для любого скачка. Искомую величину определяли как расстояние между двумя соседними вершинами зубцов в средней части диаграммы нагрузка P – удлинение Δl , полученной в заданном масштабе записи. Это дает возможность сравнить расчетное значение

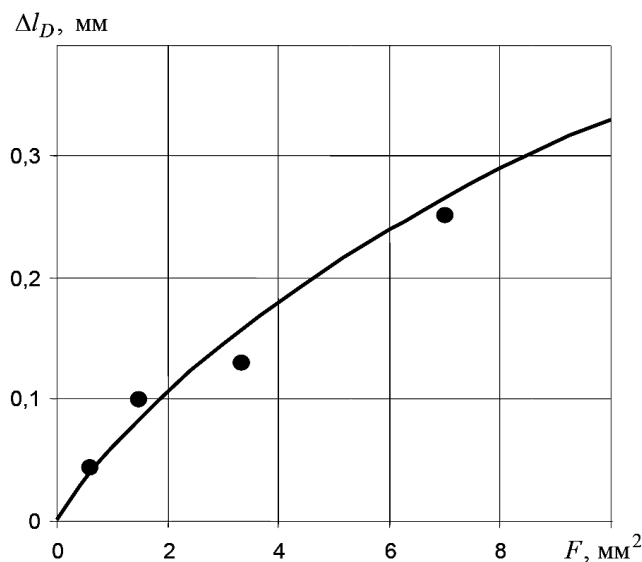


Рис. 2. Расчетная (линия) и экспериментальная (точки) зависимость скачкообразного удлинения от площади поперечного сечения образца стали 03X20H16AG6.

$\Delta l_D = \varepsilon_D l$ с независимо установленными данными. При этом ε_D рассчитывали с учетом (2), как и кривую 2 на рис. 1. Такое сравнение (рис. 2) показывает хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами, что подтверждает правильность проведенных вычислений и адекватность модели [12] в целом.

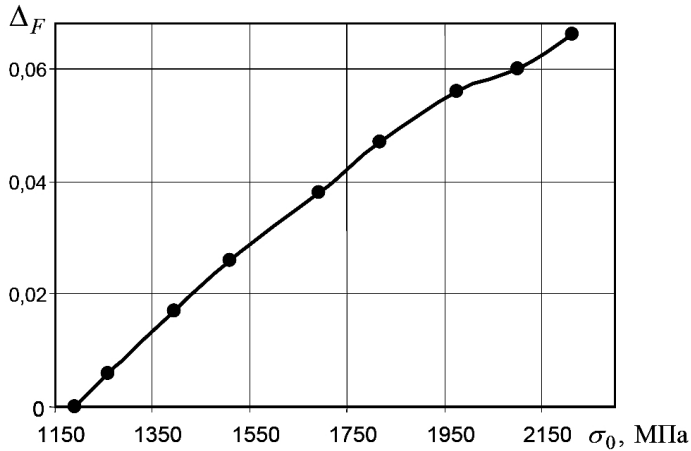
В отличие от "обычного" масштабного эффекта, который связывают с рядом факторов, в том числе статистическими и технологическими, в данном случае наибольшее значение приобретает энергетический фактор. Работа скачкообразной пластической деформации при статическом нагружении, когда номинальная скорость деформирования не превышает $0,1 \text{ с}^{-1}$, что на два порядка больше стандартной величины, выполняется практически полностью за счет потенциальной энергии системы образец–машина [13]. На момент начала скачка ее запас составляет

$$W = \sigma_0^2 F^2 / 2C, \quad (3)$$

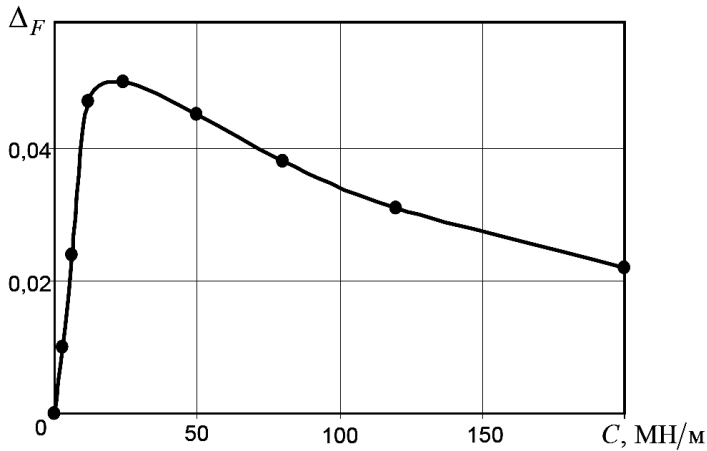
т.е. зависит не только от размеров образца, но и от уровня прочности материала и жесткости системы. Поэтому исследование масштабного эффекта в связи со скачкообразной деформацией необходимо проводить комплексно с учетом параметров σ_0 и C .

