ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 1995, т. 36, № 2

УДК 539.374

ВОЛНЫ СМЕЩЕНИЙ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПОЛОСЫ С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИМИ ПРОСЛОЙКАМИ

Г. В. Иванов, В. Д. Кургузов

Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментальному и теоретическому исследованию волн смещений при пластическом деформировании структурно-неоднородных сред посвящены монографии [1–3].

Численное моделирование волн смещений рассматривалось в [4–6]. В [4] изучался вихревой характер скоростей при динамическом деформировании среды из жестких недеформируемых элементов с заданными силами взаимодействия между ними. В [5, 6] изучались неоднородность деформаций и волны смещений в среде из упругопластических элементов с прослойками, пластические свойства которых отличаются от свойств элементов. Обзор исследований [4–6] и их развития содержится в [3].

Ниже излагаются результаты численного моделирования волн смещений и локализации деформаций при растяжении полосы из жестких (недеформируемых) блоков с упругопластическими прослойками.

1. Уравнения жесткости упругопластической прослойки. Рассмотрим два жестких (недеформируемых) блока, соединенных упругопластической прослойкой (рис. 1,*а*). Полагаем, что поле скоростей блоков и прослойки плоское. Пусть $\mathbf{u}_\pm$ — скорости перемещения центров O_+, O_- блоков, $\boldsymbol{\omega}_\pm$ — угловые скорости блоков, $\mathbf{F}_\pm$, $\mathbf{M}_\pm$ — действующие на прослойку со стороны блоков силы и моменты сил относительно центров O_+, O_-. Зависимость $\mathbf{F}_\pm$, $\mathbf{M}_\pm$ от $\mathbf{u}_\pm$, $\boldsymbol{\omega}_\pm$ условимся называть уравнениями жесткости прослойки.

В качестве модели деформирования прослойки примем безмоментную модель [7]. По этой модели прослойка представляется в виде слоя четырехугольных элементов (рис. 1,*а*,*б*) с уравнениями жесткости

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_+^\alpha - \mathbf{p}_-^\alpha &= D^{\alpha\beta}\tau(\mathbf{u}_+^\beta + \mathbf{u}_-^\beta) + 2\boldsymbol{\chi}^\alpha, \\ \mathbf{p}_+^\alpha + \mathbf{p}_-^\alpha &= C^{\alpha\beta}\tau(\mathbf{u}_+^\beta - \mathbf{u}_-^\beta) + 2(\mathbf{p}_\times^\alpha)^0, \end{aligned} \tag{1.1}$$

где

$$\mathbf{u}_\pm^\alpha = \mathbf{u}^\alpha|_{\xi^\alpha=\pm 1}, \qquad \mathbf{p}_\pm^\alpha = (\widehat{\sigma}^{\alpha\beta}\sqrt{g}\,\widehat{\mathbf{Э}}_\beta)|_{\xi^\alpha=\pm 1}; \tag{1.2}$$

$\widehat{\sigma}^{\alpha\beta}$ — компоненты тензора напряжений в связанной с элементом прослойки косоугольной системе координат $\xi^1, \xi^2 \in [-1, 1]$ (рис. 1,*б*); $\sqrt{g} = |\widehat{\mathbf{Э}}_1 \times \widehat{\mathbf{Э}}_2|$ ($\widehat{\mathbf{Э}}_\alpha$ — базисные векторы системы ξ^α); τ — шаг по времени (всюду ниже $\tau = 1$). На каждой итерации $D^{\alpha\beta}$, $C^{\alpha\beta}$, $\boldsymbol{\chi}^\alpha$, $(\mathbf{p}_\times^\alpha)^0$ — известные, постоянные в пределах элемента величины, корректируемые при переходе от одной итерации к другой по процедуре, подробно изложенной в [7].

