

## **Нестабильность деформации металлов при криогенных температурах и ее прикладные аспекты**

**Е. В. Воробьев, В. А. Стрижало**

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

*Рассмотрены силовые, деформационные, скоростные, энергетические и другие критерии предельных состояний в процессе низкотемпературной прерывистой текучести металлов. Показана возможность их использования для нормирования прочности и методов механических испытаний.*

**Ключевые слова:** прерывистая текучесть, предельное состояние, критерий, криогенные температуры, допускаемые напряжения, механические испытания.

**Введение.** Одной из проблем низкотемпературной прочности является необходимость оптимального учета потери устойчивости деформации металлов, т.е. влияния эффекта прерывистой текучести, который реализуется при температурах ниже 30 К [1, 2]. Характер его проявления для данного материала существенно зависит от условий нагружения – скорости деформирования, жесткости системы нагружения, от влияния электромагнитного и других физических полей, а также конструктивно-технологических факторов – величины предварительной деформации и уровня концентрации напряжений, размеров и формы деформируемого объекта [2–9] и др. Типичный для высокопрочных конструкционных сплавов резкий переход от стадии упругого деформирования к процессу высокоскоростной локализованной деформации рассматривается как скачкообразное снижение сопротивления нагружению или внезапное исчерпание несущей способности элемента конструкции вследствие появления чрезмерной деформации или разрушения [10]. Следует отметить, что используемые в настоящее время методы нормирования прочности конструкций, эксплуатируемых при температурах ниже 30 К [11–14], как и методы определения механических характеристик материалов [15, 16], недостаточно учитывают проявления эффекта низкотемпературной прерывистой текучести. Как будет показано ниже, методика его учета должна основываться на критериальной оценке предельных состояний металлических материалов, возникающих в процессе появления и развития скачкообразной деформации. Систематизировать и классифицировать полученные критерии [17] можно при рассмотрении данного процесса с позиций определяющей роли неизотермичности, адиабатичности и локальности деформации, а также с учетом его многофакторности и многостадийности.

**Предельные состояния и критерии.** Ранее авторами были представлены результаты комплексного исследования влияния упругих, инерционных, кинетических характеристик системы нагружения и конструктивно-технологических факторов на характер развития пластической деформации, прочность и особенности разрушения образцов сплавов в условиях статического и квази-

статического растяжения в среде жидкого гелия с учетом стадийности процесса накопления деформации. При этом к основным стадиям можно отнести: докритическое макрооднородное деформирование материала; потерю устойчивости процесса деформирования; собственно, скачок деформации; стадию неадиабатического деформирования непосредственно после завершения скачка.

Проведенное исследование позволяет ответить на следующие важные вопросы: произойдет ли реализация эффекта прерывистой текучести при известных условиях нагружения; возможно ли появление чрезмерной деформации или разрушения в процессе скачка или после его завершения; как изменяются параметры прерывистой текучести и стандартные механические характеристики материала под действием факторов, относящихся к условиям нагружения или к конструкционно-технологическим.

Решение этих вопросов имеет непосредственное отношение к критериальной оценке рассматриваемого эффекта. Она предполагает выявление условий и признаков наступления предельных состояний, в том числе потери устойчивости процесса накопления пластической деформации, если прерывистая текучесть начинается после стадии монотонной однородной пластической деформации или если скачок деформации реализуется непосредственно после стадии упругого деформирования (рисунок). И в том и в другом случае необходимо выполнение основного критерия: тепловой неустойчивости или “адиабатической деформации” [1]. Согласно этому критерию теплоемкость металла и соответственно температура должны быть не выше некоторого критического значения.

