

## Самоорганизация полос адиабатического сдвига в меди и стали

Н. А. Кудряшов, П. Н. Рябов, А. С. Захарченко

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
Каширское шоссе, д. 31, Москва, Россия, 115409*

Исследуется процесс самоорганизации полос адиабатического сдвига (ПАС) в бескислородной меди и стали марки НУ-100 с учётом деформационного упрочнения материалов. Предложен численный метод, основанный на разностной схеме Куранта–Изаксона–Риса. Проведено численное исследование процесса и показано, что процесс деформационного упрочнения приводит к увеличению времени локализации ПАС, а также снижает количество образовавшихся полос сдвига. На основе квазипериодического характера формирования ПАС предложен метод оценки среднего расстояния между полосами, а также проведено сравнение полученной оценки с различными теоретическими оценками.

**Ключевые слова:** полоса адиабатического сдвига, самоорганизация, численное моделирование, схема Куранта–Изаксона–Риса.

### 1. Введение

Явление образования полос адиабатического сдвига (ПАС) в материалах при деформациях привлекает к себе большое внимание. Это связано с тем, что области локализации ПАС в различных материалах являются более хрупкими, чем окружающие участки, поэтому продолжительная деформация может привести к разрушению материала вдоль полос. В этой связи возникает необходимость оценки среднего расстояния между сформировавшимися ПАС. В настоящее время для этой цели в основном используются два различных теоретических подхода. Согласно первому подходу среднее расстояние между ПАС ( $L_{ГК}$ ) равно толщине области неустойчивости, которая определяется коэффициентом диффузии момента вне полосы и временем, требуемым для коллапса напряжения внутри полосы [1]. Согласно второму подходу для определения расстояния между полосами используются методы теории возмущений [2]. Предполагается, что длина волны, соответствующая доминирующей моде, отвечает наиболее вероятному минимальному расстоянию между ПАС ( $L_{РО}$ ). Среди работ, посвящённых исследованию процессов самоорганизации ПАС, следует отметить работу Жу и его соавторов [3]. Основываясь на теореме анализа размерностей, авторы получили эмпирическую формулу для оценки расстояния между ПАС ( $L_{ЖРР}$ ).

В данной работе сформулирована математическая модель, описывающая процессы формирования ПАС в материалах при деформациях. Предложен численный метод, позволяющий исследовать процессы самоорганизации полос сдвига в материалах. На примере бескислородной меди и стали исследовано влияние деформационного упрочнения на динамику развития ПАС.

### 2. Модель образования полос адиабатического сдвига

Рассматривается процесс сдвиговой деформации бесконечного слоя несжимаемого упруго-пластичного материала высотой  $0 \leq y \leq H$ . Нижняя граница слоя зафиксирована, а верхняя перемещается с постоянной скоростью  $v_B$ .

Согласно [3–5] рассматриваемый процесс описывается следующей системой уравнений:

$$v_t = \frac{1}{\rho} \tau_y, \quad (1)$$

$$\tau_t - \mu(T)v_y = -\mu(T)\dot{\varepsilon}^p, \quad (2)$$

$$\psi_t = \frac{\tau\dot{\varepsilon}^p}{\kappa_0 [1 + (\psi/\psi_0)^n]}, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{1}{b} \exp \left\{ \frac{1}{m} \left( \frac{\tau}{\kappa_0 [1 + (\psi/\psi_0)^n] g(T)} - 1 \right) \right\}, \quad (4)$$

$$C(T)\rho T_t = (k(T)T_y)_y + \beta\tau\dot{\varepsilon}^p, \quad (5)$$

где  $y$  — пространственная переменная,  $t$  — время,  $\tau$  — напряжение,  $v$  — скорость,  $T$  — температура,  $\dot{\varepsilon}^p$  — скорость пластической деформации,  $\rho$  — плотность,  $\beta$  — параметр Тейлора–Куни,  $\mu(T)$  — модуль упругого сдвига,  $C(T)$  — удельная теплоёмкость,  $k(T)$  — коэффициент теплопроводности,  $b, m, \kappa_0, \psi_0, n$  — параметры, отвечающие за деформационное упрочнение, функция  $g(T)$  описывает чувствительность материала к изменению температуры и имеет вид  $g(T) = (1 - aT)^3$  или  $g(T) = \exp(-aT)$  для меди и стали соответственно. Как правило, для определения пластической деформации используется соотношение

$$\varepsilon^p = \int_0^t \dot{\varepsilon}^p dt', \quad (6)$$

которое эквивалентно уравнению (3) [6]. В данной работе уравнение (6) используется для расчёта пластической деформации как для процессов без учёта упрочнения, так и с их учётом.

