

## Численное исследование локализации пластического течения в металлах

**А. В. Широков**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Путем численного моделирования исследуется влияние термомеханических параметров и начальной скорости на границах тонкого слоя изотропного металла при чистом сдвиге на процесс локализации пластической деформации. Установлено, что зависимость величины пластического сдвига от скорости на границе слоя близка к линейной.*

**Ключевые слова:** расчет, простой сдвиг, локализация деформации, тонкий слой, динамическое нагружение, пластическая деформация.

Явления локализации пластической деформации и образования полос адиабатического сдвига известны давно. Считается, что выделяемое при пластическом деформировании в локальной области тепло в условиях динамического нагружения не успевает распространиться по всему объему металла. Вследствие этого в более нагретой зоне происходит падение прочности, что приводит к увеличению скорости и величины пластической деформации, а значит, к еще большему выделению тепла и даже к плавлению металла в зоне локализованного сдвига.

Многие процессы механической обработки (резание, пробивание отверстий и др.) сопровождаются локализацией пластической деформации. Обзор экспериментальных исследований локализации пластического течения содержится в [1]. В [2] предложена одномерная модель для численного анализа локализации пластического течения.

**Постановка задачи.** В настоящей работе рассматривали чистый сдвиг в тонком слое изотропного упругопластического материала. Начальные условия в слое принимали нулевыми. Для создания начальной неоднородности напряженно-деформированного состояния по толщине слоя  $h$  статическое сопротивление материала в узкой зоне  $l = 0,1h$  в центре слоя было понижено на 20%. На границах слоя задавали изменяющуюся во времени (антисимметрично относительно центра слоя) скорость сдвига  $v$  в направлении оси  $x$ . Для экономии ресурсов ЭВМ расчет производили для одной половины слоя. Затем полученные данные отображали антисимметрично относительно оси  $x$ :

$$x = x_0 + u(y, t); \quad y = y_0; \quad z = z_0; \quad T = T(y, t), \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – текущие, а  $x_0, y_0, z_0$  – начальные координаты точек слоя;  $u$  – смещение в направлении оси  $x$ ;  $T$  – температура;  $t$  – время.

Уравнения движения и теплопроводности имеют вид

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial y}; \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{\epsilon}_p \sigma}{c_v}, \quad (2)$$

где  $\rho, c_v$  – плотность и объемная теплоемкость материала;  $\sigma$  – напряжение течения;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластического сдвига. Как видно из (2), процесс считали адиабатическим и учитывали только повышение температуры вследствие работы пластической деформации.

Поведение материала слоя моделировали усовершенствованным уравнением Джонсона–Кука [3] в виде

$$\sigma = \sigma_{st} + \mu \dot{\varepsilon}_p; \quad \sigma_{st} = \sigma_T [1 + A(\varepsilon_p)^n] [1 - (T/T_c)^b], \quad (3)$$

где  $\mu$  – вязкость материала;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $A, n$  – коэффициенты деформационного упрочнения;  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация материала;  $T_c$  – критическая температура;  $b$  – коэффициент температурного разупрочнения. Вязкость материала полагаем постоянной.

Для описания кинетики сдвиговых деформаций в материале использовали уравнение Пэжины [4] для скорости пластического сдвига в среде.

Следовательно,

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_p \frac{S_{ij}}{\sigma}, \quad (4)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$  – составляющие тензора скоростей пластических деформаций;  $S_{ij}$  – составляющие тензора так называемых активных напряжений.

Пластическую деформацию определяли в виде

$$\varepsilon_p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_p(t) dt. \quad (5)$$

В расчетах также учитывали зависимость модуля сдвига от температуры слоя:

$$G(T) = G_0(1 - T/T_c), \quad (6)$$

где  $G_0$  – модуль сдвига при комнатной температуре.

**Расчетная модель.** В расчете слой моделировали двухмерной матрицей  $20 \times 200$  элементов (200 по оси  $x$ , 20 по оси  $y$ ) с шагом между элементами  $dx = dy = 0,3 \cdot 10^{-3}$  м – по осям  $x$  и  $y$  соответственно. Таким образом, ширина слоя  $h = 6 \cdot 10^{-3}$  м. Шаг по времени выбирали из условия Куранта.