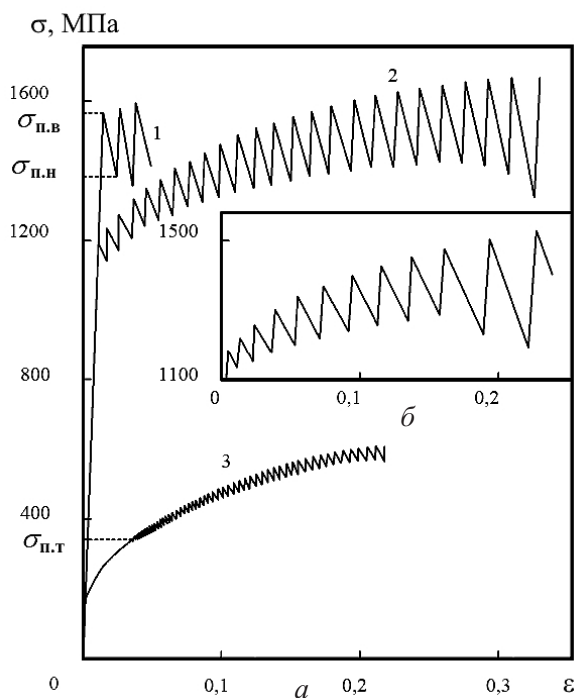


Диаграмма растяжения титанового сплава ВТ6С (1), стали 03Х20Н16АГ6 (2) и алюминиевого сплава АМг6 (3), жесткость машины  $C_M = 14,5$  МН/м – (а) и часть диаграммы растяжения стали 03Х20Н16АГ6 за участком упругого деформирования,  $C_M = 9,8$  МН/м – (б) при температуре 4,2 К.

Для случая реализации первого варианта развития эффекта должны выполняться условия, представленные следующей системой неравенств:  $c/c_k \leq 1$  или  $T/T_k \leq 1$ ;  $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_k \leq 1$ ;  $\sigma/\sigma_k \geq 1$  или  $\varepsilon/\varepsilon_k \geq 1$ , где  $c$  – объемная теплоемкость металла;  $T$  – температура;  $\varepsilon$  и  $\dot{\varepsilon}$  – пластическая составляющая деформации и ее скорость;  $\sigma$  – напряжение. (Индексом “к” обозначены критические значения.) Величине  $\sigma_k$  соответствуют критические значения как  $\varepsilon_k$ , так и модуля деформационного упрочнения  $\theta_k$ , т.е. выполняется условие  $\theta/\theta_k \leq 1$ .

Для получения комплексного критерия необходимо выделить основные параметры. Если скорость деформирования достаточно мала, она практически не влияет на температуру образца. Связь между теплофизическими параметрами дает температурная зависимость теплоемкости. Появлению скачков на диаграмме деформирования соответствует определенная точка, координаты которой (истинные напряжение  $\sigma_k$  и деформация  $\varepsilon_k$ ) и являются критическими величинами в силовом и деформационном критериях. В этой же точке модуль деформационного упрочнения уменьшается до критического значения  $\theta_k$ , по достижении которого термические эффекты, инициирующие и стимулирующие прерывистую текучесть, уже не подавляются [17, 18].

Связь между механическими параметрами устанавливается с помощью уравнения состояния  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  и уравнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ , а определить их критические величины можно, получив экспериментально при данной температуре одну из них, а именно: предел прерывистой текучести  $\sigma_{п.т}$  (рисунок), истинное значение которого равно  $\sigma_{k_0}$ . Отметим, что эффект исследуется в его

техническом аспекте, поэтому для определения характеристики  $\sigma_{п.т}$  необходимо ограничить область регулярной прерывистой текучести, исключив область неопределенности – так называемой квазигомогенной пластической деформации. Эта область характеризуется наличием микроскачков, сопровождаемых малыми всплесками температуры [9]. Границу регулярной области можно установить, задавшись условием для первого регистрируемого спада нагрузки  $\Delta P_c = \Delta P_{нор}$ , где  $\Delta P_{нор}$  – некоторая величина, определяющая границу значимости. Это условие является техническим критерием потери устойчивости деформации. Оптимальной для практикуемых масштабов регистрации диаграмм растяжения металлических материалов представляется норма  $\Delta P_{нор} = 0,01P_0$ , где  $P_0$  – исходный уровень нагрузки.

