

Распространение волны сдвига в полубесконечной пластине из упруговязкопластичного материала, вызванной импульсным нагружением

Г. В. Степанов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Кратко изложены методика и результаты численного моделирования процесса распространения упругопластической волны сдвиговых деформаций в полубесконечной пластине при импульсном нагружении на границе. Определено влияние на распределение напряжений и деформаций за фронтом волны нелинейной вязкости, адиабатического разогрева материала и повреждаемости, вызванных развитием пластического сдвига.

Введение. Импульсное нагружение элементов конструкций из листовых металлов в ряде случаев приводит к распространению упругопластических волн сдвиговой деформации и в дальнейшем к развитию локализованного сдвига [1, 2]. Анализ таких волновых процессов позволяет получить дополнительные данные для оценки прочности и кинетики деформирования (разрушения) элементов конструкций из листовых материалов при импульсном нагружении.

Численное моделирование процесса распространения волны, вызванной приложением сдвиговой нагрузки на границе полуплоскости, позволяет оценить сложное взаимосвязанное влияние параметров материала, характеризующих его нелинейное реологическое поведение, на распределение напряжений и деформаций и их изменение во времени при таком нагружении. Ниже кратко изложены методика и результаты численного моделирования процесса распространения волны и влияния на распределение напряжений и деформаций за фронтом волны нелинейной вязкости, адиабатического разогрева материала и повреждаемости, вызванных развитием пластического сдвига.

Основные расчетные соотношения. В проведенных расчетах использовали равномерную одномерную сетку. Изменение параметров в узлах сетки с течением времени при сдвиговой деформации рассчитывали с заданным временным шагом, удовлетворяющим условию устойчивости Куранта. Реальная вязкость материала в большинстве случаев обеспечивает устойчивость счета без введения искусственной вязкости.

Поведение металла при пластическом сдвиге моделировали уравнением состояния, аналогичным модели Джонсона–Кука [3], с учетом вязкой составляющей сопротивления и повреждения. Сопротивление сдвигу при статическом нагружении (при скорости пластического сдвига $\dot{\gamma}_0$ под действием статического нагружения) с учетом влияния поврежденности на сопротивление сдвигу, которое учитывается экспоненциальным множителем, принимали в виде

$$\tau_s(\gamma_p, T) = \tau_y [1 + M \gamma_p^n \exp(-\gamma_p / \gamma_c)] [1 - (T / T_c)^m]. \quad (1)$$

Расчетные кривые изотермического статического деформирования $\tau_{ref}(\gamma_p, T) = \tau_s(\gamma_p, T) / \tau_y$ при $T = \text{const}$, $n = 0,3$, $M = 1,0$ и различных значениях γ_c приведены на рис. 1. Видно существенное влияние возрастающей при пластическом течении поврежденности материала на сопротивление сдвигу. Адиабатический разогрев материала при пластическом течении, как и поврежденность, снижает сопротивление сдвигу.

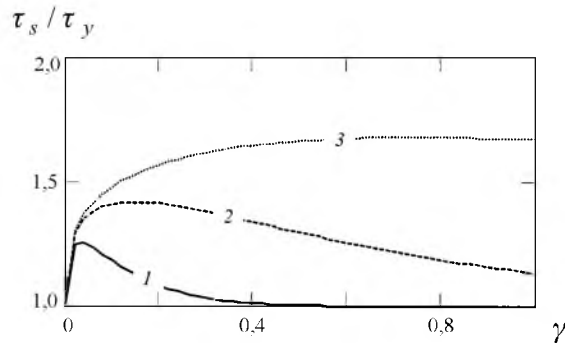


Рис. 1. Кривые напряжение–деформация (при статическом нагружении) при различных параметрах повреждения γ_c : 1 – $\gamma_c = 0,1$; 2 – $\gamma_c = 0,5$; 3 – $\gamma_c = 2,5$.

