

Распространение зоны локализованного пластического течения при простом сдвиге

Г. В. Степанов, А. В. Широков

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Исследуется расширение границ локализованного пластического сдвига в тонком слое металла. Установлено увеличение скорости расширения границ по мере удаления от места инициирования локализованного сдвига. Скорость распространения заданного уровня деформации возрастает до скорости упругой волны сдвига в металле при удалении от места инициирования локализованного сдвига.

Ключевые слова: локализация деформации, численное моделирование, чистый сдвиг, динамическое нагружение, пластическая деформация.

Обозначения

- v_x, v_y – скорости по осям x и y соответственно
 v_0 – заданное значение скорости
 ε_{ij} – составляющие тензора общих деформаций
 e_{ij}^e – составляющие девиатора упругих деформаций
 ε_{ij}^p – составляющие тензора пластических деформаций
 ε_i^p – интенсивность пластического сдвига
 ε_v – объемная деформация
 A, n – коэффициенты, определяющие деформационное упрочнение
 δ_{ij} – дельта Кронекера
 μ – коэффициент вязкости металла
 ν – коэффициент Пуассона
 G_0 – начальный модуль сдвига металла
 c_v – объемная теплоемкость металла
 α – коэффициент линейного расширения
 K – модуль объемного расширения
 ρ – плотность металла
 H – толщина слоя металла
 F_c – площадь поперечного сечения в центре слоя металла
 T – текущая температура
 T_c – критическая температура разупрочнения металла
 $\bar{\sigma}$ – объемное напряжение
 σ_{ij} – тензор общих напряжений
 S_{ij} – тензор активных напряжений
 σ_T – предел текучести металла при статическом нагружении

- σ_i – интенсивность напряжений
 σ_{st} – статическое сопротивление сдвигу
 i, j – текущее значение узла по осям x и y
 t_k – значение текущего шага по времени
 dx, dy – расстояние между узлами сетки в направлении осей x и y
 dt – шаг по времени
 N_x, N_y – количество узлов по осям x и y

Введение. При динамическом нагружении материала вследствие волновых процессов возникает неоднородное напряженно-деформированное состояние. В случае высокой интенсивности пластической деформации неоднородность в сочетании с адиабатическим нагревом материала может привести к локализации пластической деформации и образованию полос адиабатического сдвига.

В ряде работ [1–3] исследование локализации пластического течения проводили непосредственно с использованием численного моделирования. В [4] исследовалось влияние скорости на границах тонкого слоя металла на стационарную скорость полосы адиабатического сдвига с учетом в основном экспериментальных данных работы [5]. Ранее [6] авторы в одномерной постановке проследили развитие локализованной пластической деформации и влияние на распределение напряжений и деформаций эффектов, вызванных развитием в материале пластического сдвига с учетом нелинейной вязкости, повреждения и температуры. Однако динамика распространения области локализации сдвига исследована недостаточно.

Целью данной работы является изучение динамики распространения локализованной пластической деформации в условиях чистого сдвига. Исследование проводили с использованием численного моделирования плоской деформации в узком слое металла, в центре которого возникает и развивается локализованный сдвиг.

Модель. Рассматривали чистый сдвиг в тонком слое ($H = 6,3 \cdot 10^{-3}$ м) изотропного металла бесконечной длины (ось x), схема нагружения которого приведена на рис. 1.

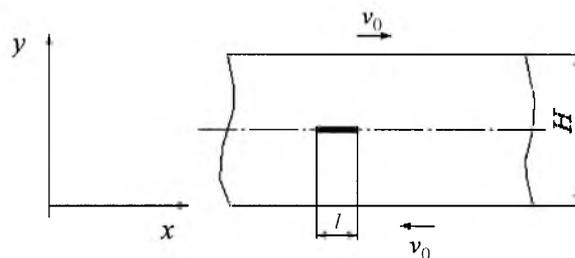


Рис. 1. Схема нагружения слоя металла.

