

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77

В. Н. Трофимов

МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Обработка металлов давлением без образования поверхностных и внутренних трещин является актуальной задачей. Для процессов холодной пластической деформации широкое применение получил критерий линейного накопления поврежденности [1]. Богатовым А.А. предложен критерий, учитывающий нелинейный характер накопления поврежденности [2, 3].

При получении указанных критериев авторы работ [1–3] принимали условие независимости левой и правой частей кинетических уравнений.

Развитием моделей накопления поврежденности является модель, предложенная в работе [4], учитывающая тот факт, что процесс пластической деформации является автомодельным [5]. При получении критерия разрушения авторы [4] использовали уравнение вида $d\psi/dt = f(\psi, t)$.

Критерий, предлагаемый в данной работе, основан на положении о том, что пластическая деформация сопровождается процессами упрочнения и трещинообразования и может быть представлена как последовательность трех этапов, различающихся по механизмам происходящих процессов:

Этап 1. Идет генерация дислокаций, плотность которых возрастает от 10^9-10^{10} до $10^{13}-10^{14} \text{ м}^{-2}$. Параллельно идут процессы зарождения и аннигиляции планарных дефектов – субмикро- и микротрещин, объемная плотность D которых практически не меняется.

Этап 2. Смена механизма накопления поврежденности от дислокационного к микроразрушению. Плотность дислокаций достигает величины $10^{14}-10^{15} \text{ м}^{-2}$. Объемная плотность планарных дефектов D растет.

Этап 3. Плотность дислокаций не изменяется, а плотность планарных дефектов растет и в момент достижения критической плотности D_{cr} происходит лавинообразный процесс их объединения в макротрещину и разрушение.

Оценка продолжительности этапа 1 с использованием кинетической модели, предложенной

в работе [6], показывает, что максимальная плотность дислокаций достигается уже при степени деформации $\varepsilon \approx 0,05-0,1$, что намного меньше степеней деформации, достигаемой в процессах ОМД. Поэтому время до разрушения определяется продолжительностью и характером течения второго и третьего этапов.

Так как процесс холодной пластической деформации связан с изменением энергетического состояния деформируемого металла, то деформируемое тело может рассматриваться как термодинамическая система, в которой процесс накопления необратимых изменений структуры должен быть нелинейным и описываться кинетическими уравнениями нелинейной динамики.

В нелинейной динамике подобные процессы, когда наблюдается постепенный рост исследуемой величины и ее лавинообразное увеличение при достижении критического значения определяющего параметра, описываются кинетическими уравнениями для систем с сильной положительной связью, в которых скорость изменения исследуемой величины пропорциональна степени самой величины [7]

$$dD/dt = N^\beta, \quad \beta > 1, \quad (1)$$

где t – кинетический параметр, определяющий длительность изменения величины N , например время.

Решение уравнения (1) при условии $D|_{t=0} = D_0$ имеет вид

$$D(t) = A \cdot (t_f - t)^{1/(1-\beta)},$$

где $A = (\beta - 1)^{1/(1-\beta)}$; $t_f = [D_0 \cdot (\beta - 1)^{1/(\beta-1)}]^{1-\beta}$.

Величина t_f , по достижении которой наблюдается бесконечно быстрый рост величины N , называется временем обострения, а поведение решений, при которых исследуемая величина за малое конечное время возрастает до бесконечности, называются режимами с обострением. Вплоть до

момента t_f для решения уравнения (1) удовлетворяются условия теоремы существования и единственности. Характерной особенностью решения уравнения (1) является то, что время обострения t_f зависит от начального значения D_0 .

Таким образом, уравнение (1) и его решение удовлетворяют описанным выше основным особенностям процесса разрушения и могут быть использованы для получения критерия разрушения при пластической деформации.

В качестве кинетического параметра может быть принята величина степени деформации сдвига Λ , определяемая по Ильюшину А.А.

$$\Lambda = \int_0^T H d\tau,$$

где T – длительность процесса пластической деформации.

Однако величина Λ определяет только геометрические особенности процесса пластической деформации. Поэтому в качестве кинетического параметра используем величину, которая удовлетворяет следующим требованиям:

- определяет изменение энергетического состояния деформированного металла;
- отражает влияние изменения структуры в процессе пластической деформации;
- содержит параметры, отражающие изменение геометрии деформируемого тела.