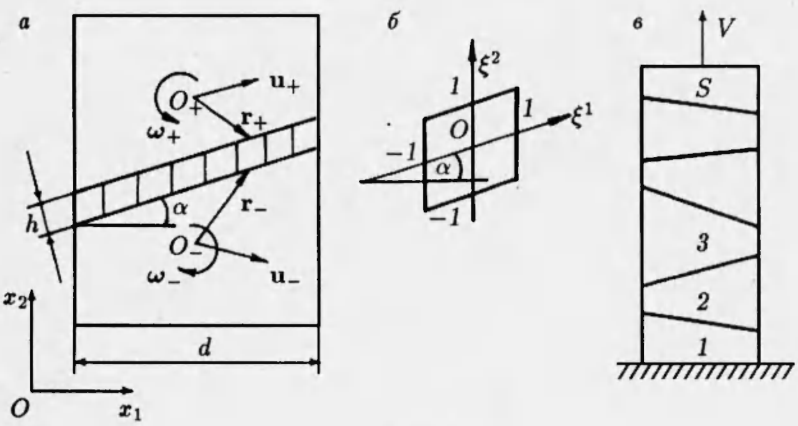

Рис. 1

На границах раздела блоков с элементами прослоек нормальные составляющие скоростей считаются непрерывными:

$$(\mathbf{u}^2_\pm - \mathbf{u}_\pm - \omega_\pm \times \mathbf{r}_\pm)\cdot \hat{\text{Э}}^2\Big|_{\xi^2=\pm1} = 0. \tag{1.3}$$

Касательные составляющие скоростей в безмоментной модели [7] могут быть разрывными. На первой итерации принимается, что

$$(\mathbf{u}^2_\pm - \mathbf{u}_\pm - \omega_\pm \times \mathbf{r}_\pm)\cdot \hat{\text{Э}}_1\Big|_{\xi^2=\pm1} = 0. \tag{1.4}$$

На последующих итерациях условие (1.4) сохраняется лишь на тех гранях, где величина касательных напряжений не превосходит предела текучести τ_*. На остальных гранях условие (1.4) заменяется условием равенства величины касательных напряжений пределу текучести. При этом знак касательных напряжений сохраняется тем же, что и при условии (1.4). Таким образом, в общем случае наряду с гранями элементов прослойки, где выполнены условия (1.4), будут грани, где выполнены условия вида

$$(\mathbf{p}^2_+\cdot\hat{\text{Э}}_1)\Big|_{\xi^2=+1} = \pm\tau_*|\hat{\text{Э}}_1|^2\Big|_{\xi^2=+1}, \quad (\mathbf{p}^2_-\cdot\hat{\text{Э}}_1)\Big|_{\xi^2=-1} = \pm\tau_*|\hat{\text{Э}}_1|^2\Big|_{\xi^2=-1}. \tag{1.5}$$

В процессе итераций условия вида (1.5) сохраняются на тех гранях, где мощность диссипации при проскальзывании этих граней относительно блоков неотрицательна. На остальных гранях условия вида (1.5) заменяются условиями (1.4).

Из (1.1)–(1.5) и условий непрерывности напряжений и скоростей на общих гранях смежных элементов прослойки следует

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^1_i &= A^{(1)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_i + A^{(2)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_{i+1} + \Phi^{(1)}_{i+1/2}\mathbf{v}_- + \Phi^{(2)}_{i+1/2}\mathbf{v}_+ + \varphi^{(1)}_{i+1/2},\\ \mathbf{p}^1_{i+1} &= A^{(3)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_i + A^{(4)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_{i+1} + \Phi^{(3)}_{i+1/2}\mathbf{v}_- + \Phi^{(4)}_{i+1/2}\mathbf{v}_+ + \varphi^{(2)}_{i+1/2}; \end{aligned} \tag{1.6}$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{p}^2_-)_{i+1/2} &= B^{(1)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_i + B^{(2)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_{i+1} + \Psi^{(1)}_{i+1/2}\mathbf{v}_- + \Psi^{(2)}_{i+1/2}\mathbf{v}_+ + \psi^{(1)}_{i+1/2},\\ (\mathbf{p}^2_+)_{i+1/2} &= B^{(3)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_i + B^{(4)}_{i+1/2}\mathbf{u}^1_{i+1} + \Psi^{(3)}_{i+1/2}\mathbf{v}_- + \Psi^{(4)}_{i+1/2}\mathbf{v}_+ + \psi^{(2)}_{i+1/2}, \end{aligned} \tag{1.7}$$

