

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.374

Сопротивление металлов деформации при ударном нагружении

Г. В. Степанов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты испытаний металлов на ударное растяжение–сжатие и ударное индентирование. Установлено значительное повышение сопротивления металлов деформации с ростом скорости растяжения–сжатия и умеренной скорости индентирования. При высокой скорости индентирования динамическая твердость, определяемая величиной удельной (на единицу объема смещенного материала) энергии образования конической каверны, снижается. Учет совместного влияния вязкости, повышения температуры в процессе пластической деформации и ее локализации позволяет объяснить указанный эффект.

Ключевые слова: ударное нагружение, сопротивление деформации, скорость деформации, растяжение, сжатие, индентирование.

Введение. В литературных источниках широко представлены результаты исследований влияния скорости деформации на структуру и сопротивление металлов деформации, особенно в диапазоне высоких скоростей деформации, превышающих 10^4 с^{-1} , что характерно для ударного и взрывного нагружения. Как следует из результатов испытаний на растяжение–сжатие, сопротивление деформации при скорости деформации $> 10^5 \text{ с}^{-1}$ [1, 2] в несколько раз выше, чем при статическом нагружении (рис. 1).

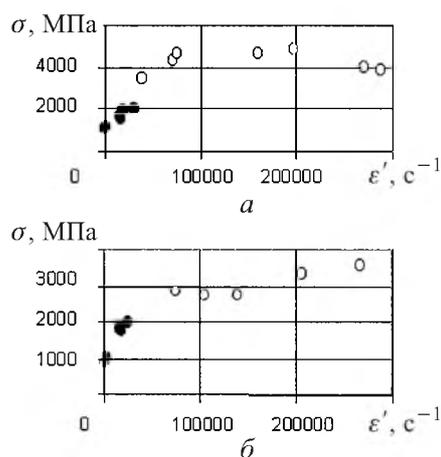
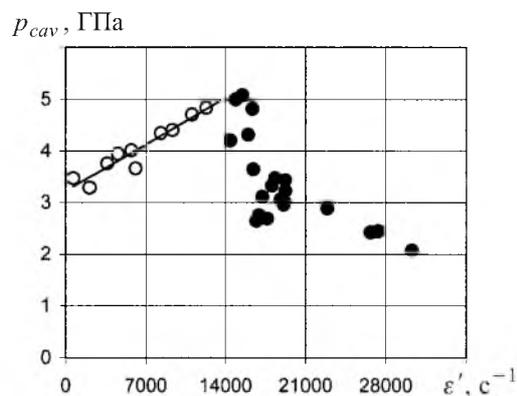


Рис. 1. Зависимость предела текучести при сжатии (светлые точки) высокопрочной стали (а) и титанового сплава (б) от скорости деформации (темные точки – результаты испытаний на растяжение).

Испытания на динамическую твердость (среднее давление на поверхности контакта при внедрении в пластину жесткого индентора) позволяют определить влияние скорости деформации в широком диапазоне ее изменения [3–5]. Твердость принимается равной удельной работе перемещения материала при образовании каверны ударом индентора $H = (\delta K / \delta h) / (\pi h^2)$ (приращение радиуса каверны δh соответствует изменению кинетической энергии индентора δK). Текущая средняя скорость деформации в металле у поверхности конической каверны радиусом r при скорости индентора V оценивается величиной $\varepsilon' = V/r$.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена зависимость динамической твердости от средней скорости деформации, полученной путем обработки результатов экспериментов по внедрению конического индентора. При скорости ударного индентирования до 10 м/с повышение динамической твердости с ростом скорости обусловлено тем, что влияние вязкости выше влияния разогрева металла в адиабатическом процессе его пластического деформирования, понижающего сопротивление. При дальнейшем увеличении скорости индентирования динамическая твердость снижается, что следует из анализа результатов испытаний мягкой и высокопрочной стали, титанового и алюминиевого сплавов. Такое anomальное влияние скорости деформации на сопротивление металла деформированию при индентировании можно объяснить развитием в металле неоднородного поля деформаций (интенсивной локализацией деформаций) с образованием полос адиабатического сдвига (ПАС).



