

Кинетика локализации деформации в металлической полосе при растяжении

Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты моделирования процесса локализации деформации в металлической полосе с использованием аналитического и численного методов. Показано, что возникновение локализации деформации обусловлено исходной неоднородностью свойств материала и условиями нагружения. Чем более однородны свойства материала, тем выше уровень деформации, при котором начинается развитие локализованного течения. Нагрев металла при адиабатическом процессе деформирования вследствие теплового эффекта пластической деформации вызывает снижение уровня деформации, при котором начинается ее локализация. Аналогичное влияние оказывает пропускание импульсного электрического тока с учетом его термического воздействия.

Ключевые слова: локализация деформации, исходная неоднородность свойств, изотермический и адиабатический процессы.

Введение. Практически все процессы интенсивного пластического формоизменения металлов сопровождаются локализацией деформации. Исследования явления локализации деформации при чистом сдвиге, не вызывающем изменения площади поперечного сечения, достаточно полно освещены в литературных источниках [1–3]. Процесс локализации деформации при растяжении, приводящий к образованию шейки, изучен гораздо меньше [4], и исследования в основном ограничивались оценкой сопротивления разрушению и предельной пластичности материалов на основании экспериментальных результатов (обычно использовали образцы с цилиндрической рабочей частью) [5].

Развитие локализации при растяжении тонкой полосы сопровождается возникновением напряженно-деформированного состояния (НДС), близкого к плоскому деформированному состоянию (ПДС), вблизи ее продольной оси, что вызвано стеснением деформации по ширине такой полосы. При этом приращение пластической деформации растяжения в продольном направлении (по оси y) практически равно деформации сжатия по толщине полосы (по оси z), т.е. $\delta\varepsilon_y^p \approx -\delta\varepsilon_z^p$.

Однородность НДС при квазистатическом растяжении металлической полосы сохраняется вплоть до условий, соответствующих иницированию локализации деформации. В металле, чувствительном к скорости деформации, ее локализация сопровождается снижением (вплоть до нулевой) скорости деформации вне области локализации. Возникновению локализации соответствует момент достижения максимальной нагрузки или соответствующей ей критической величины деформации.

Кинетика деформирования материала после иницирования локализации, влияние параметров нагружения, его поведение (деформационное упрочнение, чувствительность к скорости деформации и др.), а также влияние однородности свойств изучены недостаточно для их учета в процессах

формоизменения при больших деформациях. Исследования кинетики пластического деформирования металла, включая стадии его однородного (на макроуровне) и последующего локализованного деформирования, весьма актуальны, поскольку в ряде случаев они определяют выбор материалов для изготовления конструктивных элементов и оптимальных режимов металлообработки.

В данном сообщении приведены некоторые результаты исследований кинетики локализации пластической деформации полос из тонколистового металла при квазистатическом растяжении, выполненных с использованием аналитического и численного моделирования. Оценено влияние деформационного упрочнения, вязкости, повышения температуры, сопровождающего адиабатический процесс деформирования, и пропускания импульса электрического тока высокой плотности.

Общий анализ процесса локализации деформации. Локализация деформации в полосе, растягиваемой с заданной низкой скоростью, при которой влиянием волновых процессов можно пренебречь, является результатом неустойчивости однородного деформирования, т.е. состояния, при котором локальное повышение скорости деформации сопровождается понижением нагрузки.

Анализ условий инициирования локализации деформации. Условие инициирования локализации при растяжении, определяющее дальнейшее развитие деформации в локальной области материала, можно представить в виде

$$\frac{d(S\sigma)}{d\varepsilon} = 0 \Rightarrow S \frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \sigma \frac{dS}{d\varepsilon} = 0,$$

из которого следует связь между напряжениями и деформациями в момент инициирования локализации:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -d\psi = d\varepsilon, \quad (1)$$

где S и ψ – площадь поперечного сечения полосы и его относительное сужение при растяжении; σ – истинное напряжение; $d\varepsilon$ – приращение деформации.

Нарушение условия (1) вызывает переход от однородного НДС к неоднородному, т.е. переход от равномерного изменения сечения по всей длине полосы к его неравномерному изменению с образованием шейки.

Примем зависимость истинного напряжения σ от пластической деформации ε , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$, времени t и температуры T в общем виде $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T)$ и после дифференцирования получим:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial T} dT.$$

После простых преобразований уравнение принимает вид

$$d\sigma = M\dot{\varepsilon}dt + \mu \frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} dt - R_t dt - R_T \frac{dT}{dt} dt, \quad (2)$$

где M – модуль деформационного упрочнения, $M = \partial\sigma/\partial\varepsilon$; μ – коэффициент вязкости, $\mu = \partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$; R_t – модуль разупрочнения (релаксации напряжений во времени), $R_t = -\partial\sigma/\partial t$; R_T – модуль термического разупрочнения, $R_T = -\partial\sigma/\partial T$.