Влияние скорости пластической деформации на сопротивление сдвигу учитывали путем добавления вязкой составляющей сопротивления [4]. С учетом нелинейной вязкости, пренебрегая возможным влиянием величины деформации, скорости деформации, поврежденности и температуры на коэффициент линейной вязкости μ и коэффициент динамичности K , получаем

$$\tau(\gamma_p, \gamma'_p) = \tau_s + K \ln(\gamma'_p / \gamma'_0) + \mu \gamma'_p. \quad (2)$$

При этом полная деформация и скорость деформации представляются в виде суммы упругой и пластической составляющих:

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_p; \quad \gamma' = \gamma'_e + \gamma'_p. \quad (3)$$

С целью упрощения расчетов скорость пластического течения определяли с использованием единого уравнения, аппроксимирующего с достаточной точностью, не превышающей 10%, нелинейную зависимость вязкости от скорости деформации, которая соответствует (2):

$$\gamma'_p = (\tau - \tau_s) / \{ \mu + (\tau - \tau_s) / [\gamma'_0 \exp((\tau - \tau_s) / K)] \}. \quad (4)$$

При снижении “перенапряжения” $(\tau - \tau_s)$ до нуля скорость сдвиговой деформации ограничивается ее упругой составляющей.

Изменение модуля упругого сдвига G в результате роста поврежденности металла при пластическом течении в приведенных расчетах не учитывали из-за отсутствия надежных данных.

Учитывая разделение деформации на упругую и пластическую составляющие, напряжение сдвига рассчитывали по величине упругой составляющей:

$$\tau = G(T)(\gamma - \gamma_p); \quad G(T) = G_0[1 - (T/T_c)^f]. \quad (5)$$

В случае пренебрежения термоупругими напряжениями решаемая система уравнений механики сплошной среды в одномерном виде включает кроме уравнения состояния уравнения сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{dv}{dx}; \\ \rho \frac{dv}{dt} = \frac{\partial \tau}{\partial x}; \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\tau \gamma'_p}{\rho c_v} + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (6)$$

где k – коэффициент температуропроводности.

Начальные условия полагали нулевыми. Скорость перемещения точек на границе полубесконечной пластины v_1 (скорость сдвига вдоль границы) принимали быстро возрастающей по экспоненциальной зависимости до заданной постоянной величины v_0 :

$$v_1 = v_0[1 - \exp(-t/t_0)]. \quad (7)$$

С целью устранения возможного влияния краевого эффекта толщину пластины δ у нагружаемой поверхности полагали увеличенной; ее толщина уменьшалась до номинальной величины δ_0 :

$$\delta / \delta_0 = 1 + A \exp(-x/x_0),$$

где x – расстояние от поверхности нагружения. В проведенных расчетах принято: $t_0 = 0,05$ мкс; $A = 0,2$; $x_0 = 0,25$ мм.

Параметры в узлах равномерной сетки рассчитывали по схеме, идентичной представленной ранее [5]. На каждом временном шаге по скорости движения в узлах рассчитывали скорость деформации, скорость роста температуры и напряжение сдвига (посредине между узлами сетки). Ускорение, а по нему и скорость движения в узлах сетки, за исключением границы, на которой скорость движения задается уравнением (7), рассчитывали по напряжениям в соседних междоузлиях. Параметры на следующем временном шаге рассчитывали по их изменению на предыдущем временном шаге с последующим уточнением (схема прогноза-коррекции).

В проведенных расчетах варьировали параметры, характеризующие поведение материала при динамическом нагружении (коэффициент вязкости μ , коэффициент динамичности K) и его деформационное повреждение (вели-

чина γ_c). Для оценки влияния эффектов, связанных с повышением температуры и теплопроводности, дополнительно осуществлены расчеты при увеличенных в десять раз теплоемкости и коэффициенте теплопроводности.