Для получения количественных зависимостей следует задаться мерой масштабного эффекта. Такой мерой может служить изменение скачкообразной деформации, а именно: разность ее величины Δ_F для образцов различных размеров. Такие образцы выберем из числа стандартных. Согласно [14] минимальный диаметр цилиндрического образца составляет 3 мм ($F_0 = 7,1 \text{ мм}^2$). Применяются также образцы диаметром 7 мм ($F_0 = 38,5 \text{ мм}^2$), рекомендованные стандартом [15]. Указанные величины площадей принимаем в качестве граничных для определения соответствующих деформаций ε_D и их разности Δ_F как "величины" масштабного эффекта для стандартных образцов. При базовых значениях параметров модели получим $\Delta_F = 0,047$.

На основе такого подхода расчетным путем построены зависимости количественного показателя масштабного эффекта от двух главных энергетических факторов: стартового напряжения и жесткости системы образец–машина. Зависимость, представленная на рис. 3,а, близка к линейной, зависимость на рис. 3,б – немонотонная и имеет максимум при $C = 24$ МН/м. Если жесткость мала или очень велика, величина Δ_F будет незначительной. По-видимому, это связано с особенностями влияния жесткости на скачкообразную деформацию. При $C \rightarrow 0$ деформация неограниченно возрастает (в действительности происходит разрушение образца на первом скачке), при $C \rightarrow \infty$ она стремится к нулю [13]. Отметим, что максимально масштабный эффект проявляется в интервале жесткостей 10...70 МН/м, наиболее важном для практики.



а



б

Рис. 3. Зависимость масштабного эффекта от стартового напряжения (а) и жесткости системы образец–машина (б) для стали 03Х20Н16АГ6.

Рассмотрим возможность изменения масштабного эффекта путем регулирования жесткости машины C_m с учетом (2), реализуя определенный вид зависимости $C(F)$. Такое регулирование возможно, например, с помощью устройства в виде пакета тарельчатых пружин [16]. Выше рассмотрены графики, полученные при $C = \text{const}$ и $C_m = \text{const}$ (на рис. 1, 4 кривые 1, 2). В случае если выполняется

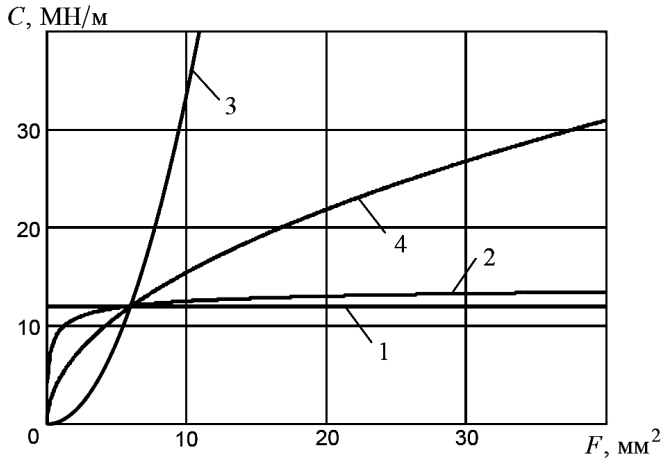


Рис. 4. Зависимость жесткости системы образец–машина от площади поперечного сечения образца стали 03Х20Н16АГ6: 1 – при постоянстве жесткости системы; 2 – при постоянстве жесткости машины; 3 – при постоянстве полного запаса упругой энергии; 4 – при постоянстве удельного запаса упругой энергии.

требование $W = \text{const}$, имеем $C = \sigma_0^2 F^2 / 2W$ (на рис. 4 кривая 3) и соответствующую зависимость для деформации (на рис. 1 кривая 3). Постоянство удельного запаса упругой энергии $\nu = W/V = \text{const}$ обеспечивается, если

$$C = \sigma_0^2 \sqrt{\pi F} / 2\nu, \quad (4)$$

где $V = \pi R^3$ – объем области течения (на рис. 1 и 4 кривые 4).

Из рис. 1 можно определить величины Δ_F для каждой зависимости. При постоянстве полной энергии масштабный эффект проявляется наиболее сильно, а выполнение условия $\nu = \text{const}$ позволяет его минимизировать. Для этого необходимо, чтобы жесткость системы образец–машина изменялась в зависимости от площади поперечного сечения образца согласно (4).