Тогда условие локализации деформации (1) с учетом уравнения (2) запишем в виде

$$\frac{M}{\sigma} = 1 - \frac{1}{\dot{\varepsilon}\sigma} \left(\mu \frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} + R_t + R_T \frac{dT}{dt} \right). \quad (3)$$

Постоянная скорость деформации при постоянной температуре. Нагружение вызывает локализацию при напряжении и деформации, которые определяются из следующего уравнения (в данном случае $d\dot{\varepsilon}/dt = 0$; $dT/dt = 0$; $R_t = 0$):

$$\frac{M}{\sigma} = 1, \quad \text{т.е.} \quad M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T). \quad (4)$$

Для кривой деформирования, аппроксимируемой уравнением $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = A(\dot{\varepsilon}, T)\varepsilon^n$ (при $n < 1$), модуль деформационного упрочнения $M = nA(\dot{\varepsilon}, T)\varepsilon^{n-1}$, следовательно, нарушение однородности деформирования по условию (4) инициируется при критической величине деформации $\varepsilon_{cr} = n$ и напряжении $\sigma = A(\dot{\varepsilon}, T)n^n$, причем ε_{cr} не зависит от скорости деформации и температуры при условии их постоянства в процессе деформирования. Повышение модуля деформационного упрочнения (увеличение n) приводит к росту ε_{cr} .

Общий случай нагружения. В этом случае скорость деформации и температура изменяются при деформировании, и инициирование локализации определяется историей предшествующего нагружения – $\dot{\varepsilon}(t)$ и $T(t)$.

Для оценки влияния на локализацию деформации ее скорости и температуры, а также разупрочнения, изменяющихся в процессе деформирования, следует учитывать их влияние на кривую деформирования материала.

Уменьшение (увеличение) напряжений в результате действия каждого из указанных факторов соответствует уменьшению (увеличению) ε_{cr} . На основании такой качественной оценки из уравнения (3) следует, что увеличение скорости деформации вызывает рост критической деформации, а процессы разупрочнения и повышение температуры – ее снижение.

При высокой скорости деформации влияние разупрочнения на локализацию незначительно ввиду кратковременности процесса нагружения, а изменение критической деформации определяется в основном суммарным эффектом скорости деформации и температуры. Реальный процесс высокоскоростного деформирования вследствие его кратковременности является адиабатическим, и температура повышается с ростом величины деформации и ее скорости. Повышение температуры, равное

$$\Delta T = \int_0^t \frac{\sigma(t)}{c_V} \dot{\varepsilon}(t) dt; \quad \sigma(t) = \sigma[\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t), T(t)],$$

происходит с ростом скорости деформации вследствие увеличения напряжений, что вызывает снижение ε_{cr} (c_{γ} – удельная теплоемкость металла).

В случае дополнительного воздействия импульса электрического тока на металлическую полосу при ее деформировании следует учитывать соответствующее дополнительное повышение температуры, вызванное термическим (джоулевым) разогревом полосы. Кроме того, следовало бы учитывать прямое (не тепловое) действие тока [6, 7] на процесс деформирования, однако для этого в настоящее время отсутствует достаточный объем надежных экспериментальных данных.

Моделирование процесса локализации деформации. Общие дифференциальные уравнения, описывающие процесс локализации, позволяют оценить качественное влияние условий нагружения и параметров, характеризующих деформирование материала, на инициирование локализации, однако они не применимы для оценки особенностей деформирования после ее начала. Для получения такой информации обычно используется численное моделирование процесса локализации.

Физико-механические свойства реального металлического материала характеризуются существенной микронеоднородностью, которая вызывает как микро-, так и макронеоднородность деформирования [8]. Вследствие этого инициирование локализации деформации в какой-либо точке сопровождается снижением скорости деформации в прилегающих объемах.

Расчет деформирования при растяжении идеально однородной полосы не позволяет оценить кинетику инициирования локализации деформации. Поэтому при моделировании инициирования локализации деформации в тонком слое металла малой протяженности в средней части полосы принимали предел текучести, пониженный на 1...5%. В материале с деформационным упрочнением наличие такого слоя практически не влияет на кривую напряжение – деформация до возникновения локализации.