Первое уравнение в (1) указывает на связь между средним напряжением (давлением объемного сжатия p), удельным объемом v материала и его температурой T , второе – на связь между интенсивностями напряжений $\sigma_i(t)$ и деформаций $\varepsilon_i(t)$ с учетом изменения температуры при адиабатическом (для динамического нагружения) пластическом деформировании.

Для учета адиабатического разогрева металла при динамическом нагружении система уравнений (1) дополняется уравнением, определяющим скорость повышения температуры $\dot{T}(t)$ в процессе деформирования (для металла с удельной теплоемкостью c_V и коэффициентом тепловыделения λ):

$$\dot{T}(t) = \lambda \sigma_i(t) \varepsilon'_i(t) / c_V. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) применимы для ограниченных режимов нагружения, соответствующих однородному деформированию и малому влиянию повреждения (разрушения). Для учета указанных процессов уравнения (1) должны быть дополнены уравнениями кинетики этих процессов.

При компьютерном моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) в элементах конструкций обычно используют упрощенные уравнения состояния в виде связи мгновенных интенсивностей напряжения, деформации и скорости деформации, пренебрегая влиянием истории предшествующего нагружения. Примеры таких уравнений приведены в работах Джонсона и Кука [6], Армстронга [7], публикациях автора [1] и др.:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= f_1(\varepsilon_i) f_2(\varepsilon'_i) f_3(T); \\ \sigma_i &= \sigma_{st}(\varepsilon_i, T) + K(\varepsilon_i, T) \ln(\varepsilon'_i) + \mu \varepsilon'_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_{st}(\varepsilon_i, T)$ – сопротивление металла при статическом нагружении; μ и $K(\varepsilon_i, T)$ – коэффициенты, характеризующие влияние линейной и нелинейной вязкости.

В ряде случаев динамического нагружения должно учитываться существенное влияние истории нагружения (например, повышенное деформационное упрочнение поверхности металлической пластины под действием давления скользящей детонационной волны во взрывчатом веществе, используемое в технологии металлообработки).

Снижение сопротивления металла пластическому деформированию с ростом скорости деформации при индентировании, по-видимому, – проявление при больших деформациях локализации деформаций [8, 9]. Резкое уменьшение интенсивности напряжений в металле при ударном индентировании с высокой скоростью, связанное с развитием ПАС, аналогично снижению сопротивления хрупкого материала деформированию, вызванного развитием системы трещин. Сопротивление металла деформированию после развития системы ПАС в основном контролируется его объемным сжатием и эффектами вязкости в полосах сдвига. Указанный механизм снижения твердости подтверждается результатами экспериментов с двухступенчатым ударным индентированием. Расчетное значение динамической твердости (определена по величине удельной энергии, затраченной на увеличение объема

каверны) при повторном ударном индентировании, не вызывающем значительного повышения пластической деформации и температуры, выше, чем при начальном нагружении.

Понижение сопротивления при высокой скорости деформации установлено в экспериментах по распространению волны догрузки в материале, нагруженном ударной волной (публикации Г. Канеля). В работах Ю. Мещерякова показан специфический характер деформирования металла при ударно-волновом нагружении – возникновение интенсивных локальных деформаций по границам вращающихся локальных областей. Однако экспериментальных данных недостаточно для разработки уравнений состояния, учитывающих этот эффект.