Очевидно, что критические значения теплофизических и механических параметров также взаимосвязаны: с повышением температуры область появления скачков на диаграмме сдвигается вправо, т.е. большим значениям  $c_k$ ,  $T_k$  соответствуют большие  $\sigma_k$ ,  $\varepsilon_k$ . Таким образом, комплексный критерий, который формулирует условие реализации предельного состояния потери устойчивости процесса пластической деформации, может включать лишь два определяющих параметра и рассматриваться как температурно-силовой.

Полученное критериальное соотношение [19, 20]

$$\sigma_k = \frac{\rho E}{k_c k_T \beta_k} (k_3 T + k_\phi T_k^3)$$

может быть представлено в виде

$$\sigma_k = \frac{\rho}{c_0 \beta_k} (k_3 T_k + k_\phi T_k^3) \beta_0 \sigma_{k_0}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $E$  – модуль упругости;  $k_3$  и  $k_\phi$  – коэффициенты температурной зависимости теплоемкости;  $k_c$  – коэффициент пропорциональности;  $k_T$  – коэффициент температурного разупрочнения;  $c_0$  – исходное значение теплоемкости;  $\beta_0$  – характеристика трансформации энергии;  $\beta_k = \beta(\sigma_k)$ . Вид этой функции, как и величина  $\beta_0$ , вычисляемая для заданного  $\sigma_{k_0}$ , устанавливается на основании зависимости [18]  $\beta = (1 + k_\beta \theta / \sigma)^{-1}$ , где  $k_\beta \approx 0,05$ ,  $\theta = \theta(\sigma)$ , и принятого уравнения состояния, позволяющего сформулировать зависимость модуля упрочнения от напряжения. Для уравнений вида  $\sigma = A \varepsilon^m$  или  $\sigma = \sigma_T + B \varepsilon^n$ , где  $A$ ,  $m$ ,  $B$  и  $n$  – постоянные;  $\sigma_T$  – предел текучести, получаем соответственно

$$\beta = [1 + k_\beta (\sigma_b / \sigma)^{1/m}]^{-1}, \quad m = \varepsilon_b$$

или

$$\beta = \{1 + k_\beta \sigma_b (\sigma_b - \sigma_T)^{(1-n)/n} / [\sigma (\sigma - \sigma_T)^{(1-n)/n}]\}^{-1}, \quad n = \sigma_b \varepsilon_b / (\sigma_b - \sigma_T),$$

где  $\sigma_b$ ,  $\varepsilon_b$  – истинные напряжение и деформация, соответствующие максимальной нагрузке.

И в том и в другом случае, принимая  $\sigma = \sigma_{k_0}$ , можно рассчитать величину  $\beta_0$ , а, заменив  $\sigma$  величиной  $\sigma_k$ , получить искомую функцию  $\beta_k = \beta(\sigma_k)$ .

В отличие от уравнения (1), требующего применения численных методов, решение обратной задачи, т.е. определение  $T_k$  для заданного  $\sigma_k$ , может быть получено аналитически. Для этого преобразуем (1) к виду

$$T_k^3 + \rho T_k + q = 0 \quad (2)$$

и определим действительный положительный корень как

$$T_k = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{Q}},$$

где

$$Q = (p/3)^3 + (q/2)^2; \quad p = k_3/k_\phi; \quad q = -\frac{c_0 \beta_k \sigma_k}{\rho \beta_0 \sigma_{k_0} k_\phi}.$$

Соотношения (1), (2) включают лишь две константы материала: теплоемкость и предел прерывистой текучести. Они описывают в плоскости  $\sigma - T$  некоторую кривую, являющуюся нижней границей области неустойчивости пластической деформации. Замыкают эту область прямые  $\sigma = \sigma_b$  и  $T = 0$ . Возможность использования данного комплексного критерия показана на примере алюминиевого сплава АМг6 и стали 03Х20Н16АГ6, характеристики прочности которых существенно различаются [19, 20].