Модель материала и методы решения. Для качественной оценки процесса локализации, как и в [9], рассматривали ее кинетику в стержне из вязкопластического материала со степенным деформационным упрочнением:

$$\sigma = C(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \dot{\varepsilon}^m f(T), \quad (5)$$

где C , m – константы материала.

Как указывалось ранее, локализация возможна при наличии исходной неоднородности свойств, формы или структуры по длине стержня. Принимаем, что стержень состоит из участков A и B с различным сопротивлением деформации. Показатель исходной неоднородности χ такого материала определяли как отношение значений C для более (участок A) и менее (участок B) прочного сечений стержня:

$$\chi = C_B / C_A. \quad (6)$$

Приведенные далее оценки выполнены для тонкого стержня с коротким участком пониженного сопротивления пластическому деформированию при квазистатическом растяжении с постоянной скоростью v_0 . При этом пре-

небрегали волновыми процессами в стержне и отклонением напряженного состояния от одноосного в области локализованного течения. Такое приближение справедливо при низкой скорости растяжения или малой длине стержня, когда выполняется условие

$$t \gg 2L/a,$$

где t – время деформирования; L – длина стержня; a – скорость распространения пластической деформации по стержню.

Нагрузка во всех поперечных сечениях стержня одинакова и, следовательно, $S_A \sigma_A = S_B \sigma_B$. Если в начальный момент площади поперечного сечения участков стержня A и B одинаковы ($S_A = S_B = S_0$), продольная деформация в них определяется изменением сечений

$$\varepsilon_A = \ln\left(\frac{S_0}{S_A}\right); \quad \varepsilon_B = \ln\left(\frac{S_0}{S_B}\right), \quad (7)$$

откуда

$$S_A = S_0 \exp(-\varepsilon_A); \quad S_B = S_0 \exp(-\varepsilon_B). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7) и (5), после преобразований получаем

$$\dot{\varepsilon}_A^m = \chi \frac{f(T_A)}{f(T_B)} \exp(-\varepsilon_B + \varepsilon_A) \left(\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_B}{\varepsilon_0 + \varepsilon_A}\right)^n \dot{\varepsilon}_B^m. \quad (9)$$

Это уравнение определяет соотношение скоростей деформации в сечениях с различной прочностью. Как следует из его анализа, возникновение локализации обусловлено исходной неоднородностью свойств материала ($\chi < 1$), деформаций или условий нагружения ($T_A < T_B$). Отметим, что данный вывод согласуется с результатами исследований кинетики инициирования полос локализованного сдвига [10].

Локализация деформации в полосе из материала без деформационного упрочнения. Основные расчеты проведены для полосы длиной 100 мм с коротким участком пониженного сопротивления пластическому деформированию $L_B = 2$ мм при ее продольном растяжении со скоростью 10 мм/с. Если пренебречь деформационным упрочнением ($n = 0$), для изотермического процесса ($T_A = T_B = \text{const}$), интегрируя уравнение (9), получаем

$$\varepsilon_A = -m \ln \left\{ 1 - \chi^{1/m} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon_B}{m}\right) \right] \right\}. \quad (10)$$

Результаты расчетов по уравнению (10) свидетельствуют о существенном влиянии однородности свойств полосы на уровень деформации, при котором нарушается однородность деформирования и начинается развитие локализованного течения (рис. 1). Следует отметить, что скорость растяжения не влияет на соотношение деформаций в участках A и B .

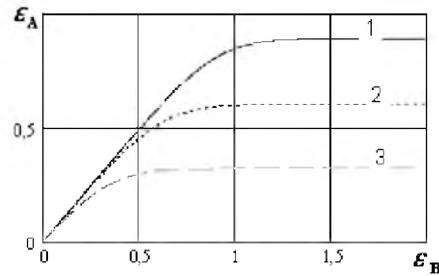


Рис. 1. Соотношение деформаций ε_A и ε_B в полосе при $m = 0,125$ и различных значениях χ : 1 – $\chi = 0,9999$; 2 – $\chi = 0,999$; 3 – $\chi = 0,99$.

Локализация деформаций в полосе из материала с деформационным упрочнением. Для оценки влияния параметров упрочнения n и m на соотношение деформации в участках различной прочности в полосе выполняли численное интегрирование уравнения (9).

Из анализа результатов этих расчетов следует, что изменение скорости растяжения v_0 не влияет на соотношение деформации в участках A и B . С увеличением эффектов упрочнения (рост параметров n и m) и показателя однородности (приближение χ к единице) уровень деформаций, при котором сохраняется однородность деформирования, повышается. Некоторые результаты расчетов при различных значениях параметров n и m и показателе однородности $\chi = 0,99$ представлены на рис. 2, 3.