В качестве первого приближения связь интенсивностей напряжения и деформации с учетом влияния ПАС может быть описана уравнением (3):

$$\sigma_i = A(\varepsilon_i(t))[\sigma_{st}(\varepsilon_i, T) + K(\varepsilon_i, T) \ln(\varepsilon'_i)] + \mu \varepsilon'_i. \quad (4)$$

Множитель $A(\varepsilon_i(t))$ определяется историей нагружения и снижается почти до нуля при развитии неоднородного деформирования даже при относительно малом повышении средней температуры, если формируется система горячих слоев, в которых локализуется деформация. Высокая температура в полосах адиабатического сдвига вызывает быструю релаксацию напряжений (снижение интенсивности напряжений). Последующий теплоотвод из этих слоев приводит к выравниванию температуры через короткий промежуток времени и повышению сопротивления. Как пример, множитель $A(\varepsilon_i(t))$, учитывающий эффекты неустойчивости в металле, может быть принят в виде

$$A(\varepsilon_i(t)) = 1/[1 + k\varepsilon_i^{n\varepsilon} (\varepsilon'_i)^m]. \quad (5)$$

В диапазоне небольших пластических деформаций и низких скоростей деформации эффекты неоднородного деформирования незначительны ($A(\varepsilon_i(t)) \approx 1$ при $k\varepsilon_i^{n\varepsilon} (\varepsilon'_i)^m \ll 1$). В диапазоне больших пластических деформаций и высоких скоростей деформации множитель $A(\varepsilon_i(t))$ близок к нулю, что соответствует чисто вязкой составляющей сопротивления деформации.

2. Численное моделирование расширения каверны.

2.1. Уравнение состояния металла. Сопротивление сдвигу при статическом нагружении (при низкой скорости пластической деформации) принимали в виде

$$S_{st}(e_p, T) = S_y[1 + Me_p^n]. \quad (6)$$

Влияние скорости пластической деформации на сопротивление учитывали путем добавления к статической составляющей сопротивления его вязкой составляющей [1]. Пренебрегая возможным влиянием величины деформации, скорости деформации и температуры на коэффициент нелиней-

ной вязкости μ , а также влиянием скорости деформации, поврежденности и температуры на коэффициент динамичности K_d , сопротивление пластическому сдвигу рассчитывали по уравнению

$$S(e_p, \dot{e}_p) = S_{st} + K_d \ln(\dot{e}_p / \dot{e}_0) + \mu(\dot{e}_p - \dot{e}_0) \quad \text{при } S < S_{\max}, \quad (7)$$

причем коэффициент динамичности понижается в процессе пластического течения, т.е. роста величины пластической деформации, $K_d = K_{d0} / (1 + e_p / e_{cr})$.

Учет влияния температуры, возрастающей в процессе пластического течения, обеспечивается снижением статической и вязкой составляющих сопротивления:

$$S(e_p, \dot{e}_p) = S_{st} [1 - (\Delta T / T_{cr})^m] + [K_d \ln(\dot{e}_p / \dot{e}_0) + \mu(\dot{e}_p - \dot{e}_0)] / [1 + (\Delta T / T_{cr})^m]. \quad (8)$$

При повышении температуры на ΔT в адиабатическом процессе пластического деформирования снижается модуль упругого сдвига $G(T)$ и возрастают термоупругие напряжения объемного сжатия σ_m . Принимая постоянными модуль объемной упругости K и коэффициент температурного линейного расширения металла α для заданной объемной деформации ε_V , получаем

$$G(T) = G_0 [1 - (\Delta T / T_{cr})^m]; \quad \sigma_m = K(\varepsilon_V - 3\alpha\Delta T). \quad (9)$$

Пластическое течение определяется решением системы уравнений механики сплошной среды, включающей помимо уравнений состояния (уравнения (6)–(9)) уравнения сохранения массы, импульса и энергии, которые для случая цилиндрической симметрии представляются в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{e}_r}{\partial r} = \partial v_r; & \frac{\partial \dot{e}_t}{\partial r} = \frac{v}{r}; \\ \rho \frac{dv_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_t)}{r} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2S}{r}; \\ \frac{dT}{dt} = \frac{S\dot{e}_p}{c_p \rho} + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (10)$$

(k – коэффициент температуропроводности).

Начальные условия были приняты нулевыми. Скорость перемещения точек на границе каверны полагали постоянной, ступенчато возрастающей до заданной постоянной величины V_0 . Параметры на каждом последующем временном шаге рассчитывали по скорости их изменения на предыдущем временном шаге с уточнением (схема прогноза-коррекции).