$$i = 0, 1, \ldots, N-1.$$

Здесь N — число элементов прослойки; $\mathbf{p}_i^1$, $\mathbf{u}_i^1$ — векторы напряжений и скоростей на гранях $\xi^1 = \pm 1$ элементов; $\mathbf{v}_+$, $\mathbf{v}_-$ — векторы:

$$\mathbf{v}_+ = (u_+^1,\ u_+^2,\ \omega_+), \qquad \mathbf{v}_- = (u_-^1,\ u_-^2,\ \omega_-);$$

u_+^k, u_-^k $(k = 1,\ 2)$ — декартовы компоненты векторов $\mathbf{u}_+$, $\mathbf{u}_-$.

Ниже рассматривается деформирование прослоек с равными нулю напряжениями на торцах прослоек. В этом случае

$$\mathbf{p}_0^1 = \mathbf{p}_N^1 = 0. \tag{1.8}$$

Система уравнений (1.6), (1.8) определяет зависимость векторов $\mathbf{u}_i^1$ от $\mathbf{v}_-$, $\mathbf{v}_+$:

$$\mathbf{u}_i^1 = D_i^- \mathbf{v}_- + D_i^+ \mathbf{v}_+ + \mathbf{d}_i, \quad i = 0,\ 1,\ \ldots,\ N. \tag{1.9}$$

Матрицы $D_i^{\pm}$ и векторы $\mathbf{d}_i$ могут быть вычислены прогонкой, состоящей из двух этапов. На первом этапе уравнения (1.6), (1.8) преобразуются в систему уравнений

$$\mathbf{u}_i^1 = G_i \mathbf{u}_{i+1}^1 + H_i^- \mathbf{v}_- + H_i^+ \mathbf{v}_+ + \mathbf{g}_i, \quad i = 0,\ 1,\ \ldots,\ N-1.$$

При этом матрицы G_i, H_i^-, H_i^+ и векторы $\mathbf{g}_i$ вычисляются по рекуррентным формулам:

$$G_0 = -(A_{1/2}^{(1)})^{-1} A_{1/2}^{(2)}, \qquad \mathbf{g}_0 = -(A_{1/2}^{(1)})^{-1} \varphi_{1/2}^{(1)},$$

$$H_0^- = -(A_{1/2}^{(1)})^{-1} \Phi_{1/2}^{(1)}, \qquad H_0^+ = -(A_{1/2}^{(1)})^{-1} \Phi_{1/2}^{(2)},$$

$$G_{i+1} = L_i^{(1)} A_{i+3/2}^{(2)}, \qquad L_i^{(1)} = (A_{i+1/2}^{(3)} G_i + A_{i+1/2}^{(4)} - A_{i+1/2}^{(1)})^{-1},$$

$$H_{i+1}^- = L_i^{(1)} (\Phi_{i+3/2}^{(1)} - \Phi_{i+1/2}^{(3)} - A_{i+1/2}^{(3)} H_i^-),$$

$$H_{i+1}^+ = L_i^{(1)} (\Phi_{i+3/2}^{(2)} - \Phi_{i+1/2}^{(4)} - A_{i+1/2}^{(3)} H_i^+),$$

$$\mathbf{g}_{i+1} = L_i^{(1)} (\varphi_{i+3/2}^{(1)} - \varphi_{i+1/2}^{(2)} - A_{i+1/2}^{(3)} \mathbf{g}_i), \qquad i = 0,\ 1,\ \ldots,\ N-1.$$