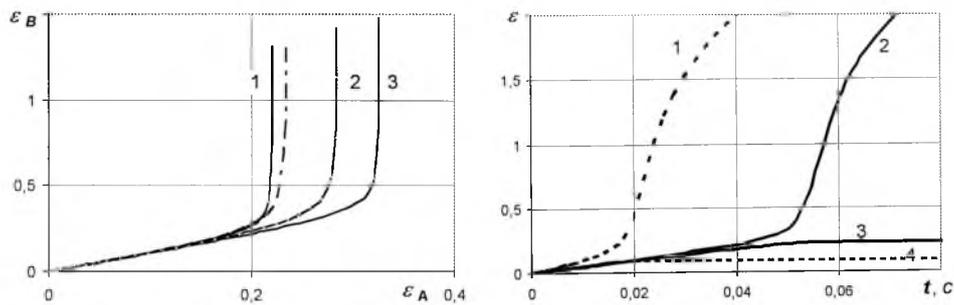


Рис. 2. Соотношение деформаций ε_A и ε_B при различных параметрах изотермического упрочнения ($\chi = 0,99$): 1 – $n = 0,2$, $m = 0,0125$; 2 – $n = 0,2$, $m = 0,025$; 3 – $n = 0,3$, $m = 0,0125$. (Штрихпунктирная кривая – адиабатический процесс при $n = 0,2$, $m = 0,025$ ($C = 2,0$ ГПа, $c_V = 3,6$ МДж/(м³ · К), $T_{cr} = 1000^\circ\text{C}$.)

Рис. 3. Изменение во времени пластической деформации в участках B (1, 2) и A (3, 4) для $\chi = 0,99$ (сплошные линии) и $0,9$ (штриховые линии) при $n = 0,2$, $m = 0,0125$, $v_0 = 0,5$ м/с.

После начала локализации деформации ее развитие ограничено участком B с пониженной прочностью, в более прочном сечении (область A) уровень деформации практически не изменяется. Как следует из приведенных зависимостей, развитие локализации согласно уравнению (5) не зависит от уровня напряжений.

Влияние адиабатических условий деформирования. При этих условиях пластическое течение сопровождается повышением температуры вследствие теплового эффекта пластической деформации. Принимая, что вся работа

неупругого деформирования превращается в тепло ($\eta = 1$), и пренебрегая эффектами теплопроводности, что применимо для кратковременных процессов деформирования, соотношение скоростей деформации в участках *A* и *B* определяется уравнением (9), температура – скоростью ее повышения в каждом из участков в процессе деформирования,

$$\Delta T = \int_0^t \dot{T} dt, \quad \dot{T} = \eta \frac{\sigma \dot{\varepsilon}}{c_V}; \quad f(T) = 1 - \frac{\Delta T}{T_{cr}}$$

Некоторые результаты расчетов для процессов локализации при адиабатических условиях нагружения приведены на рис. 2, 4.

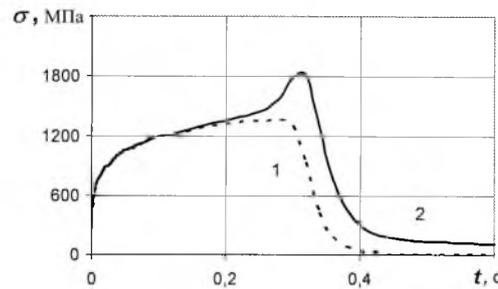


Рис. 4. Изменение во времени напряжений в участках *A* (1) и *B* (2) в полосе ($C = 2,0$ ГПа; $c_V = 3,6$ МДж/(м³ · К); $T_{cr} = 1000^\circ\text{C}$; $\chi = 0,99$; $n = 0,2$; $m = 0,025$) при $v_0 = 0,1$ м/с.

Термический эффект пропускания импульса электрического тока (ИЭТ) высокой плотности. Пропускание электрического тока через металлическую полосу приводит к ее дополнительному нагреву. При заданной величине тока его средняя плотность возрастает в процессе деформирования в результате уменьшения поперечного сечения полосы, что вызывает более интенсивный нагрев в области локализации пластической деформации. Скорость повышения температуры за счет действия импульса тока $I(t)$ с учетом изменения площади поперечного сечения полосы при продольной деформации ε ($S = S_0 \exp \varepsilon$) определяется зависимостью

$$\dot{T}_{IEC} = \frac{i^2 \rho}{c_V} = \frac{[i_0(t) \exp \varepsilon]^2 \rho}{c_V}; \quad i_0(t) = \frac{I(t)}{S_0},$$

где $i_0(t)$ – номинальная плотность тока, соответствующая плотности тока в недеформированной полосе.

