

05

Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации

© М.А. Соковиков, Д.А. Билалов, В.В. Чудинов, С.В. Уваров,
О.А. Плехов, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
E-mail: sokovikov@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2014 г.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование механизмов неустойчивости и локализации пластического сдвига при динамическом деформировании металлов. Механизмы неустойчивости связываются с коллективными эффектами в ансамбле микросдвигов в пространственно-локализованных областях. Инфракрасное сканирование *in situ* зоны неустойчивости и последующее изучение дислокационной субструктуры подтвердили предположение о решающей роли неравновесных переходов в ансамблях дефектов при развитии локализованного пластического течения. На основе уравнений, отражающих связь неравновесных переходов с механизмами структурной релаксации и пластического течения, проведено моделирование неустойчивости пластического сдвига.

Длительное время доминирующим объяснением механизма неустойчивости и локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения было представление о термопластической неустойчивости. Экспериментальные исследования микроструктуры полос адиабатического сдвига, проведенные в ряде работ, в частности [1,2], указывают на то, что одним из механизмов формирования полос пластического сдвига являются множественные многомасштабные неустойчивости в системе микросдвигов (дефектов мезоуровня), имеющих следствием пластические ротации и изменение ориентации зерен в узких полосах сдвига.

Теоретический анализ механизмов неустойчивости пластического сдвига проводился на основе модели, учитывающей связь многомас-

штабной кинетики дефектов (микросдвигов) с механизмами структурной релаксации и пластического течения [3].

Для изучения поведения материалов в условиях, близких к чистому сдвигу при динамическом нагружении на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского, использовались цилиндрические образцы, предложенные в [2] и изготовленные из сплава АМг6. Образцы имеют симметричные прямолинейные проточки глубиной 3.75 mm с двух сторон. В процессе динамического деформирования производилось исследование распределения пластических деформаций с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M в области сдвиговой деформации. Схема образца и результаты испытаний представлены на рис. 1, *a, b*. В результате проведения испытаний образцов на чистый сдвиг получены поля температур *in situ* в процессе деформирования.

Исследования процесса деформирования на стержне Гопкинсона–Кольского с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают $\sim 70^\circ\text{C}$.

На установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из алюминия марки 6061. При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Для исследования распределения пластических деформаций в процессе формирования и выноса пробки использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. Схема эксперимента представлена на рис 2, *a*. На рис 2, *b* представлено изображение в инфракрасных лучах отверстия после пробивания и летящей пробки. Скорость налетания ударника на преграду 120 m/s. Максимальная температура по периметру отверстия 62°C .

Исследования процесса пробивания преград с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают $\sim 100^\circ\text{C}$, что позволяет сделать вывод о возможности формирования и выноса пробки, не связанной с термопластической неустойчивостью.

После эксперимента сохраненные образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического микроскопа-интерферометра NewView-5000 и просвечивающего электронного микроскопа.