Таким образом, основной причиной масштабного эффекта в данном случае является энергетический фактор, а именно: изменение удельного запаса упругой энергии в объеме области локального пластического течения из-за изменения размеров образца. Однако изменение запаса упругой энергии будет ощутимым при достаточно большом стартовом напряжении. С его уменьшением масштабный эффект затухает (рис. 3,а). Поэтому, в отличие от сталей и титановых сплавов, у малопрочных материалов, например алюминиевого сплава АМг6, этот эффект в отношении влияния на механические характеристики проявляется значительно слабее [1]. К тому же диаграммы деформирования малопрочных металлов всегда включают начальную гладкую кривую, так как скачки начинаются по достижении определенной величины гомогенной пластической деформации.

Порог чувствительности к масштабному эффекту может быть установлен с использованием энергетического критерия, который учитывает снижение энергопоглощающей способности металла в результате локальности скачкообразной деформации. Коэффициент снижения представим как

$$k_r = 1 - \frac{S_l}{S_h + S_u},$$

где S_l , S_u – соответственно площади под нижней и верхней огибающими зубчатой части диаграммы нагрузка–удлинение; S_h – площадь под гладкой кривой диаграммы, которая описывает начальную гомогенную стадию деформирования. Данное уравнение можно сформулировать в виде

$$k_r = \frac{\Delta\sigma_m}{\sigma_B + \sigma_{0,2}} \left(1 - \frac{\Delta L_h}{\Delta L} \right),$$

где $\Delta\sigma_m$ – среднее значение спада напряжения при скачке; σ_B – предел прочности; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; ΔL – полное удлинение образца; ΔL_h – гомогенная часть удлинения.

Масштабный эффект проявляется, если коэффициент снижения превышает некоторое критическое значение

$$k_r \geq k_{rc}. \quad (5)$$

В таблице приведены механические характеристики и значения k_r для исследованных материалов.

Значения механических характеристик и коэффициентов снижения энергопоглощающей способности сталей и сплавов при температуре 4 К

Материал	$\sigma_{0,2} + \sigma_B$, МПа	$\Delta\sigma_m$, МПа	$\Delta L_h/\Delta L$	N	$1/N$	k_r
03X20H16AG6	2830	248	1,0	26	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$
12X18H10T	2414	134	1,0	29	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$
3М	2376	127	1,0	19	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$
АМг6	663	16	0,21	108	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$

На основании имеющихся данных можно принять $3 \cdot 10^{-2} < k_{rc} < 5 \cdot 10^{-2}$, поэтому критериальное условие (5) выполняется лишь для наиболее прочных конструкционных материалов криогенной техники с довольно большой амплитудой скачков напряжения. При этом у ГЦК-металлов, в случае если гомогенная часть удлинения мала (или отсутствует), прослеживается корреляция между величинами k_r и $1/N$.

Рассмотрим вопрос об учете масштабного эффекта при проведении стандартных испытаний металлов на растяжение. Теоретически это возможно путем регулирования или подбора жесткости испытательной машины согласно (4) с использованием соотношения (2). Для этого необходимо, чтобы были нормативно заданы как параметры базовые значения площади поперечного сечения образца F_n , жесткости системы C_n и напряжения σ_{0n} для данного класса материалов. Тем самым задается постоянный уровень удельного запаса упругой энергии. Его величина определяется из (3) как $\nu_n = \sigma_{0n}^2 \pi R_n / 2C_n$, где R_n – радиус, соответствующий площади F_n .

На практике низкотемпературных испытаний достаточно сузить диапазон размеров стандартных образцов и рекомендовать образцы одного или двух близких размеров. Такой подход был реализован в стандарте [17], разработанном вместо [14] (согласно последнему площади поперечного сечения образцов могут различаться на порядок). Кроме того, в [17] впервые для подобных стандартных механических испытаний нормируется жесткость испытательной машины путем ее ограничения снизу.

Еще один аспект проблемы достоверности механических характеристик в данных условиях связан с выбором формы образцов, поскольку стандартами [14, 15] допускается использование как цилиндрических, так и плоских. С учетом многократного шейкообразования разного типа критерием для выбора может служить показатель жесткости напряженного состояния образца в шейках [2]. Для плоских образцов, в отличие от цилиндрических, имеет место весьма значительное отклонение напряженного состояния от линейного. В результате различие между характеристиками прочности металлических материалов достигает 10%, между характеристиками пластичности – 60%. Поэтому использование плоских образцов оправдано только для тонколистовых материалов.

Выводы

1. Для высокопрочных металлов в условиях глубокого охлаждения масштабный эффект проявляется как изменение механических характеристик и характеристик скачкообразной деформации, при этом второе обуславливает первое.