2.2. Анализ результатов численного моделирования процесса расширения каверны. Деформирование материала при индентировании моделировали расширением цилиндрической каверны. Приведенные ниже параметры, входящие в уравнение состояния материала (для высокопрочной стали), взяты из справочников или определены по результатам испытаний при ударном нагружении.

$T_{cr}, ^\circ\text{C}$	750	$S_{\max}, \text{ГПа}$	5,0	$\dot{\epsilon}_0, \text{с}^{-1}$	1000
$T_0, ^\circ\text{C}$	20	$G_0, \text{ГПа}$	80	$c_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	500
$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	7800	$K, \text{ГПа}$	170	$k, \text{м}^2/\text{с}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
$S_y, \text{ГПа}$	1,0	$\alpha, \text{К}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	N	150
n	0,3	$\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$	$1,0 \cdot 10^5$	$x_{01}, \text{мм}$	1,0
m	1,0	$K_d, \text{МПа}$	60	$r_{c \max}, \text{мм}$	2,2

По данным компьютерного моделирования расширения цилиндрической полости с заданной постоянной скоростью при устойчивом (без возникновения ПАС) деформировании материала, увеличение скорости расширения вызывает повышение давления на поверхности полости, что согласуется с экспериментальными результатами по ударному индентированию со скоростью до 10 м/с.

Повышение температуры в материале при его пластическом течении приводит к росту давления его объемного сжатия. Такое повышение давления ($\Delta p \approx 3\alpha K \Delta T$), не существенное при распространении плоской волны нагрузки (малые деформация и небольшое повышение температуры), составляет значительную часть общего давления на поверхности расширяющейся каверны (большие деформации и высокие температуры). При повышении температуры до 750°C (температура фазового превращения в перлитной стали) расчетная термическая составляющая давления достигает 3,0 ГПа и компенсирует понижение сопротивления деформации, вызванное повышением температуры.

Составляющие напряжений в стальной пластине вблизи поверхности каверны при ее расширении со скоростью $V_0 = 50 \text{ м/с}$ представлены на рис. 3. Термическая составляющая объемного сжатия растет при расширении каверны, а статическая составляющая интенсивности напряжений и вязкая составляющая снижаются. Результирующее давление на поверхности каверны σ_r , после начального периода расширения с постоянной скоростью изменяется незначительно. Анализ приведенных результатов показал, что поле напряжений и деформаций, возникающее в материале при динамическом расширении каверны, является следствием совместного влияния различных эффектов в материале (деформационное упрочнение, нелинейная вязкость, адиабатический разогрев и др.).

Путем выбора параметров в множителе (5), учитывающем влияние неустойчивости осесимметричного деформирования (возникновение ПАС), можно достичь такого снижения сопротивления с ростом скорости деформации, которое соответствует результатам испытаний по ударному индентированию.

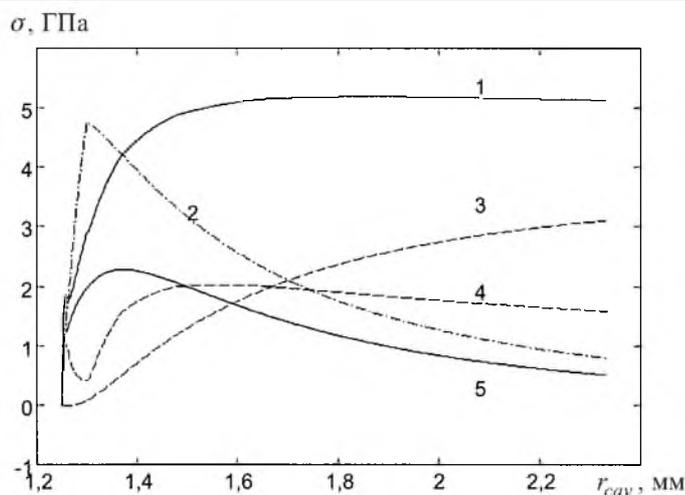


Рис. 3. Сжимающие напряжения вблизи поверхности каверны при ее расширении с постоянной скоростью 50 м/с: 1 – общее радиальное напряжение σ_r ; 2, 5 – интенсивность напряжений S и ее статическая составляющая S_{st} ; 3, 4 – термическая составляющая давления P_{th} и давление объемного изотермического сжатия p .