На втором этапе из уравнений

$$\mathbf{u}_{N-1}^1 - (G_{N-1} \mathbf{u}_N^1 + H_{N-1}^+ \mathbf{v}_- + H_{N-1}^+ \mathbf{v}_+ + \mathbf{g}_{N-1}) = 0,$$

$$A_{N-1/2}^{(3)} \mathbf{u}_{N-1}^1 + A_{N-1/2}^{(4)} \mathbf{u}_N^1 + \Phi_{N-1/2}^{(3)} \mathbf{v}_- + \Phi_{N-1/2}^{(4)} \mathbf{v}_+ + \varphi_{N-1/2}^{(2)} = 0$$

определяются D_N^-, D_N^+, $\mathbf{d}_N$:

$$D_N^- = L_N^{(2)} [H_{N-1}^- + (A_{N-1/2}^{(3)})^{-1} \Phi_{N-1/2}^{(3)}], \quad L_N^{(2)} = -[(A_{N-1/2}^{(3)})^{-1} A_{N-1/2}^{(4)} + G_{N-1}],$$

$$D_N^+ = L_N^{(2)} [H_{N-1}^+ + (A_{N-1/2}^{(3)})^{-1} \Phi_{N-1/2}^{(4)}], \quad \mathbf{d}_N = L_N^{(2)} [\mathbf{g}_{N-1} + (A_{N-1/2}^{(3)})^{-1} \varphi_{N-1/2}^{(2)}],$$

а также вычисляются D_i^-, D_i^+, $\mathbf{d}_i$ $(i = N-1,\ N-2,\ \ldots,\ 1,\ 0)$ по рекуррентным формулам

$$D_i^- = G_i D_{i+1}^- + H_i^-, \qquad D_i^+ = G_i D_{i+1}^+ + H_i^+,$$

$$\mathbf{d}_i = G_i \mathbf{d}_{i+1} + \mathbf{g}_i, \qquad i = N-1,\ N-2,\ \ldots,\ 1,\ 0.$$

Обозначим

$$F_{\pm}^{k} = \sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{p}_{\pm}^{2})_{i+1/2} \cdot \mathbf{e}^{k}, \qquad M_{\pm} = \sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{r}_{\pm} \times \mathbf{p}_{\pm}^{2})_{i+1/2} \cdot \mathbf{e}^{3}, \tag{1.10}$$

$$\mathbf{Q}_{\pm} = (F_{\pm}^{1},\ F_{\pm}^{2},\ M_{\pm}),$$

где $\mathbf{e}^{k}$ $(k = 1, 2, 3)$ — базисные векторы декартовой системы координат.

Из (1.7), (1.9), (1.10) следует, что уравнения жесткости прослойки можно записать в форме

$$\mathbf{Q}_{-} = C^{(1)}\mathbf{v}_{-} + C^{(2)}\mathbf{v}_{+} + \mathbf{c}^{(1)}, \qquad \mathbf{Q}_{+} = C^{(3)}\mathbf{v}_{-} + C^{(4)}\mathbf{v}_{+} + \mathbf{c}^{(2)}. \tag{1.11}$$

Здесь матрицы $C^{(k)}$ $(k = 1, \ldots, 4)$ и векторы $\mathbf{c}^{(1)}$, $\mathbf{c}^{(2)}$ очевидным образом связаны с матрицами и векторами в уравнениях (1.7), (1.9).

2. Условия равновесия жестких блоков. Обозначим через S число образующих полосу жестких (недеформируемых) блоков (рис. 1,*в*), через $\mathbf{v}_k$ $(k = 1, 2, \ldots, S)$ — векторы (u_k^1, u_k^2, ω_k), в которых u_k^1, u_k^2 — декартовы компоненты скорости центра k-го блока, ω_k — угловая скорость этого блока.

