

УДК 539.42
PACS 81.40.Lm, 62.20.mm

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении цилиндрических скошенных образцов

М. А. Соковиков

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
sokovikov@icmm.ru

Проведено исследование локализации пластической деформации при динамических испытаниях скошенных образцов из сплава АМг6 на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского. Температурные поля изучались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры. Измеренная температура в зоне локализации не подтверждает традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью для исследуемого материала и реализованных режимов нагружения. Сравнение экспериментально полученных температурных полей с результатами численного моделирования, осуществленного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в исследуемом материале, дает удовлетворительное соответствие с точностью ~20%. Экспериментальные исследования, их численное моделирование, учитывающее эволюцию дефектной структуры материала, подтверждают представления о механизме локализации деформации, связанном с процессами в системе микродефектов в исследуемом материале при осуществленных режимах нагружения.

Ключевые слова: локализация пластической деформации; динамическое нагружение; стержень Гопкинсона–Кольского; инфракрасная термография

Поступила в редакцию 13.05.2022; после рецензии 03.06.2022; принята к опубликованию 08.06.2022

The study of plastic strain localization in cylindrical skewed specimens under dynamic loads

M. A. Sokovikov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia
sokovikov@psu.ru

The study of plastic strain localization in skewed specimens made of AMg6 alloy was carried out under conditions of dynamic tests on a split Hopkinson pressure bar. Temperature fields were studied “in-situ” using a high-speed infrared camera. The temperatures measured in the localization zone do not confirm the traditional views of the strain localization mechanism as being conditioned by thermoplastic instability of the examined materials under realized loading modes. Comparison between the experimentally obtained temperature fields and the results of numerical simulation made with account for the kinetics of microdefect accumulation in the material, demonstrates that they agree to an accuracy of ~20%. Experimental studies and their numerical simulation that takes into account the evolution of the defect structure of the material, confirm the idea that the mecha-

nism of plastic strain localization is associated with the processes arising in the system of microdefects in the examined material under loading modes implemented during dynamic tests.

Keywords: plastic strain localization; dynamic loading; split Hopkinson pressure bar; infrared thermography

Received 13 May 2022; revised 03 June 2022; accepted 08 June 2022

doi: 10.17072/1994-3598-2022-2-15-19

1. Введение

Явление образования малых областей пластического течения, в которых уровень пластической деформации на порядки выше по сравнению с окружающим материалом представляет серьезный теоретический и практический интерес.

Локализация пластической деформации в металлах может быть следствием влияния различных факторов: температуры, скорости и величины деформации, эволюции структуры материала.

Целью данной работы является экспериментальное обоснование положения о существовании механизмов локализации пластической деформации при различных скоростях нагружения, не связанных с термическим разупрочнением.

Наряду с термопластической неустойчивостью, которая проявляется при высоких скоростях деформирования, существенную роль играют структурные переходы в ансамбле дефектов мезоуровня (микросдвигов и микротрещин).

На связь локализации пластического сдвига (динамическая рекристаллизация) и процессов в структуре материала указано в работах [1–3]. Данное явление изучалось при испытаниях различных видов образцов при различных видах нагружения.

Для изучения локализации пластической деформации применяются наклонные (скошенные) цилиндрические образцы [4–6]. Применение таких образцов позволяет оценить склонность к локализации пластической деформации материалов при сдвиге, реализовать достаточно высокие скорости деформирования. При испытаниях таких образцов отсутствует влияние качества поверхности на локализацию пластической деформации.

Изучение процесса локализации пластической деформации при динамическом нагружении проводилось с использованием стержня Гопкинсона–Кольского [1–3, 7–11].

2. Экспериментальные исследования

В качестве исследуемого материала были выбран сплав АМг6, проявляющий «склонность» к неустойчивости пластического течения. Образец, схема экспериментов и результаты приведены на рис. 1–5.

Проводилось исследование механизма локализации пластического сдвига при динамическом нагружении на установке Гопкинсона–Кольского скошенных цилиндрических образцов (углы скоса 2°, 5°, 7°) из сплава АМг6 (рис. 1).

При динамическом сжатии в скошенных образцах реализуется сложное напряженное состояние, сочетающее сжатие и сдвиг. Построены условные кривые «напряжение–деформация» при динамическом сжатии.