В начальный момент времени в полосе имеет место нулевое напряженно-деформированное состояние:

$$v_x = v_y = 0; \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_{xy} = 0.$$

Граничные условия определяются заданными скоростями перемещения:

$$\begin{aligned} v_x(t) &= +v_0(t), & v_y(t) &= 0 & \text{при } y &= 0; \\ v_x(t) &= -v_0(t), & v_y(t) &= 0 & \text{при } y &= H. \end{aligned}$$

Уравнения движения запишем в виде

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Предположим, что материал слоя упруговязкопластичный. Определяющие уравнения для такого материала в случае плоскодеформированного состояния имеют следующий вид:

$$\sigma_{ij} = 2G(T)e_{ij}^e + \bar{\sigma}\delta_{ij}; \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_v - 3\alpha T); \quad (4)$$

$$S_{ij} = 2G(T)e_{ij}^e; \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_{xx} + \dot{\varepsilon}_{yy}; \quad (6)$$

$$\dot{e}_{ij}^e = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \frac{\dot{\varepsilon}_v}{3}\delta_{ij}; \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \dot{\varepsilon}_{zz} = \dot{\varepsilon}_{xz} = \dot{\varepsilon}_{yz} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}. \quad (8)$$

Здесь и далее точка над символом обозначает производную по времени вдоль траектории частицы сплошной среды.

Составляющие тензора скорости пластической деформации и скорости пластического сдвига в металле определяли из уравнений Пэжины [7]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_i^p \frac{S_{ij}}{\sigma_i}; \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_i^p = \frac{(\sigma_i - \sigma_{st})}{\mu}. \quad (10)$$

Коэффициент вязкости принимали постоянным. Ввиду устойчивости счета искусственную вязкость не вводили.

Статическое сопротивление сдвигу представляли с учетом деформационного упрочнения и термического разупрочнения в виде

$$\sigma_{st} = \sigma_T [1 + A(\varepsilon_i^p)^n] [1 - (T/T_c)^{1/2}]. \quad (11)$$

В результате повышения температуры в слое металла происходило изменение модуля упругого сдвига, описываемое формулой

$$G(T) = G_0(1 - T/T_c). \quad (12)$$

Скорость повышения температуры определяется только работой пластической деформации:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{\varepsilon}_i^p \sigma_i}{c_v}. \quad (13)$$

Неоднородное пластическое течение в слое металла и дальнейшая локализация инициируются путем включения линейного дефекта размером l ($1,5 \cdot 10^{-4}$ м) – рис. 1.

Методика расчета. Полосу моделировали прямоугольной матрицей 200×21 узлов, $N_x = 200$, $N_y = 21$. Шаг по времени выбирали из условия Куранта.

Скорость на границах слоя за 2,5 мкс ($t_k = 50$) повышается до заданной постоянной величины и определяется формулой

$$v_x(t) = v_0(1 - \exp(-t_k/3)). \quad (14)$$

Основной алгоритм расчета представлен на рис. 2.

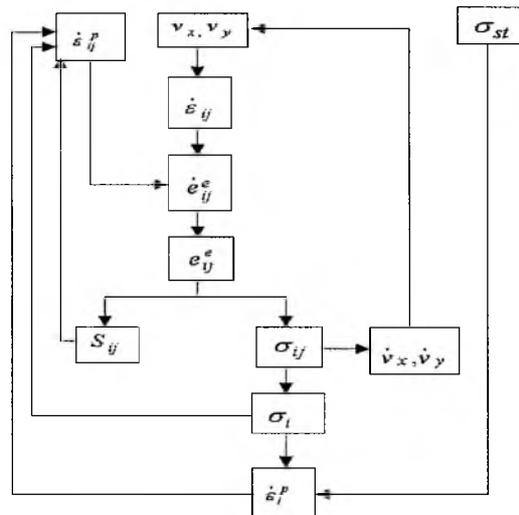


Рис. 2. Основной алгоритм расчета.

При расчете шаг по времени разбивали на две составляющие: “прогноз” и “коррекция”. При прогнозе по значениям скоростей и ускорений узлов сетки с двух предыдущих шагов ($t_k - 1, t_k - 2$) определяли значение скоростей узлов на текущий момент времени (t_k):

$$v_x(t_k) = v_x(t_k - 1) + [\dot{v}_x(t_k - 2) + \dot{v}_x(t_k - 1)]dt/2. \quad (15)$$

По полученным значениям скорости в четырех соседних узлах находили величину средней скорости полной деформации в междоузлии (рис. 3). Затем в междоузлиях определяли упругие деформации, напряжения и скорость пластического сдвига с использованием значений скоростей пластической деформации и статического сопротивления (также в междоузлиях) с предыдущего шага. По значениям напряжений в соседних четырех междоузлиях находили среднюю величину ускорения, а по ней – среднюю скорость узла сетки между ними. Скорость в граничных узлах сетки ($y = 0, y = H$) задается уравнением (14) с учетом знака.