Указанным требованиям удовлетворяет безразмерный параметр, определяемый как нормированная величина удельной энергии u [8]:

$$\bar{u} = u_V / u_0 = \bar{m} \Lambda^{2n} \quad (0 \leq \bar{u} \leq \bar{u}_{cr}, \quad 0 \leq \Lambda \leq \Lambda_p),$$

где $u_V = (\sigma_S - \sigma_{S0})^2 / 2E$; $u_0 = \sigma_{S0}^2 / 2E$; $\bar{m} = (m / \sigma_{S0})^2$; m и n – коэффициенты в уравнении кривой упрочнения $\sigma_S = \sigma_{S0} + m\Lambda^n$; \bar{u}_{cr} и Λ_p – нормированная удельная энергия и степень деформации сдвига в момент разрушения.

Примем, что процесс пластической деформации можно разбить на этапы, в пределах каждого из которых процесс пластической деформации является монотонным или близким к нему и коэффициент β остается постоянным.

Для i -го этапа деформирования кинетическое уравнение (1) примет вид

$$dD_i / d\bar{u} = D_i^{\beta_i}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) с учетом $d\bar{u} = 2n\bar{m}\Lambda^{2n-1}d\Lambda$ и начального условия $D_{i|\Lambda=0} = D_0$ имеет вид

$$D_i(\Lambda) = D_{0i} \cdot \left[1 - \frac{\bar{m}(\beta_i - 1)}{D_{0i}^{1-\beta_i}} \Lambda_i^{2n} \right]^{1/(1-\beta_i)}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) определим предельное значение степени деформации сдвига

$$\Lambda_{pi} = \left(\frac{D_{0i}^{1-\beta_i}}{(\beta_i - 1)\bar{m}} \right)^{1/2n}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что допускаемая степень деформации на i -м этапе зависит от начальной плотности микротрещин D_{0i} , которая, в свою очередь, зависит от накопленной поврежденности на предыдущих этапах, коэффициента β_i , определяющего интенсивность роста плотности микротрещин и зависящего от термомеханических условий процесса деформирования, и коэффициентов, характеризующих кривую упрочнения и отражающих структурные изменения металла.

Преобразуем уравнение (3) с учетом выражения (4):

$$D_i(\Lambda) = D_{0i} \cdot \left[1 - \left(\Lambda_i / \Lambda_{pi} \right)^{2n} \right]^{1/(1-\beta_i)}. \quad (5)$$

Для деформирования без разрушения необходимо исключить режим обострения, то есть необходимо, чтобы выполнялось условие $1 - (\Lambda_i / \Lambda_{pi})^{2n} > 0$. Обозначая поврежденность символом $\bar{\Psi}$, из уравнения (5) получим условие (критерий) деформирования без разрушения:

$$\bar{\Psi}_i = \Lambda_i / \Lambda_{pi} < 1. \quad (6)$$

Критерий (6), подобный по форме записи критериям, рассматриваемым в работах [1–3], отличается от них по реализации процедуры учета накопления поврежденности: она определяется не из условия суммирования поврежденности накопленной на всех этапах, а из условия $\bar{\Psi}_i \leq 1$, проверяемого на каждом этапе.

Диапазон изменения плотности планарных дефектов, который необходим для использования формул (3)–(6), на основании данных работ [5] и [9] может быть принят равным $10^4 \leq D \leq 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Известно, что предельные степени деформации сдвига Λ_p зависят от показателя напряженного состояния k . Так как коэффициент β также определяет величину Λ_p , то должна существовать зависимость вида $\beta = \beta(k)$. Это предположение позволяет использовать обширный экспериментальный материал, накопленный авторами работ [1–3].

Порядок получения зависимости $\beta = \beta(k)$ следующий:

1. По данным работ [1–3] получают зависимость $\Lambda_p = \Lambda_p(k)$.

2. По известной зависимости $\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\Lambda^n$ и принятом значении D_0 строится тарировочный график зависимости $\Lambda_p = \Lambda_p(\beta)$ по формуле (4).