Температурные поля, обусловленные диссипацией энергии в процессе деформирования образцов на стержне Гопкинсона–Кольского с целью изучения развития разрушения локализованным сдвигом, исследовались *in situ* регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M, (рис. 2, 3).

Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300° К, спектральный диапазон – 3–5 мкм, максимальный размер кадра – 320×240 точек. Разрешение записи по координате («размер пиксела») составляет ~0.2 мм, разрешение по времени – ~0.25 мс.

На рис. 4, 5 приведены результаты испытаний образца № 47, его параметры: материал АМг6 в состоянии поставки (неотожженный), начальный диаметр 6.04 мм, начальная высота 8.53 мм, конечная высота 4.94 мм, угол скоса 5°, средняя скорость деформации на условной кривой деформирования ~2500 с⁻¹.

Измеренная температура в зоне локализации не подтверждает традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью для исследуемых материалов и реализованных режимов нагружения.

Д.Р. Ледоном проведено численное моделирование осуществленного эксперимента с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов [11]. Результаты численного моделирования показаны на рис. 6.

Сравнение экспериментально полученных полей температур с результатами численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, дает удовлетворительное соответствие с точностью ~20%.

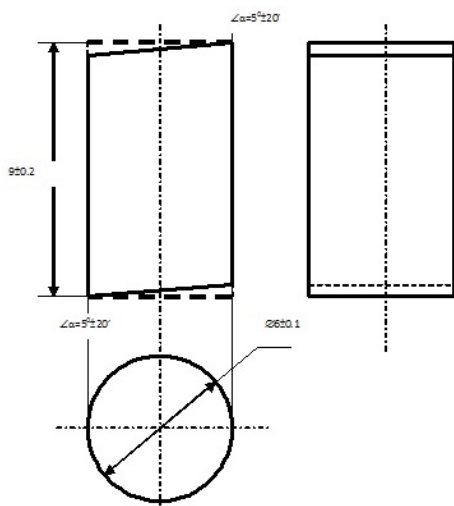


Рис. 1. Скошенный образец из сплава АМг6 для изучения локализации пластической деформации

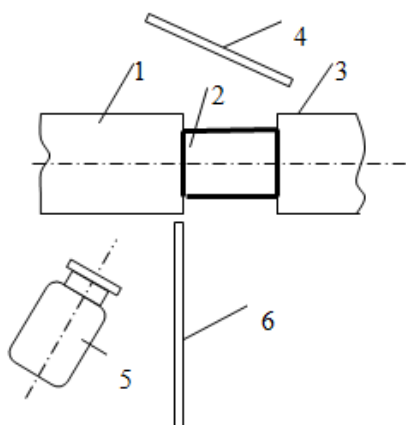


Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 – опорный стержень; 2 – образец; 3 – нагружающий стержень; 4 – зеркало; 5 – инфракрасная камера; 6 – защитный экран

Часть скошенных образцов изготовлена из сплава АМг6 в состоянии поставки, часть – из того же сплава с последующим отжигом при температуре 400 °С, длительностью 3 ч, остывание с печью.

Сравнительный анализ результатов исследования локализации пластического сдвига в сплаве АМг6 при динамическом нагружении скошенных образцов на установке Гопкинсона–Кольского показал, что способность материала к локализации сдвига существенно возрастает при возрастании скоростей деформирования и проявляется при скоростях деформации $> 1800 \text{ с}^{-1}$ для неотожженных образцов и $> 1200 \text{ с}^{-1}$ – для отожженных.

Причем в отожженных образцах локализация пластического сдвига проявляется более заметно, чем на образцах из сплава АМг6 в состоянии поставки.