В результате были получены уточненные (для данной скорости) значения статического сопротивления, скоростей пластической деформации и скоростей узлов сетки на текущий временной шаг.

При коррекции использовались уточненные значения. Затем переходили на следующий временной шаг.

Расчет на данном шаге можно проводить несколько раз для большего приближения прогнозируемых величин к истинным значениям. Авторы ограничились одной коррекцией с целью экономии машинного времени и ввиду хорошей устойчивости счета.

Для создания начальной неоднородности напряженно-деформированного состояния по ширине области пластического течения площадь поперечного сечения слоя принимали увеличивающейся от центра к границе деформируемой области:

$$F(y) = F_0(1 + 0,8(e^{-(j-1)/8} + e^{-(N_y-1)/8})); \quad (16)$$

$$F_0 = 1,45F_c. \quad (17)$$

Коэффициенты в формуле (16) подбирались экспериментально таким образом, чтобы подавлялось влияние краевых эффектов и разброс значений площади поперечного сечения был минимальным.

При расчете полагали, что упругая деформация не превышает максимального значения, соответствующего теоретической прочности:

$$e_{ij}^e \leq \frac{\sigma_T}{G_0}. \quad (18)$$

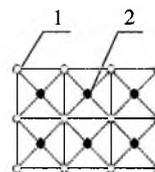


Рис. 3. Схема разбивки слоя деформируемого металла: 1 – узел; 2 – междоузлие.

Линейный дефект моделировали рядом междоузлий с пониженным (на 20%) статическим сопротивлением.

Результаты численного анализа. Для расчетов использовали сталь со следующими параметрами: $\sigma_T = 300 \cdot 10^6$ Па; $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $G = 8,26 \cdot 10^{10}$ Па; $K = 1,52 \cdot 10^{11}$ Па; $n = 0,3$; $A = 0,3$; $\nu = 0,27$; $\mu = 2 \cdot 10^4$ Па · с [8]; $T_c = 750^\circ\text{C}$; $\rho = 7800$ кг/м³. Скорость движения на границах слоя $v_0 = 45$ м/с.

После начальной, волновой стадии процесса деформирования развитие деформации контролируется повышением температуры, которое вызывает более интенсивное пластическое осесимметричное деформирование в центральной области слоя металла. Напряжения и деформации по осям x и y приблизительно на порядок ниже сдвиговых, и их значения не оказывают качественного влияния на характер локализации деформации. Распространение локализации пластической деформации началось при значении деформации 4,5 в центре слоя.

На рис. 4 представлено распределение пластической деформации в слое металла. Влияние линейного дефекта до начала локализации иллюстрирует рис. 4,а. Как видно, дефект не оказывает существенного влияния на общее распределение пластической деформации. Повышение уровня деформации в зоне дефекта составляет менее 2% по сравнению с деформацией в близлежащих междоузлиях. С началом локализации положение изменяется. Пластическая деформация в дефекте резко повышается. Далее деформация распространяется симметрично, удаляясь от дефекта, вдоль центральной области слоя. На рис. 4,б показано распределение пластической деформации в слое через 24,75 мкс с момента инициирования локализации. Видно, что распространение локализации пластической деформации является основным процессом, протекающим в слое металла. Средний же уровень пластической деформации (без учета локализации) в слое повышается незначительно (< 7%).

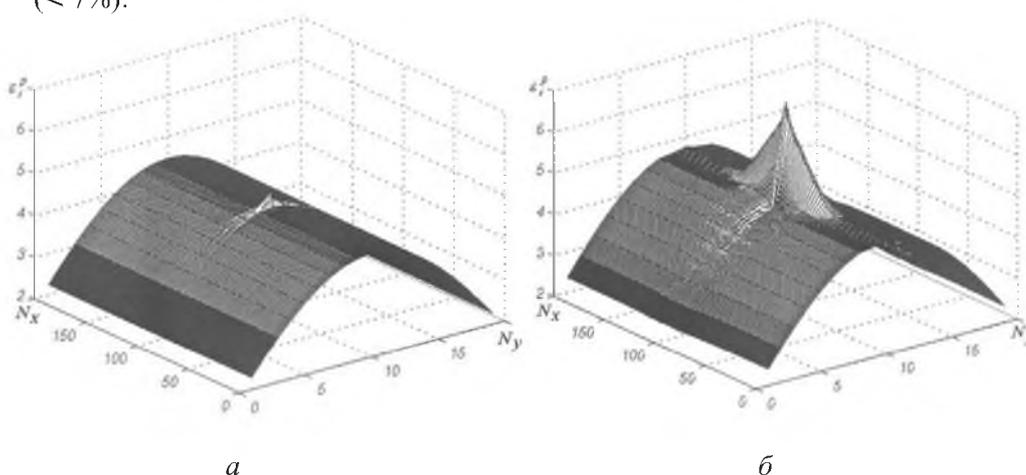


Рис. 4. Распределение пластической деформации в слое металла.