Вблизи поверхности каверны интенсивность напряжений снижается с течением времени вследствие повышения температуры и снижения коэффициента вязкости. Рост термической составляющей объемного сжатия компенсирует снижение сопротивления сдвигу и сохраняет давление на поверхности каверны примерно на постоянном уровне, который увеличивается с повышением скорости расширения каверны. В начальный период расширения каверны существенное влияние на этот процесс оказывает распространение упругой волны. При удалении фронта упругой волны на значительное расстояние от поверхности каверны распределение напряжений и деформаций с достаточной точностью удовлетворяет условию геометрического подобия (кривые распределения радиального напряжения в различные моменты времени в зависимости от относительного радиуса r/r_c практически совпадают). Повышение вязкой составляющей сопротивления, вызванное ростом скорости расширения каверны, приводит к увеличению давления на ее поверхности.

Заключение. Увеличение скорости деформации вызывает рост сопротивления деформации при всех видах испытаний (растяжение, сжатие, сдвиг, ударное индентирование при низкой скорости).

При высоких скоростях ударного индентирования удельная (на единицу объема смещенного материала) энергия формирования конической каверны уменьшается с ростом скорости, что может быть обусловлено развитием в металле, прилегающем к поверхности каверны, полос локализованного сдвига.

Учет в уравнениях состояния металлов совместного влияния эффектов вязкости, повышения температуры и неоднородности распределения температуры и деформации (их локализации, нарушающей осесимметричность НДС) позволяет повысить корреляцию результатов испытаний при ударном индентировании и их численного моделирования.

Резюме

Наведено результати випробувань металів на ударний розтяг–стиск і ударне індентування. Установлено значне підвищення опору металів деформації з ростом швидкості розтягу–стиску і помірної швидкості індентування. За високої швидкості індентування отримано зниження питомої (на одиницю об'єму зміщеного матеріалу) енергії формування конічної каверни. Урахування сумісного впливу в'язкості, підвищення температури в процесі пластичної деформації й її локалізації дозволяє пояснити цей ефект.

1. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. *Степанов Г. В., Зубов В. И.* Динамічний стиск з високою швидкістю високоміцної сталі та титанового сплаву // Наукові вісті Національного техн. ун-ту України. – 2000. – № 6. – С. 75 – 80.
3. *Козлов В. С.* Модель проникания, учитывающая вязкостные свойства материалов соударяемых тел // Пробл. прочности. – 1986. – № 3. – С. 47 – 52.
4. *Степанов Г. В., Сафаров Э. Г.* Сопротивление внедрению конического стержня в упругопластическую среду // Там же. – 1990. – № 4. – С. 69 – 74.
5. *Степанов Г. В., Зубов В. И.* Анализ сил сопротивления алюминиевого сплава внедрению стального цилиндра со скоростью до 450 м/с // Там же. – 1998. – № 5. – С. 106 – 110.
6. *Johnson R. G. and Cook W. H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Eng. Fract. Mech. – 1985. – **21**, No. 1. – P. 31 – 48.
7. *Zerilli F. J. and Armstrong R. W.* Dislocation – mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations // J. Application Phys. – 1987. – **61(5)**, No. 1. – P. 1816 – 1825.
8. *Stepanov G. and Zubov V.* Dynamic hardness of high-strength steel and titanium alloy // J. Phys. IV. France 10. – 2000. – P. 647 – 651.
9. *Stepanov G. and Fedorchuk V.* Localized shear in metals under impact loading // Ibid. – P. 707 – 712.

Поступила 14. 11. 2001