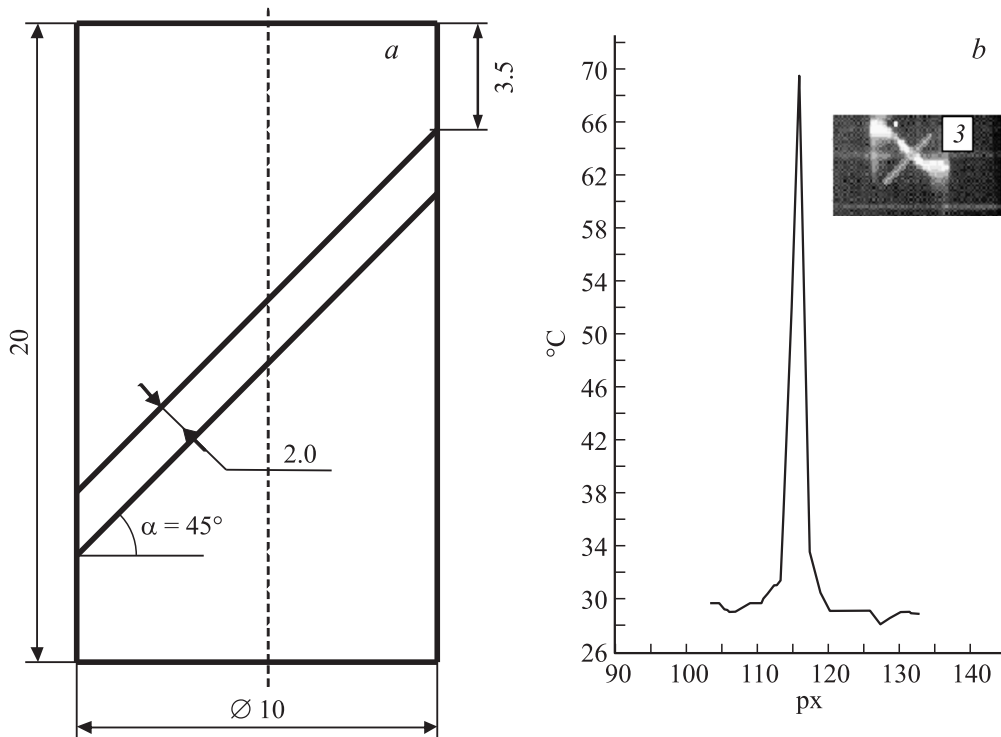


Рис. 1. Схема образца (а). Распределение температуры по координате перпендикулярно области сдвига и инфракрасное изображение в процессе деформирования (b).

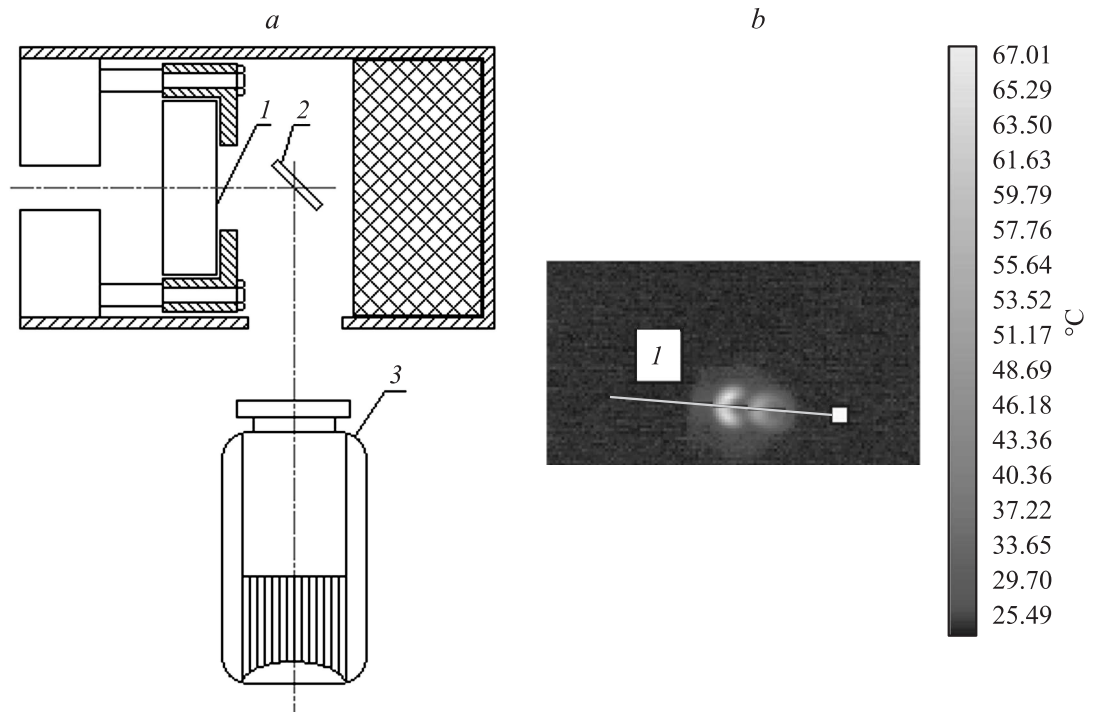


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — образец, 2 — зеркало, 3 — инфракрасная камера (а). Инфракрасный образ отверстия после пробивания и летящей пробки (б).