На рис. 5 приведены графики скоростей распространения заданного уровня пластической деформации по междоузлиям при удалении от начального дефекта. Для всех уровней деформации скорость распространения локализации сдвига v_e с удалением от дефекта возрастает. Кроме того, на графиках можно выделить два участка. Первый – небольшой рост и выравнивание скорости распространения деформации, второй – резкое увеличение скорости распространения деформации до величины, близкой к скорости распространения сдвиговой волны в металле. Отметим, что промежуточная пластическая деформация $\varepsilon_i^p = 5,59$ достигает скорости сдвиговой волны позже, чем деформация $\varepsilon_i^p = 6,78$, что требует дальнейшего изучения.

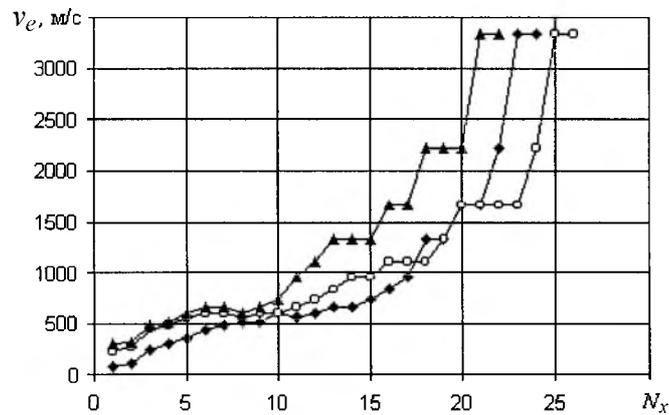


Рис. 5. Скорость распространения заданной пластической деформации (точки) по междоузлиям при удалении от начального дефекта (\blacklozenge – $\varepsilon_i^p = 4,72$; \circ – $\varepsilon_i^p = 5,59$; \blacktriangle – $\varepsilon_i^p = 6,78$).

Заключение. Скорость распространения локализованной пластической деформации заданного уровня возрастает с удалением от места ее инициирования. На достаточном удалении от линейного дефекта она близка к скорости волны сдвига в металле.

Резюме

Досліджується розширення границь локалізованого пластичного зсуву у тонкому шарі металу. Установлено збільшення швидкості розширення границь по мірі віддалення від місця ініціювання локалізованого зсуву. Швидкість розповсюдження заданого рівня деформації зростає до швидкості пружної хвилі зсуву у металі з віддаленням від місця ініціювання локалізованого зсуву.

1. Степанов Г. В., Федорчук В. А. Локализованный сдвиг в металлах при ударном нагружении // Пробл. прочности. – 2000. – № 2. – С. 27 – 42.
2. Batra R. C. Effect of material parameters on the initiation and growth of adiabatic shear bands // Int. J. Solids Struct. – 1987. – 23, No. 10. – P. 245 – 254.

3. *Wright T. W. and Walter J. W.* On stress collapse in adiabatic shear bands // J. Mech. Phys. Solids. – 1987. – **35**, No. 6. – P. 78 – 86.
4. *Lebouvier A.-S., Lipinski P., and Molinari A.* Numerical study of the propagation of an adiabatic shear band // J. Phys. IV. – 2000. – **10**, No. 9. – P. 403 – 408.
5. *Marchand A. and Duffy J.* An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel // J. Mech. Phys. Solids. – 1988. – **36**, No. 3. – P. 251 – 283.
6. *Степанов Г. В., Федорчук В. А.* Локализованный сдвиг в тонколистовом материале // Пробл. прочности. – 1999. – № 5. – С. 53 – 63.
7. *Perzyna P.* Fundamental problems in viscoplasticity // Adv. Appl. Mech. – 1966. – **9**. – P. 142 – 154.
8. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.

Поступила 19. 09. 2001