Уравнения (1), (2) получены в предположении, что температура образца  $T$  практически не отличается от номинальной, соответствующей температуре хладагента  $T_0$ , так как скорость деформирования  $\dot{\epsilon}$  достаточно мала. Однако в противном случае скорость  $\dot{\epsilon}$  может влиять на характер деформирования на всех стадиях развития эффекта прерывистой текучести, в связи с чем можно сформулировать ряд кинетических критериев. В частности, на докритической стадии упругопластического деформирования может происходить существенное повышение температуры образца за счет работы деформирования, определяющей мощность тепловыделения  $\beta\sigma\dot{\epsilon}$ . Из уравнения энергетического баланса, составленного с учетом теплообмена с окружающей средой при наступлении теплового равновесия ( $dT/dt = 0$ ), получено соотношение, связывающее прирост температуры образца  $\Delta T_p$  со скоростью деформирования [21]:

$$\dot{\epsilon} = \Delta T_p q S / (V_p \beta \sigma), \quad (3)$$

где  $q$  – коэффициент теплоотдачи, который зависит от вида хладагента и режима его кипения;  $S$  – площадь поверхности рабочей части образца;  $V_p$  – ее объем.

С помощью уравнения (3) можно рассчитать предельную скорость деформирования  $\dot{\epsilon}_{к.в.}$ , при которой  $\Delta T_p \leq 1$  К, и в среде жидкого хладагента, например гелия\*, сохраняется режим наиболее интенсивного теплообмена, что гарантирует для сплавов криогенной техники реализацию эффекта прерывистой текучести (первый кинетический критерий). Если величина  $T = T_0 + \Delta T_p$  становится равной температурной границе  $T_{к.макс}$  существования эффекта прерывистой текучести, то соответствующее значение  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_к$  является критическим (второй кинетический критерий). Для стандартных образцов аустенитных сталей и титановых сплавов диаметром 3 мм в среде жидкого гелия расчет дает  $\dot{\epsilon}_к \approx (4,0 \dots 7,7) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , причем эта величина тем меньше, чем прочнее материал. Как показали эксперименты, в этом интервале эффект прерывистой текучести полностью подавляется, и диаграммы деформирования становятся монотонными. Это вызывает значительное изменение механических характеристик материалов: пределы прочности уменьшаются примерно на 20%, относительное удлинение – в два раза, пределы текучести остаются практически на постоянном уровне. Аналогичным образом изменяются характер деформирования и механические характеристики в условиях мягкого режима нагружения при превышении критической величины скорости нагружения  $\dot{\sigma}_к$ , которую можно приблизительно определить как  $\dot{\sigma}_к = \theta \dot{\epsilon}_к$ , принимая значение  $\theta$  постоянным.

Если докритическая стадия накопления пластической деформации отсутствует и скачок следует непосредственно после стадии упругого деформирования материала, реализуется предельное состояние по скачкообразному снижению сопротивления нагружению или по развитию скачкообразной деформации. Это состояние наступает по достижении верхнего критического напряжения (верхнего предела прерывистой текучести  $\sigma_{п.в.}$ ) – рисунок, т.е.

\* Данный хладагент с температурой кипения 4,2 К получил широкое применение для охлаждения сверхпроводящих магнитных систем.

при  $\sigma/\sigma_{п.в} \geq 1$ , а завершается по достижении нижнего критического напряжения (нижнего предела прерывистой текучести):

$$\sigma_{п.н} = \sigma_{п.в} - \Delta\sigma_c, \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_c$  – амплитуда скачка напряжения. Для последующих скачков,  $\Delta\sigma_c$  которых достигает (рисунок) нескольких десятков процентов (для некоторых материалов до 60% [22]), соответствующие напряжения обозначим  $\sigma_0$  и  $\sigma_n$ .