Скорость на границах слоя задавали быстро нарастающей до заданного уровня по экспоненциальному закону (рис. 1). В дальнейшем скорость оставалась неизменной в течение всего процесса деформирования.

Расчет проводили с использованием схемы “прогноз-коррекция”. Для данной задачи формулы “прогноза” и “коррекции” принимали в виде

$$\begin{aligned} y_{m+1}^* &= y_m + [Z(t_m; y_m) + Z(t_{m-1}; y_{m-1})]/2; \\ y_{m+1} &= y_m + [Z(t_{m+1}; y_{m+1}^*) + Z(t_m; y_m)]/2, \end{aligned} \quad (7)$$

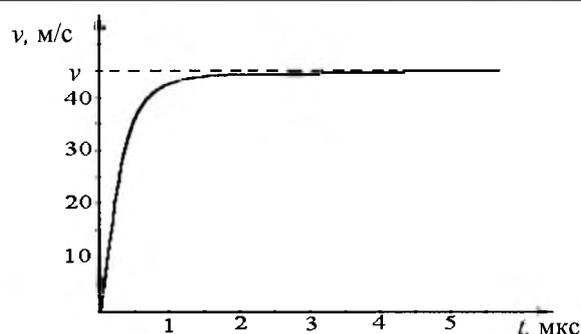


Рис. 1. Изменение скорости на границах пластины во времени.

где  $y_{m+1}^*$ ,  $y_{m+1}$  – прогнозируемый и корректируемый произвольные параметры;  $t_m$  – шаг по времени;  $m$  – номер шага по времени.

**Анализ результатов численного моделирования.** После начального волнового этапа деформирования пластическая деформация, напряжения и температура выравниваются по толщине слоя. Внесенная неоднородность не оказывает заметного влияния на напряженно-деформированное состояние в слое ( $< 2\%$  от среднего уровня). Однако с наступлением неустойчивости в металле слоя (при температуре  $T \geq 0,95T_c$ ,  $\varepsilon_p \approx 0,3$ ) ситуация существенно изменяется. Пластическая деформация локализуется в центре слоя в пределах одного ряда узлов (зона с пониженным сопротивлением сдвигу) ввиду отсутствия механизма теплообмена между ними. В дальнейшем процесс представляет собой повышение уровня пластической деформации в центральном ряду узлов слоя. Повышение же уровня пластической деформации в остальной области слоя незначительное ( $< 7\%$ ).

Для оценки влияния термомеханических параметров материала на локализацию пластической деформации использовали три контрастных материала: алюминий, мягкая сталь и латунь. Их основные термомеханические параметры приведены в таблице, где  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Скорость на границах слоя принималась равной 45 м/с для всех металлов.

Термомеханические свойства исследуемых металлов

Материал	$\sigma_T \cdot 10^{-8}$ , Па	$E \cdot 10^{-11}$ , Па	$T_c$ , °C	$\nu$	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu \cdot 10^{-4}$ , Па · с [5]
Алюминий	3,80	0,71	650	0,34	2,7	3
Латунь	0,91	1,00	1000	0,36	8,5	2
Сталь	3,00	2,10	750	0,27	7,8	4

На рис. 2 представлено распределение пластического сдвига по толщине слоя ( $N_y$ ) для этих материалов на 37-й мкс от начала нагружения. Следует отметить, что уровень деформации вне зоны локализации для всех исследуемых металлов имеет небольшое отличие (не более 10%), в то время как в зоне локализации это отличие существенное.