Рис. 2. Разрезной стержень Гопкинсона–Кольского с установленной инфракрасной камерой

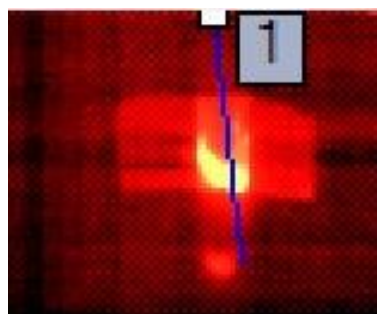


Рис. 4. Изображения скошенного образца № 47 из сплава АМг6 при испытаниях в инфракрасных лучах в процессе эксперимента

В процессе динамического деформирования в отожженных образцах появляются трещины под углом 45°, при тех же условиях деформирования в образцах из сплава в состоянии поставки имеют место не сильно выраженные сдвиги также под углом 45°. С ростом скоростей деформирования процессы локализации идут более интенсивно.

3. Заключение

Результаты исследования процесса локализации на скошенных образцах, данные численного моделирования позволяют предположить, что для алюминиевого сплава АМг6 при реализованных условиях нагружения механизм локализации пластической деформации обусловлен структурными процессами в системе микродефектов, а не термической неустойчивостью.

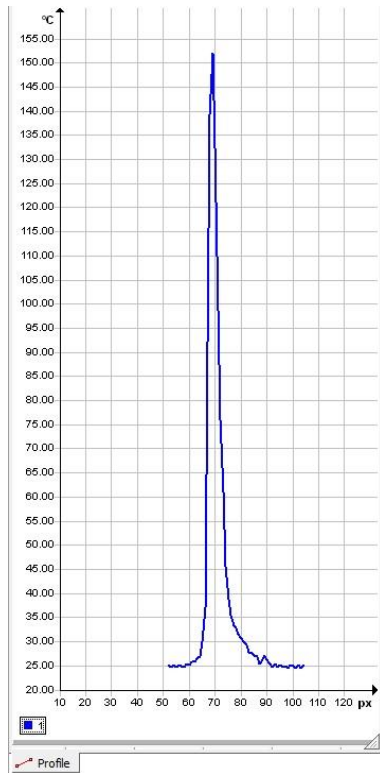


Рис. 5. Зависимость температуры вдоль показанной координаты в выбранный момент времени. Максимальная температура около 150°C

Величины температурных полей, полученные при высокоскоростном деформировании образцов из сплава АМгб с использованием инфракрасной термографии, результаты численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинети-

ки накопления микродефектов в материале [9–11], позволяют предполагать, что при реализованных условиях нагружения для сплава АМгб один из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материала.

Исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № АААА-А19-119013090021-5).

Список литературы

1. Rittel D., Ravichandran G., Venkert A. The mechanical response of pure iron at high strain rates under dominant shear // *Materials Science and Engineering*. 2006. N. A432. P. 191–201.
2. Rittel D., Wang Z.G., Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work // *Phys. Rev. Lett.* 2006. N. 96, 075502.
3. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // *Phys. Rev. Lett.* 2008. N. 101, 165501.
4. Meyer L. W., Staskewitsch E., Burblies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading // *Mechanics of Materials*. 1994. N. 17. P. 203–214.
5. Wei Z., Yu J., Hu S., Li Y. Influence of microstructure on adiabatic shear localization of pre-twisted tungsten heavy alloy // *International Journal of Impact Engineering*. 2000. N. 24. P. 747–758.
6. Pursche F., Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels // *En-*