Анализ результатов. Основные результаты расчетов приведены на рис. 2–4. Значения основных параметров (в базовом варианте расчета), входящих в уравнение состояния материала, представлены ниже:

ρ , кг/м ³	7800	τ_y , ГПа	1,0	γ'_0 , с ⁻¹	1000
m	0,5	G , ГПа	80	γ_c	0,5
f	0,5	K , МПа	20	v_0 , м/с	-250
n	0,3	μ , Па·с	20000	δx , мм	0,25
T_0 , °С	20	c_p , кДж/(кг·К)	0,5	δt , мкс	0,075
T_c , °С	750	k , м ² /с	10^{-5}		

Распределение напряжений и деформаций в различные моменты времени и связь между ними в ряде точек на различном удалении от нагружаемой границы иллюстрирует рис. 2. Фронт волны распространяется со скоростью упругой волны сдвига $a = (G / \rho)^{1/2}$. За упругим фронтом напряжения и деформации возрастают. Наиболее интенсивное пластическое течение возникает вблизи нагружаемой границы пластины. Такая локализация деформации у границы вызвана понижением скорости распространения пластических деформаций (с увеличением деформации) и понижением статической составляющей сопротивления сдвигу в результате разогрева материала и роста его поврежденности.

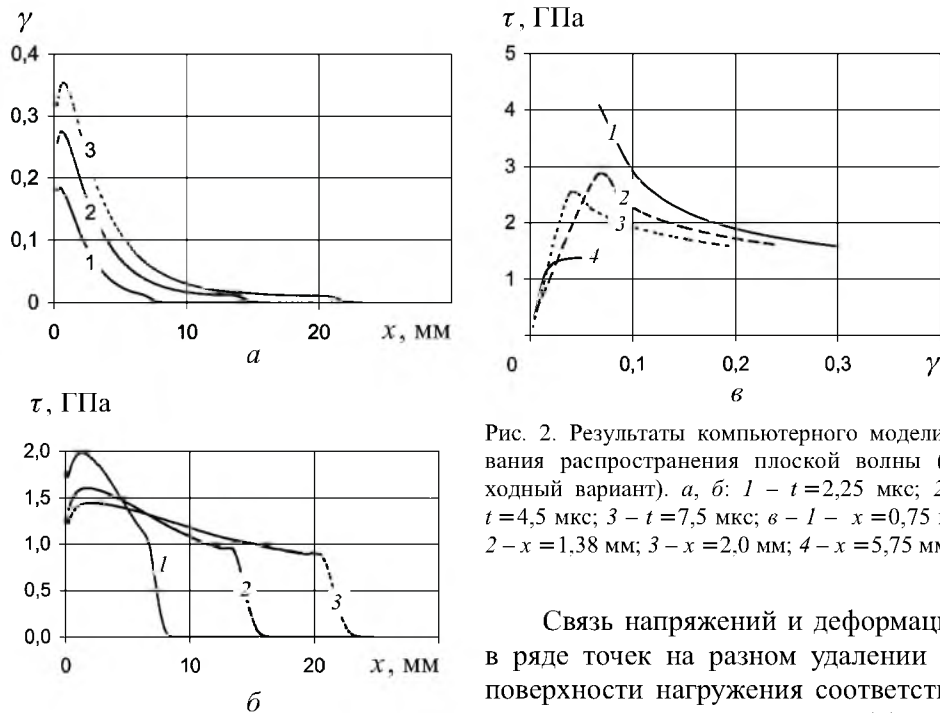


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования распространения плоской волны (исходный вариант). а, б: 1 – $t = 2,25$ мкс; 2 – $t = 4,5$ мкс; 3 – $t = 7,5$ мкс; в – 1 – $x = 0,75$ мм; 2 – $x = 1,38$ мм; 3 – $x = 2,0$ мм; 4 – $x = 5,75$ мм.

Связь напряжений и деформаций в ряде точек на разном удалении от поверхности нагружения соответствует различному проявлению эффектов

вязкости. Вблизи нагружаемой поверхности в начальный момент распространения волны вследствие большой скорости деформации возникает высокий уровень перенапряжения ($\tau - \tau_s$), при котором преобладают релаксационные процессы. С удалением от поверхности нагружения перенапряжение понижается, влияние деформационного упрочнения возрастает, а зависимость напряжение–деформация приближается к квазистатической. Деформация и напряжения, характеризующие упругий фронт волны, на значительном удалении от поверхности нагружения соответствуют пределу текучести материала. Деформация за фронтом связана с понижением статической составляющей сопротивления сдвигу в результате адиабатического разогрева материала и его повреждения при пластическом течении.