Полагаем, что растяжение полосы задано в виде условий: блок $k = 1$ неподвижен, а блок $k = S$ движется поступательно с заданной скоростью V, и, следовательно,

$$\mathbf{v}_1 = (0,\ 0,\ 0), \qquad \mathbf{v}_S = (0,\ V,\ 0). \tag{2.1}$$

Если для каждой из прослоек между блоками вычислить изложенным выше методом коэффициенты уравнений жесткости (1.11), то условия равновесия блоков (равенства нулю суммы приложенных к блоку сил и суммы моментов этих сил) можно сформулировать в виде уравнений

$$A_k \mathbf{v}_{k-1} + B_k \mathbf{v}_k + C_k \mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{f}_k, \quad k = 2, 3, \ldots, S-1, \tag{2.2}$$

коэффициенты которых очевидным образом связаны с коэффициентами уравнений жесткости прослоек. Решение системы уравнений (2.1), (2.2) может быть вычислено прогонкой [8].

3. Схема решения задачи о растяжении полосы с прослойками. Решение строится шагами по времени. Напряжения и скорости деформаций на шаге по времени вычисляются итерациями. Вычисление итерации состоит из двух основных этапов:

1. Формирование коэффициентов уравнений (2.2). На первой итерации первого шага по времени оно осуществляется на основе предположения, что все элементы прослоек деформируются упруго и нет проскальзывания прослоек относительно блоков, на всех последующих итерациях — на основе уравнений (1.1) и условий проскальзывания прослоек, определяемых по скоростям деформаций и напряжениям, найденным на предыдущей итерации.
2. Решение уравнений (2.1), (2.2) прогонкой, вычисление по найденным скоростям жестких блоков скоростей деформаций прослоек, напряжений на поверхностях раздела прослоек с блоками и корректировка на основе полученных результатов коэффициентов уравнений (1.1) и условий проскальзывания прослоек.

4. Предельное состояние полосы. Ниже деформирование прослоек считается идеальным упругопластическим. В этом случае сила растяжения полосы не может превосходить значение, при котором в полосе возникает предельное состояние (деформирование при постоянных напряжениях). Предельное значение растягивающей силы условимся называть предельной нагрузкой. Обозначим ее через P_s.

Напряженное состояние

$$\sigma_{22} = 2\tau_*, \qquad \sigma_{11} = \sigma_{12} = 0$$

статически допустимо при растяжении полосы с прослойками. Поэтому [9] предельная нагрузка имеет оценку снизу

$$P_s \geq 2\tau_* d, \tag{4.1}$$

где d — ширина полосы.

Поле скоростей в полосе с заданной системой прослоек является кинематически возможным для полосы, в которой наряду с заданной системой прослоек есть еще какие-либо прослойки. Поэтому [9] предельная нагрузка полосы с заданной системой прослоек — верхняя оценка предельной нагрузки полосы, в которой наряду с заданной системой прослоек есть еще какие-либо прослойки.

Из численных расчетов следует, что предельные нагрузки и локализация деформаций в предельном состоянии при растяжении полосы с прослойками зависят от ограничений поперечных смещений и поворотов жестких блоков. Ниже рассматриваются два крайних случая: растяжение при ограничениях, исключающих возможность поперечных смещений и поворотов блоков, и растяжение без каких-либо ограничений поперечных смещений и поворотов. Примером растяжения полосы без поперечных смещений и поворотов блоков может быть растяжение в условиях контакта поверхностей полосы с абсолютно гладкими и абсолютно жесткими плитами.

5. Предельные нагрузки и локализация деформаций при растяжении без поперечных смещений и поворотов блоков. Простейший случай растяжения полосы без поперечных смещений и поворотов блоков — растяжение полосы, состоящей из двух блоков с прослойкой между ними. В этом случае, согласно условиям (2.1), один из блоков неподвижен, а другой движется поступательно вдоль оси полосы.