Для проведения численного моделирования использовались следующие начальные и граничные условия

$$\begin{aligned} v(y, 0) &= \dot{\varepsilon}_0 y, & T(y, 0) &= 0, & \tau(y, 0) &= \tau_0(1 + \xi), \\ \psi(y, 0) &= 0, & \dot{\varepsilon}^p(y, 0) &= \dot{\varepsilon}_0, & \varepsilon(y, 0) &= 0, \\ v(0, t) &= 0, & v(H, t) &= v_B, & T_y(0, t) &= 0, & T_y(H, t) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\xi$  — равномерно распределённая случайная величина на отрезке  $[0, 1]$ .

Система уравнений (1)–(2) с условиями (7) решалась с использованием разностной схемы Куранта–Изаксона–Риса, для (3) применялся метод Рунге–Кутты, для (5) использовалась неявная двухслойная разностная схема.

### 3. Результаты вычислительного эксперимента

Рассмотрим процессы самоорганизации ПАС в материалах, а также изучим влияние процесса деформационного упрочнения на динамику развития полос на примере бескислородной меди и стали марки НУ-100.

На рис. 1 приведена эволюция средних значений напряжения и температуры в образцах с учётом процессов упрочнения и без.

Основываясь на полученных зависимостях можно определить время начала локализационного процесса как момент времени, когда  $|d\tau_{ср}/d\varepsilon_{nom}| \rightarrow \max$  [4]. Как правило, в этот момент времени  $\tau_{ср} \subseteq [0, 8\tau_{\max}; 0, 9\tau_{\max}]$ . Из рис. 1 можно видеть, что процесс деформационного упрочнения приводит к увеличению прочности материала, а именно к увеличению времени, необходимого для локализации полос сдвига.

Можно определить количество сформировавшихся полос  $N_\varepsilon$ , как количество локальных максимумов деформации  $\varepsilon^p$ , величина которых превосходит некоторое пороговое значение  $\varepsilon_\Pi$ . Из полученных результатов можно сделать вывод, что учёт процессов упрочнения приводит к снижению количества образовавшихся полос на 30–40 % для меди и на 12–25 % для стали.

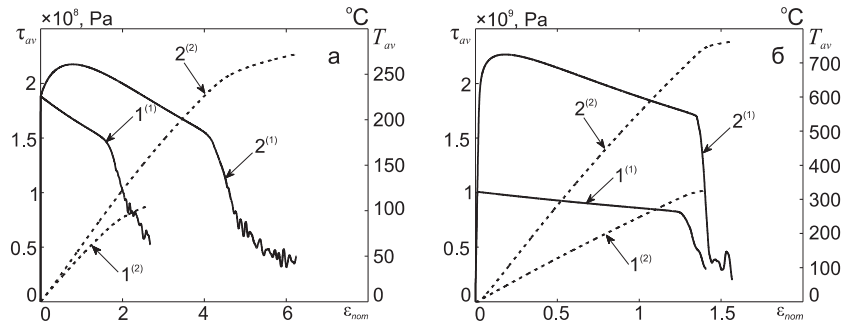


Рис. 1. Эволюция средних значений напряжения (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) для меди (а) и стали НУ-100 (б). 1<sup>(1,2)</sup> — без учёта упрочнения, 2<sup>(1,2)</sup> — с учётом упрочнения ( $\dot{\epsilon}_0 = 10^5 \text{ s}^{-1}$ )

Известно, что полосы адиабатического сдвига могут привести к образованию трещин в местах их локализации, поэтому оценка расстояния между ПАС является важной задачей. В работах [1–3] предложены теоретические оценки для расчёта среднего расстояния между полосами. Основываясь на факте, что процессы формирования ПАС носят квазипериодический характер [3, 4], нами использована формула расчёта расстояния между ПАС на основе численного исследования  $L_{cp} = H/N_{\epsilon}$ .

На рис. 2 приведены результаты сравнения численных оценок расстояния между ПАС с теоретическими оценками в зависимости от  $\dot{\epsilon}_0$  для различных пороговых деформаций  $\epsilon_{п}$ . Оказалось, что результаты численного моделирования лежат между оценкой Райта–Оскендона ( $L_{РО}$ ), Жу–Райта–Рамеша ( $L_{ЖРР}$ ) и оценкой Греди–Кипша ( $L_{ГК}$ ), т.е.  $L_{ГК} \leq L_{cp} \leq L_{РО}, L_{ЖРР}$ . Следует отметить, что для стали НУ-100 численная оценка лежит ближе к оценке  $L_{ГК}$ , в то время как для бескислородной меди результаты лежат ближе к оценкам  $L_{РО}$  и  $L_{ЖРР}$ .