3. По графикам $\Lambda_p = \Lambda_p(\beta)$ и $\Lambda_p = \Lambda_p(k)$ строим совмещенный график и, используя метод наименьших квадратов, определяем неизвестные коэффициенты, позволяющие описать зависимость $\beta = \beta(k)$.

Обработка экспериментальных данных работ [1,2] показала, что для описания функции $\beta = \beta(k)$ наиболее универсальной является экспоненциальная зависимость вида

$$\beta = E_1 \cdot \exp(E_2 \cdot k) + E_3, \quad (7)$$

где E_1, E_2, E_3 – коэффициенты аппроксимации.

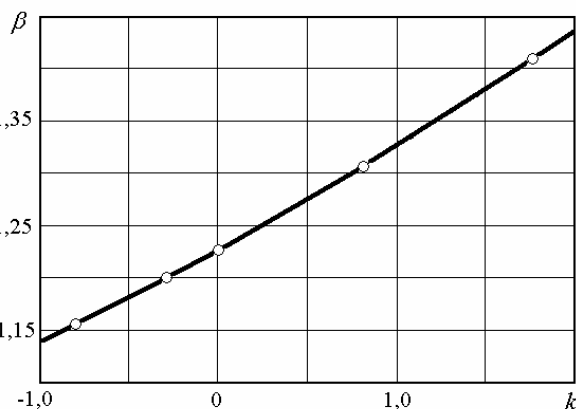
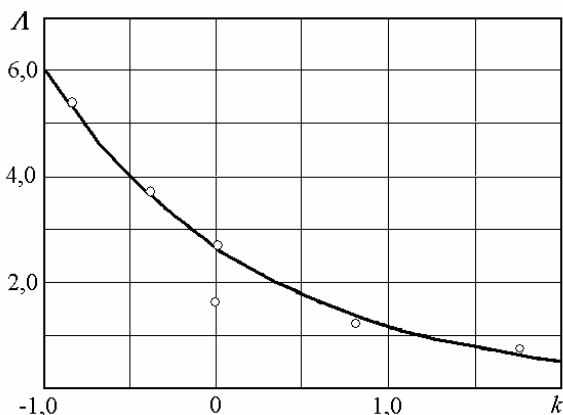


Диаграмма пластичности (а) и зависимость $\beta = \beta(k)$ (б) для стали 30:

$$\sigma_s = 588,6(1 + 0,344\Lambda^{0,778}) \text{ МПа};$$

$$\Lambda_p = 2,644 \cdot \exp(-0,825 \cdot k);$$

$$\beta(k) = 0,895 \cdot \exp(0,105 \cdot k) + 0,333$$

(отдельная точка – величина Λ_p при кручении)

Для проверки применимости предлагаемого критерия используем многочисленные экспериментальные данные для стали 30 для разных схем нагружения [1–3]. На рисунке приведена зависимость $\beta = \beta(k)$ для стали 30, полученная по данным работы [1].

Схема 1. Равномерное растяжение цилиндрических образцов ($k=0,577, \Lambda_{p_1}=1,643, \beta_1=1,2810$) + кручение до растяжения ($k=0, \Lambda_{p_2}=1,63, \beta_2=1,2854$) [2, табл. 2].

В столбце 1 (табл. 1) приведены значения степени поврежденности, рассчитанные по линейной модели накопления поврежденности [1]. Результаты расчета критерия Ψ приведены в столбце 2 (см. табл. 1). Видно, что при использовании предлагаемой методики среднее значение поврежденности для 10 образцов весьма близко к 1 и с вероятностью 95% находится в интервале 0,946–1,045.

Схема 2. Рассмотрим эксперименты на знакопеременное кручение ($\beta=1,2854$) с произвольной формой цикла [2, табл. 3]. Результаты расчета приведены в столбце 1. Видно, что среднее значение Ψ существенно превышает предельное значение, равное 1, что обусловлено немонотонностью процесса деформации.