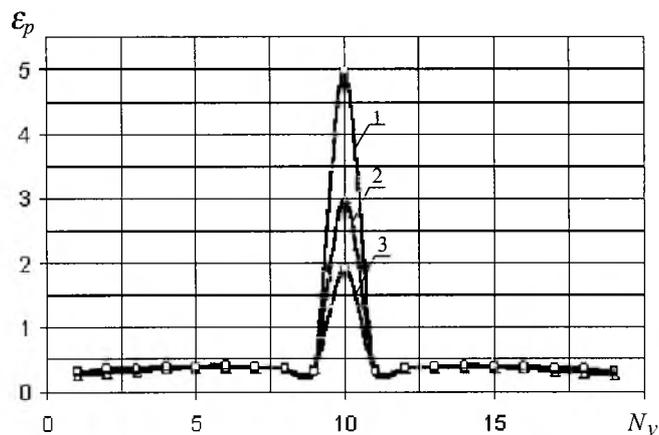


Рис. 2. Распределение пластического сдвига по толщине слоя из алюминия (1), стали (2) и латуни (3) на 37-й мкс от начала нагружения.

Для мягкой стали определяли влияние скорости нагружения на границах слоя на максимальную величину пластического сдвига на 34-й мкс от начала нагружения (рис. 3). Скорость нагружения изменялась от 15 до 70 м/с.

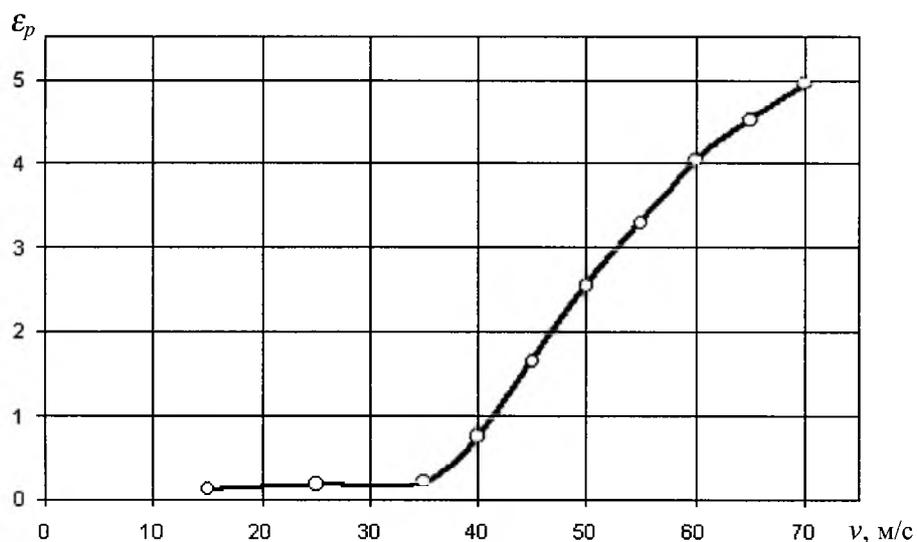


Рис. 3. Зависимость пластического сдвига от скорости нагружения на границах слоя для стали на 34-й мкс от начала нагружения.

Как видно, после инициирования процесса локализации ( $v > 35$  м/с) рост величины пластического сдвига с повышением скорости на границах слоя близок к линейному.

Таким образом, численное моделирование локализации пластического течения при простом сдвиге позволило качественно оценить влияние термо-механических параметров и скорости на границах слоя металла на развитие пластического сдвига.

## Резюме

За допомогою числового моделювання досліджується вплив термомеханічних параметрів і початкової швидкості на границях тонкого шару ізотропного металу при чистому зсуві на процес локалізації пластичної деформації. Установлено, що залежність величини пластичного зсуву від швидкості на границі шару близька до лінійної.

1. *Rogers H. C.* Adiabatic plastic deformation // *Ann. Rev. Mater. Sci.* – 1979. – No. 9. – P. 128 – 135.
2. *Елькин В. М.* Локализация пластического течения при простом сдвиге // *Прикл. мех. и техн. физика.* – 1992. – № 5. – С. 146 – 151.
3. *Jonson 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.
4. *Perzyna P.* Fundamental problems in viscoplasticity // *Adv. Appl. Mech.* – 1966. – **9**. – P. 236 – 245.
5. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.

Поступила 14. 11. 2001