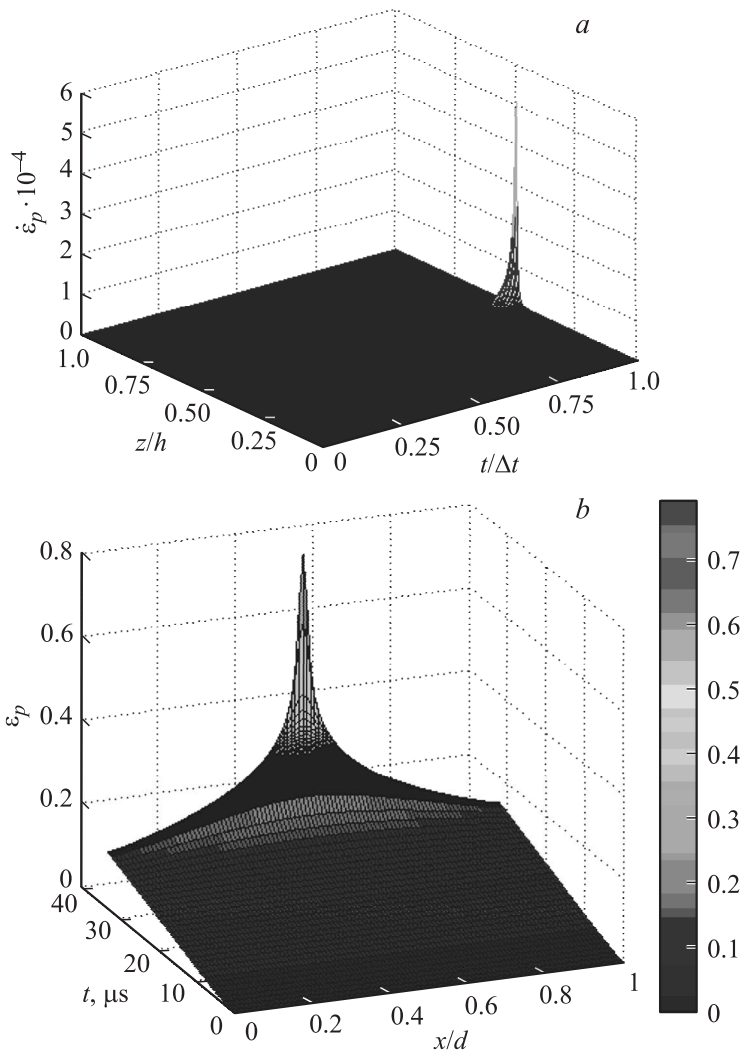


Рис. 3. Распределение скорости пластической деформации (a). Эволюция во времени распределения пластической деформации по длине образца (b).

Обнаружено, что имеет место локализация пластической деформации в узкой области по образующей пробки. Изучение поверхности разрушения с помощью сканирующего электронного микроскопа показало, что в областях локализации деформации субзерна вытягиваются в полосы и фрагментируются, образуя ультрамикроструктурную структуру с размером зерен ~ 300 nm. За счет ротационных мод деформации возникают высокоугловые разориентировки зерен [4].

В данном исследовании проведено численное моделирование механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации (в квазиодномерной постановке) с учетом особенностей кинетики накопления микросдвигов в материале.

Было рассмотрено деформирование плоского слоя в условиях чистого сдвига. Одна сторона слоя жестко закреплена. На другой стороне слоя задается постоянная скорость.

В процессе высокоскоростного деформирования в материале происходит структурно-кинетический переход по параметру плотности микросдвигов в локальной области, характеризующийся быстрым ростом параметра плотности микросдвигов, что приводит к резкому скачкообразному изменению эффективных характеристик среды, в частности к резкому падению эффективной вязкости и, как следствие, к резкому росту скоростей пластических деформаций и релаксации напряжений и падению сопротивления сдвига в этой области (рис 3, *a*).

Проведено численное моделирование кручения тонкостенных цилиндрических образцов, соответствующее экспериментальной схеме исследования чистого сдвига в квазиодномерной постановке [5]. На рис. 3, *b* приведен график распределения пластической деформации, которая локализуется в узкой центральной области образца.

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предположить, что один из механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при высокоскоростном деформировании обусловлен структурно-кинетическими переходами в ансамблях микросдвигов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятий по реализации постановления правительства РФ № 218).

Список литературы

- [1] *Meyer L.W., Staskewitsch E., Burblies A.* // *Mechanics of Materials*. 1994. V. 17. P. 175–193.
- [2] *Rittel D., Landau P., Venkert A.* // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 165501.
- [3] *Наймарк О.Б.* // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 6. С. 45–72.
- [4] *Ляпунова Е.А., Петрова А.Н., Бродова И.Г., Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В.* // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38. В. 1. С. 13–20.
- [5] *Marchand A., Duffy J.* // *J. Mech. Phys. Solids*. 1988. V. 36. N 3. P. 251–283.