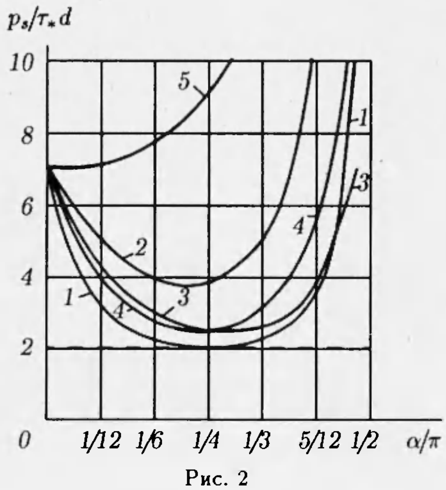

Рис. 2

На рис. 2 кривой 5 показана зависимость предельной нагрузки полосы из двух блоков от угла наклона прослойки (угол α на рис. 1,a). Здесь и всюду ниже в расчетах толщина h прослойки считалась равной одной десятой ширины d полосы (рис. 1,a).

При растяжении без поперечных смещений и поворотов условия деформирования каждой из прослоек полосы те же, что и при растяжении полосы с одной прослойкой. Поэтому предельные нагрузки при растяжении без поперечных смещений и поворотов будут соответствовать кривой 5 на рис. 2, если под углом α на этом рисунке понимать наименьший по модулю среди углов наклона имеющихся в полосе прослоек.

Деформация полосы в предельном состоянии при растяжении без поперечных смещений и поворотов локализуется в прослойке с наименьшим по модулю углом наклона. Если прослоек с наименьшим по модулю углом наклона несколько, то в предельном состоянии могут деформироваться все эти прослойки, либо только какая-либо их часть.

6. Предельные нагрузки при растяжении полосы с двумя прослойками. Предельные нагрузки при растяжении полосы с двумя прослойками без ограничения поперечных смещений и поворотов блока между прослойками зависят от ориентации прослоек (углов α, β) и расстояния L между прослойками (рис. 3,*а*).

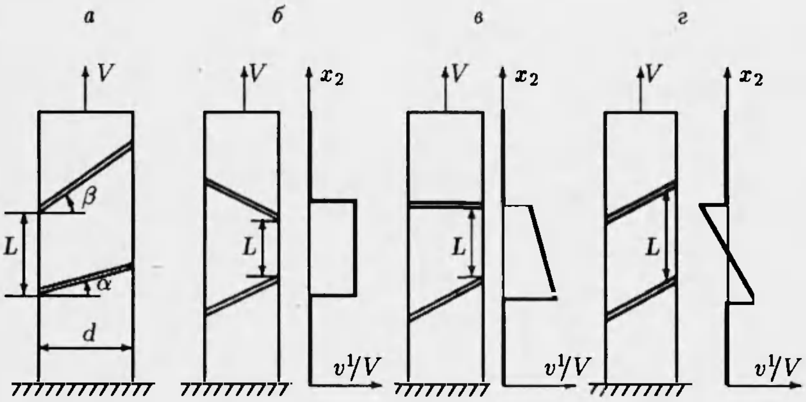

Рис. 3

Зависимость предельной нагрузки от ориентации прослоек представлена на рис. 2 в виде зависимости предельной нагрузки от угла α при $\beta = -\alpha$, α и 0 (кривые *1–3*). Область между кривыми *1* и *3* отвечает предельным нагрузкам при $-\alpha \leq \beta \leq 0$, а между кривыми *3* и *2* — предельным нагрузкам при $0 \leq \beta \leq \alpha$. Расчеты проводились при $h/d = 0,1$, $L/d = 1$.

Предельные нагрузки при $\beta = -\alpha$ не зависят от расстояния L между прослойками. Зависимость предельных нагрузок от L при $\beta \neq -\alpha$ проиллюстрирована на рис. 2 кривой *4*, соответствующей предельным нагрузкам при $\beta = \alpha$, $L/d = 2$. Область между кривыми *1* и *4* отвечает предельным нагрузкам при $-\alpha \leq \beta \leq \alpha$, $L/d = 2$. Она существенно меньше области между кривыми *1* и *2*, соответствующей предельным нагрузкам при $-\alpha \leq \beta \leq \alpha$, $L/d = 1$. Из численных расчетов следует, что область предельных нагрузок с дальнейшим увеличением L/d уменьшается, стягиваясь к кривой *1*. Поэтому при достаточно большом расстоянии между прослойками предельную нагрузку можно определять по кривой *1*, принимая в качестве угла α наибольший из модулей углов наклона прослоек.