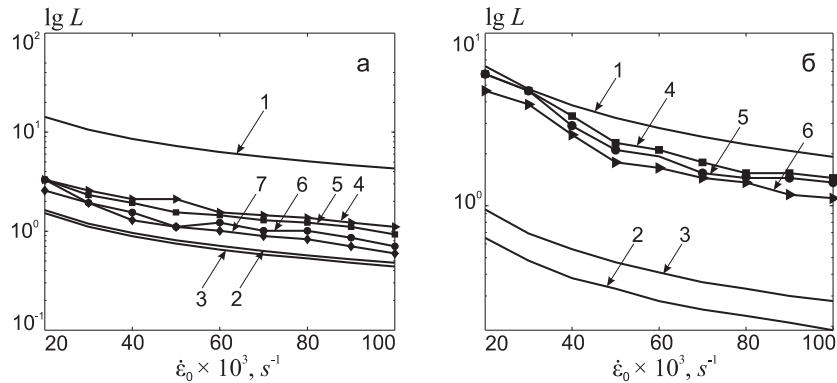


Рис. 2. Зависимость логарифма среднего расстояния между ПАС  $\lg L_{cp}$  от начальной скорости деформации  $\dot{\epsilon}_0$  для меди (а) и стали марки НУ-100 (б).

Кривые 1–3 соответствуют оценкам  $\lg L_{ГК}$ ,  $\lg L_{РО}$  и  $\lg L_{ЖРР}$ . Для (а):  $\epsilon_{п} = 80, 50, 20, 10$  (кривые 4–7). Для (б):  $\epsilon_{п} = 80, 50, 10$  (кривые 4–6)

#### 4. Заключение

Исследованы процессы самоорганизации ПАС в материалах и изучено влияние процесса упрочнения на динамику развития полос сдвига на примере бескислородной меди и стали марки НУ-100.

Сформулирована математическая модель, описывающая процессы формирования ПАС в материалах при деформациях. Проведено численное моделирование,

в ходе которого показано, что процесс деформационного упрочнения приводит к увеличению времени локализации ПАС, сокращая количество сформировавшихся полос и уменьшая величину деформации. Предложен критерий для численной оценки количества сформировавшихся полос сдвига. С учётом периодичности в формировании ПАС предложен метод оценки среднего расстояния между полосами с использованием формулы  $L_{\text{cp}} = H/N_{\varepsilon}$ .

## Литература

1. Grady D. E., Kipp M. E. The Growth of Unstable Thermoplastic Shear with Application to Steady-Wave Shock Compression in Solids // J. Mech. Phys. Solids. — 1987. — Vol. 35, No 1. — Pp. 95–119.
2. Wright T. W., Ockendon H. A Scaling Law for the Effect of Inertia on the Formation of Adiabatic Shear Bands // Int. J. Plasticity. — 1996. — Vol. 12, No 7. — Pp. 927–934.
3. Zhou F., Wright T. W., Ramesh K. T. The Formation of Multiple Adiabatic Shear Bands // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2006. — Vol. 54, No 7. — Pp. 1376–1400.
4. Кошкин В. И., Кудряшов Н. А., Рябов П. Н. Моделирование квазипериодических процессов формирования полос адиабатического сдвига при деформациях // Матем. моделирование. — 2011. — Т. 23, № 10. — С. 117–132. [Koshkin V. I., Kudryashov N. A., Ryabov P. N. Modeling of the Quasiperiodic Processes of Adiabatic Shear Bands Formation // Mathematical Modeling. — 2011. — Vol. 23, No 10. — Pp. 117–132.]
5. Кошкин В. И., Кудряшов Н. А., Рябов П. Н. Численное моделирование образования полос адиабатического сдвига при деформациях // Ядерная физика и инжиниринг. — 2010. — Т. 1, № 5. — С. 465–474. [Koshkin V. I., Kudryashov N. A., Ryabov P. N. Numerical Simulation of Adiabatic Shear Bands Formation Under Deformations // Nuclear Physics and Engineering. — 2010. — Vol. 1, No 5. — Pp. 1465–474.]
6. Walter J. W. Numerical Experiments on Adiabatic Shear Band Formation in One Dimension // Int. J. Plasticity. — 1992. — Vol. 8, No 6. — Pp. 657–693.

UDC 539.42 PACS 81.40.Np, 91.55.Mb, 83.50.-v

## Self-Organization of Adiabatic Shear Bands in Copper and Steel

N. A. Kudryashov, P. N. Ryabov, A. S. Zakharchenko

*National Research Nuclear University MEPhI  
31, Kashirskoe Shosse, Moscow, Russia, 115409*

In this work we consider the self-organization process of adiabatic shear bands (ASB) formation in OFHC copper and HY-100 steel taking into account the strain hardening factor. We proposed the numerical approach which is based on the Courant–Isaacson–Rees scheme. Using this method we made a numerical investigation, in which it was shown that the strain hardening process leads to the increase in the localization time and to a decrease the number of ASB formed. Using the fact, that the processes of ASB formation are quasi-periodic, we obtained a numerical estimate of the distance between ASB and compared our numerical results with theoretical estimates by others.

**Key words and phrases:** adiabatic shear banding, self-organization, numerical simulation, Courant–Isaacson–Rees scheme.