Не только переход к прерывистому течению, но и развитие деформации в процессе, собственно, скачка может определять наступление соответствующего предельного состояния. Поэтому была поставлена и решена задача получения адекватной математической модели данного процесса, позволяющей описать кинетику скачка и оценить его деформационные, скоростные и силовые параметры с учетом свойств системы нагружения, в частности рассчитать величину скачкообразной деформации  $\varepsilon_c$  [23]. Условие достижения предельного состояния по развитию чрезмерной деформации или разрушения определяется соотношением

$$\varepsilon_c/\varepsilon_k \geq 1, \quad (5)$$

где критическое значение  $\varepsilon_k$  равно допускаемому  $\varepsilon_d$  или разрушающему  $\varepsilon_p$ .

Условие (5) достигается при некотором соотношении жесткости  $C$  системы образец–машина (деталь–конструкция) и модуля деформационного упрочнения материала, определяющих при данном напряжении начала очередного скачка  $\sigma_0$  соответственно величины запаса упругой энергии и работы деформирования. Условие разрушения можно представить в виде энергетического критерия

$$C/C_k \leq 1. \quad (6)$$

Учитывая, что запас упругой энергии, часть которой расходуется на удельную работу скачкообразной деформации, составляет  $\Delta W = P_0^2/(2CV)$ , где  $P_0 = \sigma_0 F$ ;  $V = \pi R^2 l$ ;  $R$  – радиус поперечного сечения образца;  $l$  – длина зоны течения, и, принимая  $l \sim R$ , из уравнения энергетического баланса при  $\theta = \text{const}$ ,  $\beta = \text{const}$  и  $\varepsilon_k = \delta$  получаем соотношение, связывающее указанные параметры, в виде

$$C_k = k\sigma_0 R/\delta, \quad (7)$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент пропорциональности;  $\delta$  – относительное удлинение образца после разрыва.

В подгружаемой системе действует еще один фактор – скорость деформирования или нагружения, который, в отличие от жесткости, может влиять на характер прерывистой деформации на всех стадиях ее развития. В рассматриваемом случае внезапного проявления эффекта этот фактор не ограничивает возможность реализации скачка деформации, но может существенно влиять на его величину и кинетику. Для изучения этого случая построена



математическая модель для подгружаемой системы [23]. Исследование модели, проведенное на примере образцов стали 03Х20Н16АГ6, показывает, что увеличение общей величины скачкообразной деформации более чем на 5% происходит лишь при скоростях деформирования, превышающих  $30 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , т.е. систему образец–машина в условиях статического нагружения можно рассматривать как неподгружаемую и использовать соответствующую (более простую) модель [23].

По завершении скачка влияние подгружения может стать очень существенным даже при относительно малых величинах  $\dot{\epsilon}$ , поскольку ход дальнейшего процесса деформирования (уже неадиабатического) определяется соотношением интенсивности упрочнения материала за счет деформации и охлаждения и интенсивности геометрического разупрочнения в образующейся шейке. Получим кинетический критерий разрушения в виде

$$\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_p \geq 1, \quad (8)$$

где  $\dot{\epsilon}_p$  – третья критическая скорость деформирования,  $\dot{\epsilon}_p = k_T \nu / (\sigma_H - \theta)$ ;  $\nu$  – скорость охлаждения, определяемая формой и размерами образца, а также характеристиками хладагента;  $\sigma_H$  – нижний уровень напряжения, аналогичный  $\sigma_{п.н}$  (рисунок).

Очевидно, что дополнительным условием разрушения будет выполнение неравенства

$$\theta / \sigma_H > 1, \quad (9)$$

из которого следует, что величина  $\theta = \sigma_H$  является критической. В типичных случаях  $\dot{\epsilon}_p$  имеет порядок  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, в связи с различными проявлениями неустойчивости деформации металлических материалов в условиях глубокого охлаждения и реализации эффекта прерывистой текучести обнаружены следующие предельные состояния материала, которым соответствуют определенные критерийные характеристики.

1. Потеря устойчивости упругопластического деформирования вследствие качественного изменения его механизма. Основное условие – снижение температуры и соответственно теплоемкости ниже критической. В этой связи существует первый кинетический критерий, обеспечивающий достаточно низкую мощность тепловыделения на докритической стадии гомогенной пластической деформации, и второй, выполнение которого приводит к полному подавлению эффекта прерывистой текучести. Соответствующие критические значения определяются с помощью уравнения (3). Переход от плавной (гомогенной) к скачкообразной (локализованной) деформации характеризует предел прерывистой текучести  $\sigma_{п.т}$  (показан на рисунке для алюминиевого сплава АМг6). Ему соответствуют критические величины деформации и модуля деформационного упрочнения.

2. Резкий переход от стадии упругого деформирования к скачкообразному локализованному пластическому течению. Реализуется по достижении верхнего предела прерывистой текучести  $\sigma_{п.в}$ . Скачкообразный спад напря-

жения  $\Delta\sigma_c$  определяет согласно (4) нижний предел прерывистой текучести  $\sigma_{п.н}$ , при котором скачок невозможен (данные критические напряжения показаны на рисунке на примере титанового сплава ВТ6С).

3. Достижение чрезмерной деформации или разрушения в процессе скачка по механизму адиабатического сдвига в неподгружаемой системе либо при статическом нагружении. Реализуется при превышении критического значения запаса упругой энергии, определяемого жесткостью системы нагружения (соотношения (5)–(7)).

4. Переход к неадиабатическому локализованному пластическому деформированию возможен непосредственно по завершении скачка в подгружаемой системе. В этом случае дальнейший спад нагрузки и разрушение реализуются при достижении третьей критической скорости деформирования и соответствующем критическом значении модуля упрочнения (соотношения (8), (9)).

**Практические приложения.** Одним из основных элементов расчета прочности конструкции является определение оптимальных величин допускаемых напряжений. В условиях неустойчивости деформации при температурах ниже 30 К эта задача осложняется неопределенностью опасных напряжений, в качестве которых традиционно служат условный предел текучести и предел прочности. Возникает важный практический вопрос выбора меры прочности материала в данных условиях.

Предел прочности достигается в условиях неизотермичности и неоднородности деформации и его значение зависит от условий нагружения [4, 7, 21]. Величина верхнего предела прерывистой текучести  $\sigma_{п.в}$  также характеризуется неопределенностью – она может быть большей или меньшей в зависимости от уровня вибрации установки, действия других внешних факторов. Иницирование “преждевременного” скачка возможно в результате действия импульса энергии: тепловой, электромагнитной, механической (импульсного подгружения) и т.д. [9, 10]. Как показывают проведенные эксперименты, напряжение  $\sigma_{п.в}$  является верхней границей опасных (недопустимых) напряжений, а на уровне нижнего предела прерывистой текучести  $\sigma_{п.н}$  иницирование преждевременного скачка становится невозможным. В таком случае  $\sigma_{п.н}$  приобретает особое значение как граница безусловно устойчивых (безопасных) состояний материала. Эта характеристика нашла применение в методе [10]. В случае, когда в силу жестких конструктивно-технологических требований возникает необходимость максимального использования прочностных ресурсов материала, для определения допускаемых напряжений при данной температуре  $[\sigma^T]$  также используется указанное граничное значение:

$$[\sigma^T] = [\sigma^{293\text{K}}] + (\sigma_{п.н}^T - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}) / n_T,$$

где  $\sigma_{0,2}^{293\text{K}}$  – условный предел текучести при температуре 293 К;  $n_T$  – коэффициент запаса прочности.

Такой подход, в отличие от [11–14], позволяет исключить возможность проявления эффекта и его негативные последствия. Очевидно, что наряду с этим требуется достаточная точность расчета напряженно-деформированного



состояния соответствующих элементов конструкций с учетом экстремальных режимов работы.

Другим важным практическим приложением настоящего исследования является нормирование методов механических испытаний металлов. Необходимость и возможность усовершенствования и модернизации действующей нормативной базы обсуждалась ранее [7, 9, 21, 24–26]. Скорость деформирования оказывает наиболее существенное влияние на механические характеристики материалов, определяемые при статическом растяжении. Учитывая, что критические скорости соотносятся как  $\dot{\epsilon}_{к.в} < \dot{\epsilon}_к < \dot{\epsilon}_р$ , нормирование должно проводиться по первой из них, т.е. с использованием первого кинетического критерия с соответствующим экспериментальным подтверждением. Исследования показывают, что при проведении испытаний металлов на растяжение в среде жидкого гелия критическая скорость не должна превышать  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  [9, 21].

При докритических скоростях деформирования наиболее важным фактором условий нагружения является жесткость системы образец–машина, определяемая в основном жесткостью машины  $C_m$ . При снижении жесткости изменяется вид диаграмм растяжения – их протяженность по оси деформации уменьшается, снижается число скачков деформации и увеличиваются ее приросты (рисунок). Соответственно изменяются механические характеристики – снижаются относительное удлинение и предел прочности [7]. Тем не менее до настоящего времени нормативными документами жесткость машины не регламентирована [15, 16]. Поэтому для устранения этого недостатка может быть предложен следующий подход: жесткость машины должна быть ограничена снизу такой величиной, которая соответствует критическому запасу упругой энергии в системе нагружения и для подавляющего большинства материалов позволяет получить максимальные или близкие к ним значения предела прочности и относительного удлинения после разрыва,  $C_m \geq 14 \text{ МН/м}$ .

Важным является выбор типоразмеров образцов для условий реализации эффекта низкотемпературной прерывистой текучести. С учетом многократного шейкообразования при скачках деформации в данном случае критерием может служить показатель жесткости напряженного состояния образца в шейках  $k_r = \sigma_m / \sigma_i$ , где  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ ;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Ранее показано [24, 25], что для плоских образцов, в отличие от цилиндрических, имеет место весьма значительное отклонение напряженного состояния от линейного (более 50%). Поэтому следует рекомендовать преимущественное использование цилиндрических образцов. А в связи с сильным проявлением масштабного эффекта [6, 26] для получения сопоставимых значений механических характеристик необходимо максимально сузить спектр размеров образцов, рекомендованных к использованию в качестве стандартных (например, пятикратные образцы диаметром 3 и 4 мм).

Таким образом, разработан комплекс силовых, деформационных, скоростных, энергетических и других критериев различных видов предельных состояний, наступающих при реализации эффекта низкотемпературной прерывистой текучести, и показаны возможности их практического использования для нормирования прочности и методов механических испытаний металлических материалов.

## Резюме

Розглянуто силові, деформаційні, швидкісні, енергетичні та інші критерії граничних станів у процесі низькотемпературної переривчастої плинності металів. Показано можливість їх використання для нормування міцності та методів механічних випробувань.