2. Основной причиной возникновения масштабного эффекта является изменение удельного запаса упругой энергии в объеме области течения из-за изменения размеров образца.

3. В качестве меры масштабного эффекта предложена разность величин скачкообразной деформации для граничных значений площади поперечного сечения стандартных образцов.

4. С помощью математической модели получены зависимости масштабного эффекта для стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4 К от наиболее важных факторов: жесткости системы образец–машина и стартового напряжения скачка.

5. При снижении стартового напряжения масштабный эффект затухает, поэтому для низкопрочных материалов влияние размеров образцов на скачкообразную деформацию и механические характеристики становится незначительным.

6. Сформулирован энергетический критерий проявления масштабного эффекта при температуре 4 К, который учитывает снижение энергопоглощающей способности металлов при скачкообразной деформации.

7. Рассмотрены возможности минимизации масштабного эффекта и его учета при проведении стандартных испытаний металлов на растяжение в условиях криогенных температур.

Резюме

Проведено випробування на розтяг зразків титанового сплаву й аустенітної сталі в інтервалі температур 300...4 К. В умовах глибокого охолодження виникає новий вид масштабного ефекту – зміна величини низькотемпературної стрибкоподібної деформації, що зумовлює різку зміну характеристики пластичності (відносно видовження). За міру масштабного ефекту прийнята різниця величини стрибкоподібної деформації для максимального і мінімального значень площі поперечного перерізу стандартних циліндричних зразків. Для сталі 03Х20Н16АГ6 за допомогою математичного моделювання отримано залежності масштабного ефекту від найбільш важливих факторів – стартового напруження стрибка і жорсткості системи зразок–машина. Досліджено природу масштабного ефекту і розглянуто можливості його мінімізації в зв'язку зі стандартизацією механічних випробувань.

1. 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.

2. Воробьев Е. В. Особенности шейкообразования при низкотемпературной прерывистой текучести металлов. Сообщ. 2. Плоская деформация // Там же. – 2008. – № 4. – С. 61 – 68.
3. Hähner P. and Rizzi E. On the kinematics of Portevin–Le Chatelier bands: theoretical and numerical modelling // Acta Mater. – 2003. – **51**, No. 12. – P. 3385 – 3397.
4. Skoczeń B., Bielski J., Sgobba S., and Marcinek D. Constitutive model of discontinuous plastic flow at cryogenic temperatures // Int. J. Plasticity. – 2010. – **26**, No. 12. – P. 1659 – 1679.
5. Skoczeń B., Bielski J., and Tabin J. Multiaxial constitutive model of discontinuous plastic flow at cryogenic temperatures // Ibid. – 2014. – **55**. – P. 198 – 218.
6. Емалетдинов А. К. Автоколебательные режимы пластической деформации металлов при гелиевых температурах // Физика металлов и металловедение. – 2001. – **91**, № 4. – С. 3 – 9.
7. Пустовалов В. В. Скачкообразная деформация металлов и сплавов при низких температурах // Физика низких температур. – 2008. – **34**, № 9. – С. 871 – 913.
8. Seeger A. Dislocation and Mechanical Properties of Crystals. – New York: Wiley, 1957. – 206 p.
9. Wessel E. T. Some exploratory observation of the tensile properties of metals at very low temperatures // Trans. ASME. – 1957. – **49**, No. 1. – P. 149 – 172.
10. Basinski Z. S. The instability of plastic flow of metals at very low temperatures // Proc. Royal Soc. – 1957. – **A240**. – P. 229 – 242.
11. Walsh R. P. Tension–compression testing at low temperatures // ASM Handbook, Vol. 8: H. Kuhn and D. Medlin (Eds.), Mechanical Testing and Evaluation. – 2000. – P. 164 – 171.
12. Воробьев Е. В., Анпилогова Т. В. Моделирование процесса низкотемпературной скачкообразной деформации металлов // Пробл. прочности. – 2011. – № 1. – С. 109 – 121.
13. Vorob'ev E. V. and Anpilogova T. V. Numerical analysis of the deformation instability of metals in liquid helium // Comp. Mat. Sci. – 2013. – **68**. – P. 66 – 72.
14. ГОСТ 22706-77. Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°С. – М.: Изд-во стандартов. – Введ. 01.01.79.
15. ISO 19819:2004(E). Metallic Materials – Tensile Testing in Liquid Helium.
16. Стрижало В. А., Воробьев Е. В. Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного подгружения // Пробл. прочности. – 1997. – № 3. – С. 83 – 89.
17. ДСТУ 7305:2013. Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур. – Чинний з 01.01.2014.

Поступила 06. 05. 2014