Расчетная оценка влияния ИЭТ выполнена для случая линейного роста номинальной плотности тока (отнесена к начальному сечению проводника) до максимальной величины $i_{max} = 3 \cdot 10^7$ А/м² за время $t_H = 0,5$ с, $i(t) = i_{max}(t/t_H)$. Реальная плотность тока повышается в процессе растяжения по мере уменьшения площади поперечного сечения полосы. Вследствие этого после начала локализации деформации тепловой эффект тока в области локализации резко повышается.

Основные параметры, использованные в расчетах процессов локализации: $L = 100$ мм; $L_B = 2$ мм; $v_0 = 0,1$ м/с; $\dot{\varepsilon}_0 = v_0/L_A = 1$ с⁻¹; $C = 2000$ МПа; $\varepsilon_0 = 0,00005$; $n = 0,2$; $T_{cr} = 1000^\circ\text{C}$; $m = 0,025$; $\chi = 0,99$; $\rho = 10^{-7}$ Ом·м; $c_V = 3,6$ МДж/(м³·К).

Как следует из анализа полученных зависимостей (рис. 5), действие ПЭТ вызывает понижение уровня пластической деформации, при котором возникает локализованное течение, а максимум напряжений смещается в область меньших деформаций. Причем влияние тока более эффективно в области локализованного течения. В области малых деформаций (менее 20%) отрезки кривых, соответствующие участкам *A* и *B* при адиабатическом процессе деформирования и при дополнительном действии тока, практически совпадают.

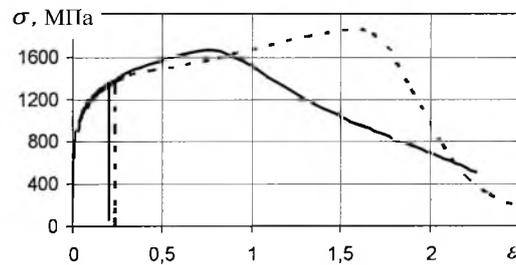


Рис. 5. Кривые напряжение – деформация для участков *A* и *B* при адиабатическом процессе деформирования (штриховая линия) и при дополнительном нагреве пропусканием электрического тока (сплошная линия).

Таким образом, результаты расчетов процесса деформирования тонкой полосы с учетом эффекта джоулевого разогрева при параметрах, приведенных выше, свидетельствуют, что локальное повышение температуры (большой нагрев в области шейки) сдвигает начало локализации в область меньших деформаций (рис. 5).

Отметим, что в расчетах не учитывается нестационарность нагружения в результате интерференции волн напряжений, а также прямое (нетермическое) воздействие электрического тока на процессы пластической деформации.

Моделирование процессов локализации деформации методом конечных элементов. Такое моделирование позволяет оценить распределение деформаций в области их локализации с учетом совместного влияния на этот процесс вязкости, адиабатических условий и других факторов.

Моделирование процесса локализации деформации при ПДС. Данное моделирование было использовано для оценки особенностей развития локализации деформации в листовом материале.

Рассматривается плоская деформация полосы металла с поперечным сечением $s \times L_1$ в плоскости xu (толщина $s = 2$ мм, ширина $L_1 = 100$ мм) при растяжении вдоль оси y (рис. 6). С учетом симметрии нагружения и деформации поперечного сечения использована конечноэлементная модель четверти поперечного сечения полосы с размерами исходных прямоугольных конечных элементов $0,1 \times 0,1$ мм.

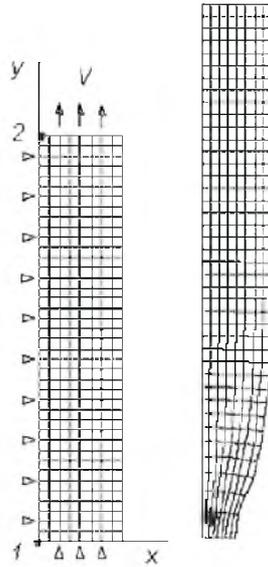


Рис. 6. Конечноэлементная модель четверти поперечного сечения полосы в исходном состоянии и через 150 мкс после нагружения. (Два нижних ряда элементов – участок с пониженным пределом текучести.)

Скорость растяжения v на нагружаемой поверхности полосы (на рис. 6 сечение с точкой 2) была принята равной 10 м/с после начального периода (10 мкс) ее линейного нарастания. Его увеличение снижает влияние нестационарных процессов на НДС. На противоположной поверхности (на рис. 6 сечение с точкой 1) перемещение по оси y принимали нулевым. В данном случае номинальная начальная скорость деформации $\dot{\epsilon} = 2v/L_1 = 2000 \text{ с}^{-1}$.