Таблица 1

Номер опыта	1	2
	Ψ_Σ	$\bar{\Psi}$
1	1,24	1,094
2	1,18	1,049
3	1,07	0,946
4	1,25	1,063
5	1,15	0,968
6	1,06	0,921
7	1,19	1,055
8	1,06	0,921
9	1,14	0,961
10	1,14	0,973
Среднее значение:	$\Psi_{cp}=1,15 \pm 0,20$	$\bar{\Psi}_{cp}=0,995 \pm 0,049$

Таблица 2

Номер образца	1	2
	$\bar{\Psi}$	$\bar{\Psi}$
1	1,5151	0,9951
2	1,3954	0,9782
3	2,269	1,4654
4	1,2991	0,8552
5	1,6614	1,0479
6	1,1524	0,7594
7	1,394	0,9561
8	1,2536	0,9474
Среднее значение	$\bar{\Psi}=1,492 \pm 0,251$	$\bar{\Psi}=1,001 \pm 0,149$

Таблица 3

Номер этапа	Ψ_i	Схема 1		Схема 2	
		Λ_{p_i}	$\bar{\Psi}_i$	Λ_{p_i}	$\bar{\Psi}_i$
1	0,259	1,686	0,178	4,409	0,068
2	0,188	2,617	0,191	2,689	0,187
3	0,116	4,124	0,170	1,561	0,449
		$\Psi_{\Sigma} = 0,563$			

Определим среднее значение β для всех экспериментов: $\beta=1,2708$. Результаты расчета с полученным значением β (столбец 2, табл. 2) показывают хорошее соответствие результатам эксперимента и в точности не уступают результатам расчетов авторов работы [2], которые получили $\Psi=0,98\pm 0,19$.

Отметим важное достоинство предлагаемого критерия Ψ – его значения зависят от последовательности чередования этапов деформирования с различными показателями напряженного состояния. Проиллюстрируем это.

Рассмотрим трехэтапное деформирование цилиндрического образца из стали 30 по следующим схемам:

1) Схема 1: этап 1 – растяжение; этап 2 – кручение; этап 3 – сжатие.

2) Схема 2: этап 1 – сжатие; этап 2 – кручение; этап 3 – растяжение.

Степень деформации сдвига на этапах прием равной: этап 1 – $\Lambda_1=0,3$, этап 2 – $\Lambda_2=0,5$, этап 3 – $\Lambda_3=0,7$.

Определим коэффициент β : растяжение $\beta(0,58)=1,281$; кручение $\beta(0)=1,225$; сжатие

$\beta(-0,58)=1,172$. Результаты расчета приведены в табл. 3. Видно, что последовательность нагружения влияет на величину поврежденности образца: при нагружении по схеме 1 поврежденность на последнем этапе равна 0,170, а по схеме 2 – 0,449.

Расчет по линейной модели Колмогорова В.Л. показывает, что накопленная поврежденности не зависит от последовательности этапов деформирования и равна 0,563.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что данная методика позволяет достаточно точно прогнозировать ресурс пластичности для любого материала и режима нагружения и может быть использована при решении практических задач обработки металлов давлением.

Библиографический список

1. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
2. Пластичность и разрушение / Под ред. Колмогорова В.Л. М.: Металлургия, 1977. 336 с.
3. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
4. Колмогоров В.Л., Мигачев Б.А., Бурдуковский В.Г. // Металлы. № 6. 1995. С. 132–141.
5. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
6. Грешнов В.М., Лавриненко Ю.А., Напалков А.В. // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 5. С. 3–6.
7. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в нелинейную динамику. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 256 с.
8. Трофимов В.Н. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. № 5. С. 24–28.
9. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.

УДК 621

А. Е. Экк, В. Г. Шеркунов

ПОВЕДЕНИЕ ЗАГОТОВКИ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ С РАДИУСАМИ В УГЛАХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ КАНАЛА

Известен способ равноканального углового прессования, который применяют для получения изделий с ультрамелкой структурой. Однако этим способом можно получить заготовки ограниченной длины. Одним из вариантов получения длинномерных изделий может быть использование процесса непрерывного прессования «Конформ».

В основе этого способа лежит использование активных сил трения. На рис. 1 изображена схема процесса непрерывного прессования «Конформ». Устройство состоит из движущегося контейнера (колеса) и неподвижного инструмента (называемого башмаком), который вместе с колесом создает закрытый калибр. Заготовка задается в зазор между