Штриховая линия на рис. 2 — предельная нагрузка при растяжении однородной идеально пластической полосы с пределом текучести τ_*. Согласно (4.1), она является нижней оценкой предельных нагрузок при растяжении полосы с прослойками. Из сопоставления штриховой линии с кривой *1* следует, что предельные нагрузки при растяжении полосы с двумя достаточно удаленными друг от друга прослойками, углы наклона которых удовлетворяют неравенству

$$\frac{\pi}{6} \leq \max(|\alpha|, |\beta|) \leq \frac{\pi}{3}, \tag{6.1}$$

отличаются от нижней оценки не более чем на 15 %.

Предельные нагрузки полосы с двумя прослойками —верхние оценки предельных нагрузок полосы с числом прослоек, бо́льшим двух. Поэтому отличие предельных нагрузок полосы с любым (бо́льшим двух) числом прослоек от нижней оценки предельных нагрузок не будет превышать 15 % в случае, когда максимальный по модулю из углов наклона прослоек удовлетворяет неравенству (6.1).

Из сопоставления кривых *1* и *5* на рис. 2 следует, что возможность поперечных смещений существенно уменьшает предельные нагрузки. Поэтому при растяжении полосы с прослойками поперечные смещения будут всегда, когда нет ограничений, исключающих их возникновение. Скорости v^1 поперечных смещений оси полосы в предельном состоянии полосы с двумя прослойками при $\beta = -\alpha$, 0 и α представлены на рис. 3,*б–г* соответственно.

7. Волны поперечных смещений и локализация деформаций при растяжении полосы с тремя и пятью прослойками. Авторами было проведено большое число численных экспериментов по исследованию предельных нагрузок, волн поперечных смещений и локализации деформаций при растяжении полосы с тремя и пятью прослойками. Рассматривались прослойки с углами наклона к оси x_1, модули которых не превосходят $\pi/4$. Углы наклона прослоек выбирались случайно с использованием датчика случайных чисел. Расчеты велись при $L/d = 1$.

Из изложенных в п. 6 результатов численных экспериментов вытекает, что при растяжении полосы с двумя прослойками предельные нагрузки не меньше тех, которые соответствуют кривой *1* на рис. 2, если в качестве угла α на этом рисунке принять наибольший из модулей углов наклона прослоек. Из результатов численных экспериментов по изучению растяжения полосы с тремя и пятью прослойками следует, что это свойство предельных нагрузок сохраняется и при растяжении полосы с тремя и пятью прослойками. Во всех проведенных экспериментах предельные нагрузки были не меньше тех, которые определяются кривой *1* на рис. 2 при условии, что в качестве угла α на этом рисунке принимается наибольший из модулей углов наклона прослоек.

Полученные во всех экспериментах предельные нагрузки незначительно отличались от тех, которые соответствуют кривой *1* на рис. 2. Поэтому в качестве предельных нагрузок при растяжении полосы с прослойками, число которых больше двух, можно принимать нагрузки, соответствующие кривой *1* на рис. 2 при условии, что в качестве угла α на этом рисунке принимается наибольший из модулей углов наклона прослоек. При растяжении полосы с тремя и пятью прослойками деформация полосы в предельном состоянии локализуется в одной или в двух прослойках. Локализация происходит в прослойке с наибольшим по модулю углом наклона либо в этой и еще какой-либо прослойке.