Для расчета НДС с учетом нагрева металла в результате пластической деформации использовали упруговязкопластическую модель поведения материала. Его нелинейное поведение описывали уравнением пластического деформирования Джонсона–Кука, объемное сжатие – упрощенным уравнением состояния Грюнайзена:

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - (T^*)^m], \quad (11)$$

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0), \quad \dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0, \quad p = \rho c^2 \epsilon_V + \gamma E_T,$$

где A, B – константы, соответствующие пределу текучести, $A = B = 350 \text{ МПа}$; $n = 0,5$; C, m, T_m – константы материала, $C = 0,02$, $m = 1$, $T_m = 910^\circ\text{C}$; T_0 – начальная температура, $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $\dot{\epsilon}_0$ – скорость деформации, $\dot{\epsilon}_0 = 10 \text{ с}^{-1}$; ρ – плотность металла, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$; c – скорость упругой волны, $c = 4680 \text{ м/с}$; γ – коэффициент Грюнайзена, $\gamma = 2$; E_T – удельная тепловая энергия (начальное значение $E_0 = 0$); ϵ_V – упругая деформация объемного сжатия. В расчетах также использовались следующие параметры материала: E – модуль Юнга, $E = 200 \text{ ГПа}$; ν – коэффициент Пуассона, $\nu = 0,3$; c_p – теплоемкость, $c_p = 450 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

При моделировании инициирования локализации деформации и связанного с этим образования шейки вблизи закрепленной поверхности полосы (на рис. 6 сечение с точкой 1) в прилегающих к этой поверхности конечных элементах принимали предел текучести ниже на 5% ($A = 332,5$ МПа), чем в остальных конечных элементах.

Основные результаты расчетов приведены на рис. 7–11. Наибольшее влияние на протяженность области локализованного деформирования (шейка) оказывает показатель степенного деформационного упрочнения n .

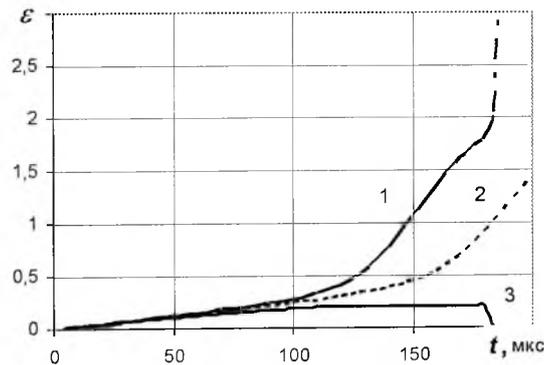


Рис. 7. Изменение эквивалентной деформации во времени вблизи поверхности закрепления при адиабатическом (1) и изотермическом (2) деформировании и у нагружаемой поверхности полосы (3) при адиабатическом и изотермическом деформировании.

Как следует из приведенных зависимостей, при выбранных для расчета параметрах материала и нагружения локализация деформации проявляется в виде расхождения кривых роста пластической деформации во времени вблизи поверхности закрепления и у нагружаемой поверхности полосы (на рис. 6 точки 1 и 2). Это расхождение, как видно из рис. 8 и 9, резко возрастает через 100 мкс после начала нагружения, т.е. при общей деформации, равной примерно 20...25%. Дальнейшее растяжение сопровождается локализацией деформации с образованием шейки протяженностью примерно $1,5s$, что соответствует размерам шейки при растяжении цилиндрических образцов [11]. Объем материала в области шейки практически не изменяется в процессе деформирования, пластическая деформация металла вне шейки сохраняется на уровне, достигнутом к моменту инициирования локализации (рис. 7). Через 180 мкс после начала нагружения дальнейшая деформация сосредотачивается в узкой области шейки, соизмеримой с размером конечного элемента.

Из результатов расчетов следует, что в момент начала локализации напряжение достигает максимального значения и в дальнейшем плавно снижается до начала резкого сужения области пластического деформирования. На заключительной стадии деформирования растяжение сосредоточено в узкой области шейки, что вызывает в ней резкое повышение скорости деформации и уровня напряжений. На этой же стадии вследствие быстрого изменения нагрузки возникает нестационарное НДС, вызванное распространением упругопластических волн, что проявляется в немонотонном изменении напряжений (рис. 8).