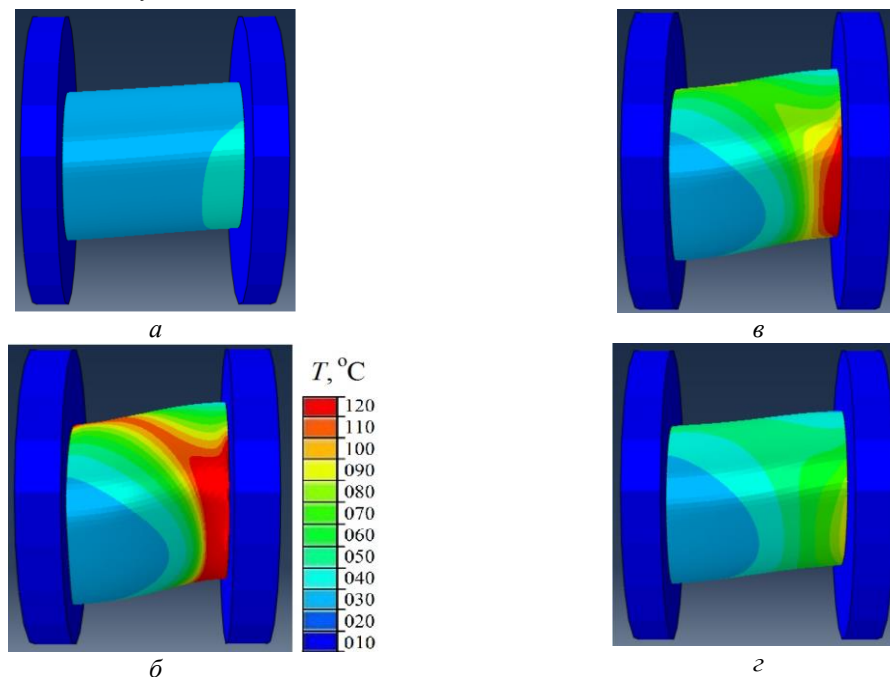


Рис. 6. Распределение температуры в моменты времени: а – $1 \cdot 10^{-4}$ с; б – $2 \cdot 10^{-4}$ с; в – $3 \cdot 10^{-4}$ с; г – $4 \cdot 10^{-4}$ с при динамическом нагружении на установке Гопкинсона–Кольского скошенного образца № 47 из сплава АМгб, результаты численного моделирования [11]

- gineering Transactions. 2011. N. 59 (2). P. 67–84.
7. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. N 7. P. 59–71.
 8. Marchand A., Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel // *J. Mech. Phys. Solids*. 1988. Vol. 36. N. 3. P. 251–283.
 9. Sokovikov M. A., Bilalov D. A., Chudinov V. V., Uvarov S. V., Plekhov O. A., Terekhina A. I., Naimark O. B. Nonequilibrium transitions in ensembles of defects attributed to dynamic localization of plastic deformation // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40. N. 12. P. 1075–1077.
 10. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 10. N. 38. P. 296–304.
 11. Билалов Д. А., Сокоиков М. А., Чудинов В. В., Оборин В. А., Байандин Ю. В., Терехина А. И., Наймарк О. Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2017. Т. 10. № 1. С. 103–112.
 4. Meyer L. W., Staskewitsch E., Burblied A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading. *Mechanics of Materials*, 1994, vol. 17, pp. 203–214.
 5. Wei Z., Yu J., Hu S., Li Y. Influence of microstructure on adiabatic shear localization of pre-twisted tungsten heavy alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, vol. 24, pp. 747–758.
 6. Pursche F., Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels. *Engineering Transactions*, 2011, vol. 59 (2), pp. 67–84.
 7. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, no 7, pp. 59–71.
 8. Marchand A., Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel. *J. Mech. Phys. Solids*, 1988, vol. 36, no. 3, pp. 251–283.
 9. Sokovikov M. A., Bilalov D. A., Chudinov V. V., Uvarov S. V., Plekhov O. A., Terekhina A. I., Naimark O. B. Nonequilibrium transitions in ensembles of defects attributed to dynamic localization of plastic deformation. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 12, pp. 1075–1077.
 10. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016, vol. 10, no 38, pp. 296–304.
 11. Bilalov D. A., Sokovikov M. A., Chudinov V. V., Oborin V. A., Bayandin Yu. V., Terekhina A. I., Naimark O. B. Numerical simulation and experimental study of plastic strain localization under the dynamic loading of specimens in conditions close to a pure shear. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, vol. 59, no. 7, pp. 29–38.

References

1. Rittel D., Ravichandran G., Venkert A. The mechanical response of pure iron at high strain rates under dominant shear. *Materials Science and Engineering*, 2006, vol. A432, pp. 191–201.
2. Rittel D., Wang Z. G., Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, 075502.
3. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, 165501.

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сокоиков М. А. Исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении цилиндрических скошенных образцов // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2021. № 2. С. 15–19. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-15-19

Please cite this article in English as:

Sokovikov M. A. The study of plastic strain localization in cylindrical skewed specimens under dynamic loads. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 15–19. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-15-19

Сведения об авторах

Михаил Альбертович Сокоиков, канд. физ.-мат. наук, доцент, с.н.с, лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, д. 1, Пермь, 614013

Author information

Mikhail A. Sokovikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia