

Инвариантная форма критерия динамической текучести металлов

© А.А. Груздков, Ю.В. Петров, В.И. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет,
191119 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dyn@unicorn.math.spbu.edu

(Поступила в Редакцию 28 декабря 2001 г.)

Известные динамические критерии текучести металлов обобщаются на случай любого напряженно-деформированного состояния и нагружения произвольной длительности. Как частный случай получаются критерии для одноосного растяжения и чистого сдвига. Рассчитанные на основе предложенного критерия зависимости предела текучести от скорости деформации сопоставляются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-01-00718, проект ЦКП 00-01-05020), а также федеральной целевой программы „Интеграция“.

При медленном одноосном растяжении или сжатии традиционно предполагается, что материал переходит в пластическое состояние при достижении нагрузкой критической величины (предела текучести). Критерий текучести в этом случае можно записать в виде

$$\sigma(t) \leq \sigma_Y, \quad (1)$$

где σ_Y — предел текучести при медленном одноосном растяжении.

Классическими обобщениями критерия (1) на случай произвольного напряженного состояния являются критерии текучести Треска и Мизеса, причем для большинства материалов точнее оказывается последний

$$T_k(t) \leq \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где

$$T_k = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

— интенсивность касательных напряжений, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения. Данный критерий позволяет, во-первых, рассматривать сложное напряженное состояние и, во-вторых, сопоставлять данные испытаний по различным схемам (например, при изгибе и растяжении). В случае напряженного состояния критерий (2) переходит в (1), а в случае чистого сдвига — в условие

$$\tau(t) \leq \tau_Y, \quad (3)$$

где τ — напряжение сдвига, а $\tau_Y = \sigma_Y/\sqrt{3}$ — предел текучести при сдвиге.

Хорошо известно, что в случае кратковременных нагрузок критерии (1), (2) перестают адекватно описывать поведение материала. Традиционные попытки скорректировать эти критерии, заменив статический предел

текучести на некоторую функцию скорости деформации, имеют ряд серьезных недостатков. Во-первых, утрачивается инвариантность, т.е. происходит жесткая привязка к определенному типу испытаний (нагружению с постоянной скоростью), а это делает затруднительным сопоставление результатов, полученных при других схемах нагружения. Во-вторых, во многих случаях скорость деформации не может считаться постоянной даже приближенно. К таким ситуациям относятся, например, импульсное (ударное) нагружение и испытания на задержку текучести под действием постоянной, мгновенно приложенной нагрузки. Наконец, построение экспериментальной диаграммы $\sigma_Y(\dot{\epsilon})$ связано с большими техническими трудностями, особенно если учесть сильное влияние температуры, структурных особенностей материала (размера зерна и пр.) и т.д.

Проблема построения динамического критерия текучести связана с экспериментальным определением некоторой инвариантной характеристики процесса, которая бы не зависела от конкретного способа воздействия. По результатам многочисленных экспериментальных исследований было отмечено [1], что для высокоскоростного нагружения зависимость напряжения текучести (σ_*) от времени перехода в пластическое состояние (t_*) хорошо описывается прямой в логарифмических координатах, т.е. зависимостью вида

$$\alpha \lg \sigma_* + \lg t_* = \text{const.}$$

Проведенный нами анализ различных вариантов обобщений этого соотношения на случай произвольного закона изменения напряжения во времени показал, что в лучшем качественном согласии с экспериментальными данными по кратковременным нагружениям находится критерий, предложенный Кэмпбеллом [2],

$$\int_0^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_0} \right)^\alpha ds \leq C \quad (C = \text{const}), \quad (4)$$

где σ — текущее напряжение, σ_0 — предел текучести при температуре абсолютного нуля, α — безразмерный параметр. Время перехода в пластическое

состояние t^* соответствует минимальному значению времени t , для которого в (4) реализуется равенство. Достоинством данного критерия является то, что он применим для произвольного изменения напряжения во времени. Недостатками — то, что он применим только к одноосному растяжению или сжатию и то, что сфера его применимости ограничивается нагрузками очень малой длительности. Действительно, критерий (4) противоречит критерию (1) и, начиная с определенной длительности нагружения, дает сильно заниженные по сравнению с экспериментальными данными значения пороговой величины напряжения текучести. Переход к квазистатическому случаю в рамках предельного условия (4) оказывается невозможным, в связи с чем и положение динамической ветви на соответствующей диаграмме временной зависимости текучести остается неопределенным. Для случая одноосного растяжения эти недостатки были устранены с помощью модификации, предложенной в [3–5],

$$\int_{t-t_{\text{inc}}}^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq t_{\text{inc}}, \quad (5)$$

где t_{inc} — инкубационное время, которое характеризует скорость протекания определенных процессов в структуре материала. Поскольку переход в пластическое состояние связан с развитием дислокационной структуры, логично предположить, что эта величина связана с временными характеристиками движения дислокаций, а именно, что t_{inc} обратно пропорционально скорости движения дислокаций v . Для последней можно взять зависимость, предложенную Гилманом [6],

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right),$$

где ΔG — свободная энергия активации, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Отсюда получим соотношение для инкубационного времени в следующем виде:

$$t_{\text{inc}} = \gamma \exp\left(\frac{\Delta G}{kT}\right). \quad (6)$$

Критерий (5) показал хорошее соответствие с экспериментальными данными в широком диапазоне скоростей деформации и температур [4]. В целях обобщения критерия (5) на случай любого сложнодеформированного состояния предлагается представить его в виде

$$\int_{t-t_{\text{inc}}}^t \left(\frac{\sqrt{3}T_k(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq t_{\text{inc}}. \quad (7)$$

Рассмотрим два частных случая. Пусть t_0 — характерное время нагружения. Тогда нетрудно убедиться, что в случае одноосного нагружения критерий (7) будет

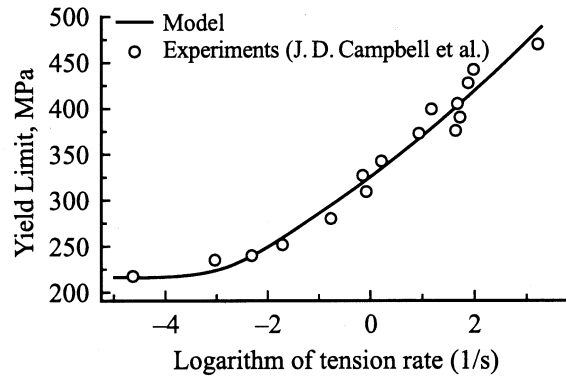


Рис. 1. Зависимость предела текучести от скорости растяжения. Кривая — расчет, точки — эксперимент [7].

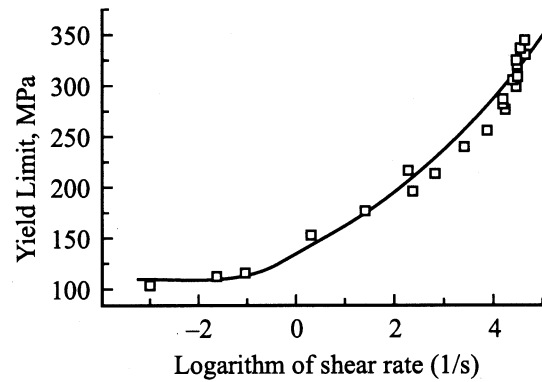


Рис. 2. Зависимость предела текучести от скорости сдвига. Кривая — расчет, точки — эксперимент [7].

совпадать с (5). При медленно меняющейся нагрузке предельный переход $t_{\text{inc}}/t_0 \rightarrow 0$ позволяет получить статический критерий (1). На рис. 1 сопоставляются расчетная зависимость предела текучести от скорости деформации ($\alpha = 17$, $t_{\text{inc}} = 0.1$ s, $\sigma_Y = 215$ MPa) и экспериментальные данные работы [7] для одноосного нагружения с постоянной скоростью.

В случае чистого сдвига $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$ и, следовательно, $T_k(t) = \tau(t)$. Тогда неравенство (7) примет вид

$$\int_{t-t_{\text{inc}}}^t \left(\frac{\tau(s)}{\tau_Y} \right)^\alpha ds \leq t_{\text{inc}},$$

а переход к статике приводит к критерию (3). На рис. 2 показаны расчетная зависимость предела текучести от скорости сдвига ($\alpha = 11$, $t_{\text{inc}} = 5 \cdot 10^{-4}$ s, $\tau_Y = 110$ MPa) и экспериментальные данные работы [7]. Как видно из рисунков, наблюдается хорошее соответствие предложенной модели с экспериментом.

Список литературы

- [1] Ю.В. Суворова. ПМТФ 3, 55 (1968).
- [2] J.D. Campbell. Acta Metallurgica **1**, 6, 64 (1953).
- [3] А.А. Груздков, Ю.В. Петров. Тр.1-й Всесоюз. конф. „Технологические проблемы прочности несущих конструкций“. Запорожье. (1991). Т. 1. Ч. 2. С. 287.
- [4] А.А. Груздков, Ю.В. Петров. Доклады РАН **364**, 6, 786 (1999).
- [5] Н.В. Морозов, Ю.В. Петров. Проблемы динамики разрушения твердых тел. Изд-во С.-Петербургского ун-та, СПб (1997). 132 с.
- [6] M.A. Meyers. Dynamic behavior of materials. John Wiley, N. Y. (1994). Ch. 13. P. 323.
- [7] J.D.C. Campbell, W.G. Ferguson. Philos. Mag. **21**, 169, 63 (1970).