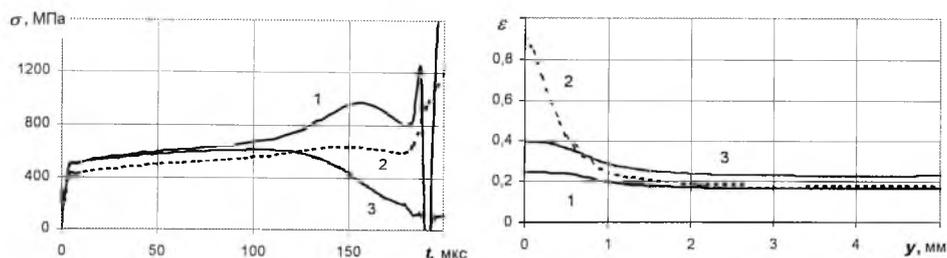


Рис. 8. Изменение во времени продольного σ_y (1) и эквивалентного σ_{eq} (2) напряжений у поверхности закрепления, а также напряжения σ_y (3) у нагружаемой поверхности полосы. Рис. 9. Распределение общей деформации ϵ_y вдоль оси y через 100 (1) и 150 мкс (2) после начала нагружения при адиабатическом деформировании. (3 – распределение деформации через 150 мкс после начала нагружения при изотермическом деформировании.)

После начала образования шейки напряжение вне шейки понижается, а в самой области (шейке) локализации деформации повышается вследствие более интенсивного деформационного и скоростного упрочнения (рис. 9). По мере развития локализованной деформации градиент продольной скорости повышается и в конечном итоге вся деформация и изменение ее продольной скорости сосредотачиваются в узкой области локализации (рис. 10).

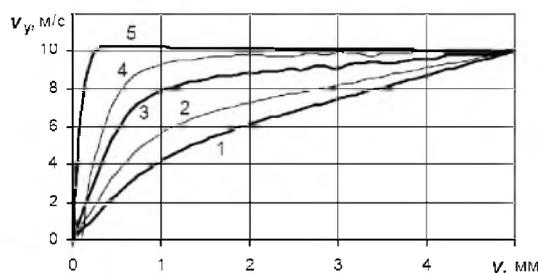


Рис. 10. Распределение продольной скорости в полосе через 100 (1) 110 (2), 120 (3), 125 (4) и 150 мкс (5) после начала нагружения.

Повышение температуры, вызванное тепловым эффектом пластической деформации, существенно влияет на развитие локализованной деформации и размеры области локализации, в которой температура повышается до критической величины T_m . При изотермическом процессе деформирования уровень напряжений выше, а максимальная деформация в области локализации ниже, чем при адиабатическом процессе деформирования (рис. 9).

Моделирование процесса локализации деформации при ПНС. Данное моделирование было использовано для оценки влияния трехмерного деформированного состояния в тонкой полосе на развитие локализации деформации. Рассчитывали деформирование полосы длиной $L = 100$ мм и шириной 10 мм с областью пониженной прочности ($L_B = 4$ мм) при растяжении с постоянной скоростью в изотермических условиях.

Для упругопластической металлической полосы с низким деформационным упрочнением (модуль Юнга $E = 200$ ГПа, модуль упрочнения $M = 10$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 300$ МПа, показатель исходной неодно-

родности $\chi = 0,9$, скорость растяжения $v_0 = 0,05$ м/с) заметная локализация ограничена только областью материала с пониженной прочностью. Кривые распределения деформаций по оси полосы, соответствующие времени 0,1... ..0,5 с от начала действия нагрузки (рис. 12), свидетельствуют о том, что локализованная деформация не распространяется на прилегающие области материала (протяженность области локализации увеличивается в результате ее удлинения при деформации). Деформация по ширине полосы для момента времени $t = 0,5$ с (около 20%) мала по сравнению с деформацией по ее толщине (около 300%). Интенсивная продольная деформация практически сосредотачивается в пределах одного-двух слоев конечных элементов. С повышением модуля упрочнения область локализации расширяется.