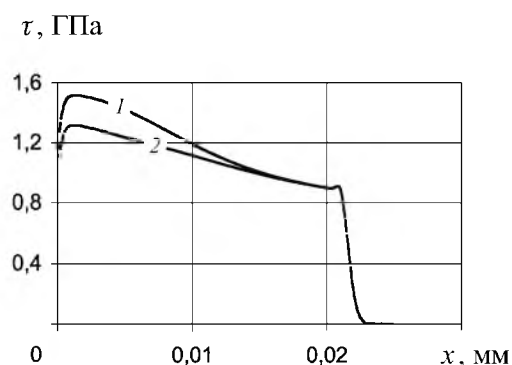


Рис. 3. Распределение напряжений при повышении поврежденности, сопровождающей адиабатическое пластическое течение: 1 – $\gamma_c = 2,5$; 2 – $\gamma_c = 0,1$.

Увеличение коэффициента теплопроводности в десять раз не оказывает заметного влияния на распределение напряжений и деформаций за фронтом волны. Из этого следует, что процесс пластического течения при выбранных условиях нагружения может быть с высокой точностью принят адиабатическим.

Результаты расчетов при близких к изотермическим условиям нагружения (вариант расчета с увеличением в десять раз теплоемкости) приведены на рис. 4. Сравнение результатов расчетов при адиабатическом и изотермическом процессах нагружения показывает, что адиабатический разогрев материала при пластическом течении существенно снижает сопротивление и повышает максимальные деформации у нагружаемой границы пластины.

Влияние повреждаемости материала при пластическом течении на распределение напряжений и деформаций аналогично влиянию адиабатического разогрева (рис. 3). Рост поврежденности проявляется в снижении сопротивления в области интенсивного пластического течения материала у нагружаемой границы при малом влиянии на распределение деформаций.

С увеличением коэффициента вязкости материала (рис. 5) возрастает вязкая составляющая сопротивления сдвигу при одновременном повышении температуры адиабатического разогрева материала и более интенсивном

снижении статической составляющей сопротивления. В результате совместного действия этих факторов, влияние которых различно при малых и больших деформациях, у поверхности нагружения повышение вязкости вызывает снижение уровня максимальных деформаций, а вблизи фронта волны – повышение деформаций и сопротивления деформации.