При растяжении полосы с тремя и пятью прослойками поперечные смещения в виде волны возникают уже при упругих деформациях. В качестве иллюстрации волн поперечных смещений на рис. 4,*б–г* представлены скорости v^1 поперечных смещений оси полосы с указанными на рис. 4,*а* прослойками при упругом деформировании, начале пластического деформирования и в предельном состоянии. Соответствующие скорости v^2 продольных смещений оси полосы приведены на рис. 4,*д–ж*.

При растяжении полосы с указанными на рис. 4,*а* прослойками деформация в предельном состоянии полосы локализуется в одной прослойке (рис. 4,*г,ж*). Из рис. 4,*б,д* видно, что эта прослойка отличается от других уже на стадии упругого деформирования тем, что в ней скачки скоростей (отрезки AB и CD на рис. 4,*б,д*) больше, чем в других прослойках. Различие возрастает с началом пластического деформирования (рис. 4,*в,е*). Отсюда следует, что в рассматриваемом примере можно прогнозировать локализацию деформаций в предельном состоянии полосы по скачкам скоро-

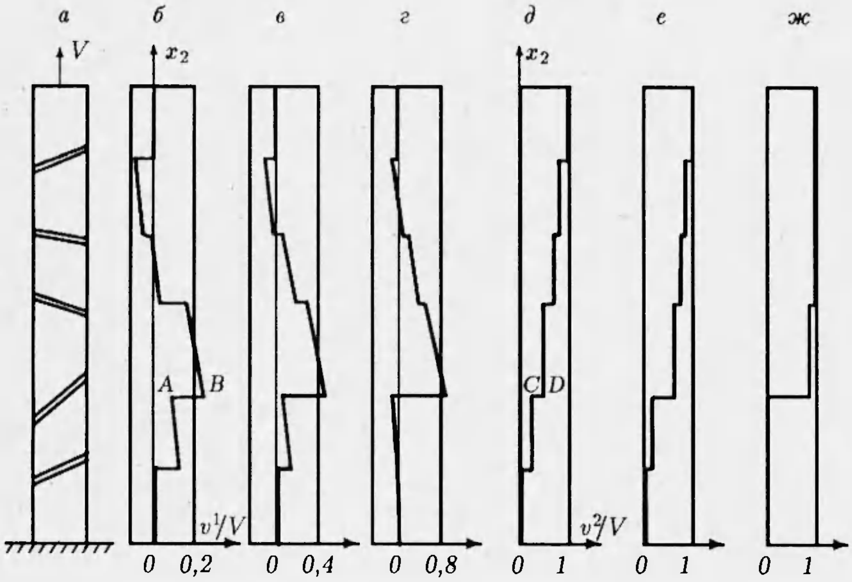

Рис. 4

стей при упругом и начальном упругопластическом деформировании.

Вывод о возможности прогнозирования локализации деформаций при растяжении полосы с прослойками по скачкам скоростей на стадиях упругого и начального упругопластического деформирования подтверждается результатами всех проведенных авторами численных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В.** Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985.
2. **Структурные** уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин, Ю. В. Гриняев, В. И. Данилов и др. Новосибирск: Наука, 1990.
3. **Новые** материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье и др. Новосибирск: ВО «Наука», 1993.
4. **Негрескул С. И., Псахье С. Г., Коростелев С. Ю., Панин В. Е.** Моделирование зернистых сред методом элементной динамики. Томск, 1989. (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Том. науч. центр, № 39).
5. **Макаров П. В.** Микродинамическая теория пластичности среды с внутренней структурой // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела: Тр. Междунар. конф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990.
6. **Атаманов О. А., Макаров П. В., Николаев А. П.** Математическое моделирование процесса упругопластической деформации поликристаллических агрегатов // Там же.
7. **Иванов Г. В., Кургузов В. Д.** Безмоментная модель упругопластического деформирования и предельного состояния тонких прослоек // ПМТФ. 1994. № 6.
8. **Годунов С. К., Рябенький В. С.** Разностные схемы. М.: Наука, 1977.
9. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.

Поступила в редакцию 17/V 1994 г.