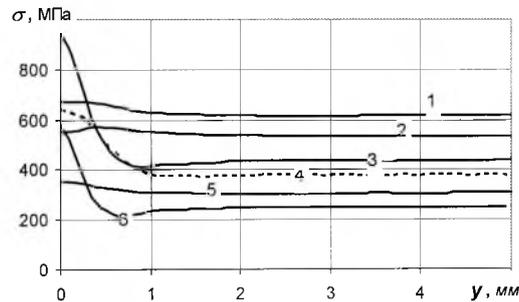
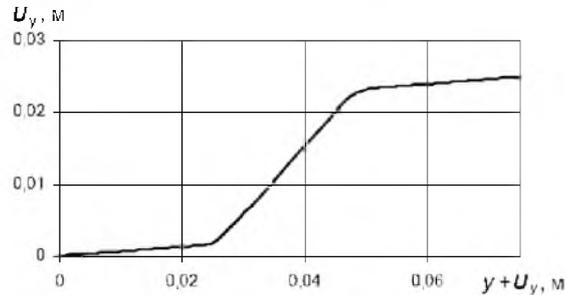
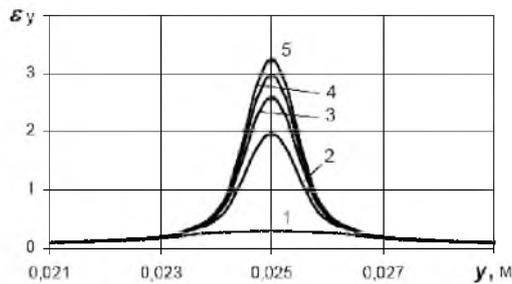


Рис. 11. Распределение напряжений σ_y (1, 3), σ_z (5, 6), а также эквивалентных напряжений σ_{eq} (2, 4) через 100 (1, 2, 5) и 150 мкс (3, 4, 6) после начала нагружения вдоль оси y в поперечном сечении полосы.



а



б

Рис. 12. Распределение перемещения вдоль оси y через 0,5 с после начала нагружения (а) и распределение продольной деформации в моменты времени от начала растяжения при ПНС, вызванном растяжением со скоростью 0,05 м/с (б): 1 – $t = 0,1$ с; 2 – $t = 0,2$ с; 3 – $t = 0,3$ с; 4 – $t = 0,4$ с; 5 – $t = 0,5$ с.

Заклучение. Возникновение локализации деформации обусловлено исходной неоднородностью свойств материала и условиями нагружения.

При изотермическом растяжении тонкой полосы без деформационного упрочнения его скорость не влияет на процесс локализации деформации. С повышением однородности свойств материала растет уровень деформации, при котором начинается развитие локализованного течения.

При изотермическом растяжении тонкой полосы с упрочнением увеличение сопротивления с ростом деформации и ее скорости вызывает повышение уровня деформации, при котором начинается ее локализация.

Разогрев металла при адиабатическом процессе деформирования вследствие теплового эффекта деформации вызывает понижение уровня деформации, при котором начинается ее локализация. В результате термического воздействия импульсного электрического тока возникает аналогичный эффект.

Оценка влияния различных параметров уравнений состояния металлов на процесс локализации пластической деформации является задачей дальнейших исследований.

Исследования выполнены при поддержке European Research Office of the US Army по контракту № N62558-03-M-0809.

Резюме

Наведено результати моделювання процесу локалізації деформації в металевій стрічці з використанням аналітичного і числового методів. Показано, що виникнення локалізації деформації зумовлено початковою неоднорідністю властивостей матеріалу й умовами навантаження. Із підвищенням однорідності властивостей матеріалу збільшується рівень деформації, за якого починається розвиток локализованої течії. Нагрівання металу при адиабатичному процесі деформування унаслідок теплового ефекту пластичної деформації призводить до зменшення рівня деформації, за якого починається її локалізація. Аналогічний вплив має пропускання імпульсного електричного струму з урахуванням його термічної дії.

1. *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 – 281.
2. *Степанов Г. В., Федорчук В. А.* Локализованный сдвиг в металлах при ударном нагружении // *Пробл. прочности.* – 2000. – № 2. – С. 27 – 42.
3. *Klepaczko J. R.* Remarks on impact shearing // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1998. – **46**, No. 10. – P. 2139 – 2153.
4. *Рузанов Ф. И., Роцупкин А. М., Сташенко В. И.* Влияние скорости деформации и импульсного тока на предельное удлинение металла в режиме сверхпластичности // *Пробл. машиностроения и надежности машин.* – 1990. – № 1. – С. 82 – 89.
5. *Соппротивление материалов* / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Вища шк., 1986. – 775 с.

6. *Спицин В. Н., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Машиностроение, 1985. – 250 с.
7. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И.* Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металле // Пробл. прочности. – 1996. – № 2. – С. 125 – 128.
8. *Кукса Л. В.* Механика структурно-неоднородных материалов на микро- и макроуровнях. – Волгоград: Изд. Волгогр. ГАСА, 2002. – 160 с.
9. *Гун Г. Я.* Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
10. *Широков А. В.* Развитие локализованного сдвига в металлах при ударном нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2004. – 19 с.
11. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.

Поступила 07. 06. 2004