1. *Basinski Z. S.* The instability of plastic flow of metals at very low temperatures // *Proc. Roy. Soc.* – 1957. – **A240**. – P. 229 – 242.
2. *Пустовалов В. В.* Скачкообразная деформация металлов и сплавов при низких температурах (обзор) // *Физика низких температур.* – 2008. – **34**, № 9. – С. 871 – 913.
3. *Shibata K., Sakamoto H., Fujita K., and Fujita T.* Effect of testing conditions on serration of austenitic steels in liquid helium // *Trans. Iron Steel Inst. Jap.* – 1988. – **25**, No. 2. – P. 136 – 142.
4. *Reed R. P. and Walsh R. P.* Tensile strain rate effects in liquid helium // *Proc. 7th Int. Conf. on Cryogenic Materials* (St. Charles, June 14–18, 1987). – New York; London, 1988. – **34**. – P. 199 – 208.
5. *Lee H. M.* Load-controlled tensile tests of austenitic steels at 4 K // *Adv. Cryog. Eng. Mater.* – 1990. – **36**, Pt. 8. – P. 1273 – 1282.
6. *Strizhalo V. A., Bugaev V. Yu., and Medved' I. I.* Effect of the scale on special features of deformation of structural alloys in static loading at low temperatures (4.2 K) // *Strength Mater.* – 1990. – **22**, No. 5. – P. 698 – 704.
7. *Vorob'ev E. V.* On the effect of loading system rigidity on strain resistance and the fracture of alloy specimens on deep cooling // *Ibid.* – 2001. – **33**, No. 1. – P. 62 – 65.
8. *Vorob'ev E. V. and Strizhalo V. A.* Deformation and fracture of 03Kh20N16AG6 steel under nonuniform stress at temperatures down to 4.2 K // *Ibid.* – 2003. – **35**, No. 2. – P. 136 – 139.
9. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. Т 1. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
10. *Vorob'ev E. V. and Strizhalo V. A.* Standardization of the strength of metals under the conditions of low-temperature instability of plastic deformation and the action of strong magnetic fields // *Strength Mater.* – 1999. – **31**, No. 5. – P. 459 – 466.
11. *ОСТ 26-04-2585-86.* Техника криогенная и криогенновакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность конструкций. – Введ. 01.07.86.
12. *РТМ 56-60.* Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность элементов и узлов из пластичных в условиях эксплуатации металлов. – Введ. 01.10.69.
13. *Superconducting Coils and Structures Division.* Design Criteria and Data Base. Table of Constants. – R 1.01.94-06-30WD. – No. 11. – 23 p.

14. *Mitchell N.* Mechanical and Electrical Design Criteria for the ITER Magnets. – ITER-IL-MG-1-8-3, 1990. – 45 p.
15. *ГОСТ 22706-77.* Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269°С. – Введ. 01.09.88.
16. *ISO 19819:2004.* Metallic Materials – Tensile Testing in Liquid Helium.
17. *Воробйов Є. В.* Нестабільність деформування та зміцнення матеріалів в умовах глибокого охолодження: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2004. – 35 с.
18. *Стрижало В. О., Воробйов Є. В.* Енергетичні перетворення під час низькотемпературного переривчастого течіння металів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 5. – С. 71 – 74.
19. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* К вопросу о критериях и механизмах низкотемпературной прерывистой текучести // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2004. – Вип. 23. – С. 21 – 26.
20. *Прочность материалов и конструкций /* Под ред. В. Т. Трощенко и др. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
21. *Vorob'ev E. V.* Effect of deformation rate on the strength and deformability of alloys at 4.2 K // *Strength Mater.* – 2000. – **32**, No. 6. – P. 549 – 554.
22. *Шнейцман В. В., Николаев В. И., Смирнов Б. И. и др.* Низкотемпературная деформация нанокристаллического ниобия // *Физика твердого тела.* – 2000. – **42**, № 6. – С. 1034 – 1037.
23. *Vorob'ev E. V. and Strizhalo V. A.* Development of low-temperature jumpwise deformation of metals and possibilities of its elimination // *Strength Mater.* – 1999. – **31**, No. 1. – P. 28 – 37.
24. *Vorob'ev E. V.* Peculiarities of neck formation under low-temperature discontinuous yield of metals. Pt. 1. Axisymmetric deformation // *Ibid.* – 2008. – **40**, No. 3. – P. 350 – 355.
25. *Vorob'ev E. V.* Peculiarities of neck formation under low-temperature discontinuous yield of metals. Pt. 2. Plane strain // *Ibid.* – No. 4. – P. 439 – 444.
26. *Vorob'ev E. V.* On mutual effects of size-scale factor and low-temperature intermittent yielding // *Ibid.* – 2002. – **34**, No. 4. – P. 375 – 380.

Поступила 25. 11. 2009