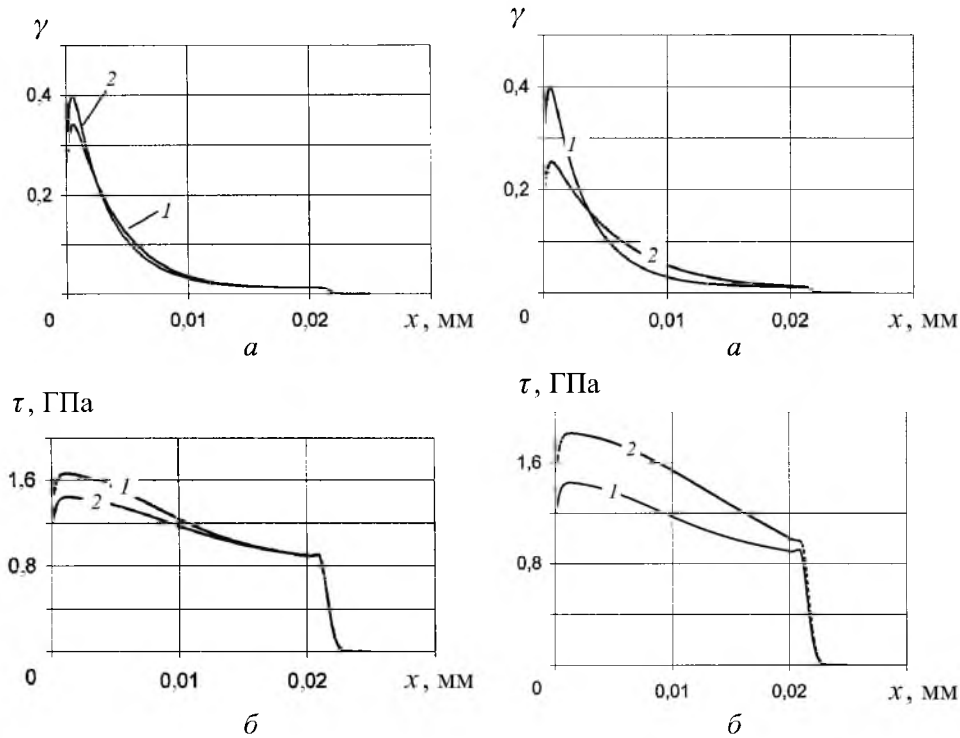


Рис. 4. Влияние адиабатического разогрева на распределение напряжений и деформаций: 1 – изотермический процесс, 2 – адиабатический.

Рис. 5. Влияние вязкости на распределение напряжений и деформаций: 1 – $\mu = 20000$ Па·с; 2 – $\mu = 50000$ Па·с.

Анализ приведенных данных показывает, что распределение напряжений и деформаций в тонколистовых материалах при динамическом нагружении является результатом совместного влияния различных эффектов в материале (особенно вязкости и адиабатического разогрева), которые необходимо учитывать при расчете на прочность элементов конструкций, подверженных импульсному нагружению.

Заключение. Действие интенсивной сдвиговой нагрузки на границе полубесконечной пластины обуславливает распространение волны сдвига, фронт которой, характеризующийся быстрым ростом упругих деформаций, распространяется со скоростью упругой волны сдвига; пластическое течение за упругим фронтом волны вызывает повышение пластических деформаций при приближении к поверхности нагружения.

При значениях теплоемкости и теплопроводности, соответствующих таковым для стали, влияние теплопередачи пренебрежимо мало; влияние адиабатического разогрева и поврежденности в результате пластического

течения, наиболее значимых вблизи поверхности нагружения, проявляется в снижении сопротивления сдвигу при менее значительном увеличении деформаций пластического сдвига.

С увеличением вязкости материала возрастает вязкая составляющая сопротивления сдвигу при одновременном повышении температуры адиабатического разогрева, приводящего к снижению статической составляющей сопротивления сдвигу. В результате совместного действия этих факторов при использованных параметрах вязкости сопротивление за фронтом волны монотонно возрастает. Влияние повышенной вязкости на распределение деформаций проявляется в повышенной деформации вблизи фронта и пониженной – у поверхности нагружения.

Для получения надежных данных о поведении конструкции при импульсном нагружении необходимо учитывать совместное влияние различных факторов в материале.

Работа выполнена по программе INTAS. Автор выражает искреннюю благодарность координатору проекта проф. Я. Клепачко за поддержку работы, полезные советы и замечания.

Резюме

Коротко викладено методику і результати чисельного моделювання процесу розповсюдження пружнопластичної хвилі зсувних деформацій у напівнескінченній пластині при імпульсному навантаженні на межі. Визначено вплив на розподіл напружень і деформацій за фронтом хвилі ефектів нелінійної в'язкості, адиабатичного розігріву матеріалу і пошкодженості внаслідок розвитку пластичного зсуву.

1. *Мосс Дж. Л.* Влияние ударных волн на величину, скорость и температуру деформации в адиабатических полосах // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. А. М. Мейерса, Л. М. Мурра: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – С. 30 – 40.
2. *Ольсон Г. Б., Мескол Дж. Ф., Азрин М.* Локализация деформации при ударном нагружении // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. А. М. Мейерса, Л. М. Мурра: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – С. 67 – 89.
3. *Johnson R. G., Cook W. H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Eng. Fract. Mech. – 1985. – 21, N 1. – P. 31 – 48.
4. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
5. *Степанов Г. В.* Локализация деформации сдвига в металле при динамическом нагружении // Пробл. прочности. – 1995. – № 8. – С. 52 – 59.

Поступила 25. 12. 98