

УДК: 539.42

PACS: 81.40.Lm, 62.20.mm

Исследование локализации пластической деформации при статическом и динамическом нагружении с применением системы неинвазивного измерения деформаций

М. А. Соковиков

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Ак. Королева, 1
sokovikov@icmm.ru

Проведены статические и динамические испытания образцов, специально разработанных для изучения локализации пластической деформации из сплавов АМг6 и Д16 на электромеханической испытательной машине Testometric и разрезном стержне Гопкинсона-Кольского с применением системы неинвазивного измерения формы и деформаций StrainMaster. Построены поля перемещений и деформаций в образцах специальной формы из сплавов АМг6 и Д16, испытанных при статическом деформировании и динамическом нагружении. Сравнение экспериментально полученных полей деформаций с результатами численного моделирования, осуществленного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в исследуемых материалах, дает удовлетворительное соответствие с точностью ~20%. Экспериментальные исследования, их численное моделирование, учитывающее эволюцию дефектной структуры материалов, подтверждают представления о механизме локализации деформации, связанном с процессами в системе микродефектов.

Ключевые слова: локализация пластической деформации; статическое и динамическое нагружение; стержень Гопкинсона-Кольского; система измерения перемещений и деформаций StrainMaster

Поступила в редакцию 17.05.2021; после рецензии 31.05.2021; принята к опубликованию 04.06.2021

A study of plastic strain localization under static and dynamic loading using the StrainMaster non-invasive strain measurement system

M. A. Sokovikov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Koroleva St, 1, 614013, Perm
sokovikov@icmm.ru

Static and dynamic testing of specimens specially designed for studying the localization of plastic deformation in AMg6 and D16 alloys were performed on then electromechanical Testometric machine and split Hopkinson pressure bar using the StrainMaster system for noninvasive measurement of shape and deformation. Displacement and strain fields are plotted for special-shaped specimens of AMg6 and D16 alloys subjected to static deformation and dynamic loading. Comparison between the experimentally obtained strain fields and the results of numerical simulation made with account

of the kinetics of microdefect accumulation in the examined material demonstrates good agreement to the accuracy of ~20%. The performed tests and their numerical simulation with consideration for the evolution of the defect material structure confirm the concept of the strain localization mechanism associated with the processes in the system of microdefects.

Keywords: plastic strain localization; static and dynamic loading; split Hopkinson; the StrainMaster non-invasive strain measurement system.

Received 17.05.2021; revised 31.05.2021; accepted 04.06.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-59-63

1. Введение

Явление образования малых областей пластического течения, в которых уровень пластической деформации на порядки выше по сравнению с окружающим материалом, представляет теоретический и практический интерес. Данное явление изучалось при испытании образцов как при статическом нагружении, так и при испытаниях на стержне Гопкинсона–Кольского.

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 (микродвигов и микротрещин).

На связь локализации пластического сдвига (динамическая рекристаллизация) и процессов в структуре материала указано в работах [1–3].

Методы изучения полей перемещений и деформаций с применением метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) получили широкое распространение [4–7]. Для изучения локализации пластической деформации использована система неинвазивного измерения формы и деформаций StrainMaster, которая позволила определить поля перемещений и деформаций как при статическом, так и при динамическом нагружении. Изучение процесса локализации пластической деформации при динамическом нагружении проводилось с использованием стержня Гопкинсона–Кольского. Исследование локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения с использованием стержня Гопкинсона–Кольского проводилось рядом авторов [1–3, 8, 9].

2. Экспериментальные исследования

Для изучения процессов локализации пластической деформации в режиме близком к чистому сдвигу при различных скоростях нагружения были разработаны и запатентованы образцы специальной формы (П-образные) и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния [10–12].

В качестве исследуемого материала были выбраны сплавы АМг6, Д16, проявляющие «склонность» к неустойчивости пластического течения.

Проведены статические и динамические испытания образцов, специально разработанных для изучения локализации пластической деформации из сплавов АМг6 и Д16 на электромеханической испытательной машине Testometric и разрезном стержне Гопкинсона–Кольского с применением системы неинвазивного измерения перемещений и деформаций StrainMaster (LaVision, Германия, разрешение 1600×1200 пикселей).

Экспериментальная установка, образец, схема эксперимента и результаты испытаний представлены на рис. 1–3. Статическое нагружение образцов осуществлялось по схеме подобной динамическому воздействию.

Экспериментально определены поля деформаций в зоне локализации пластического сдвига на образцах, специально разработанных для изучения локализации пластической деформации. Погрешности измерения полей перемещений и сдвиговых деформаций – ~5%.

Поля перемещений определяли перед деформированием на стержне Гопкинсона–Кольского и после деформирования, на основании этих данных определялись поля деформаций. Результаты испытаний приведены на рис. 4, а, 5, а, 6, а, 7, а.

Д.Р. Ледоном проведено численное моделирование проведенных экспериментов с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов [13] и методами численного анализа определено значение средней скорости деформации при динамическом нагружении, которая принимает значение $\dot{\epsilon} = 5000 \text{ с}^{-1}$. Результаты численного моделирования показаны на рис. 4, б, 5, б, 6, б, 7, б.

Полученные в расчете поля деформаций соответствуют экспериментальным данным с точностью ~ 20%.

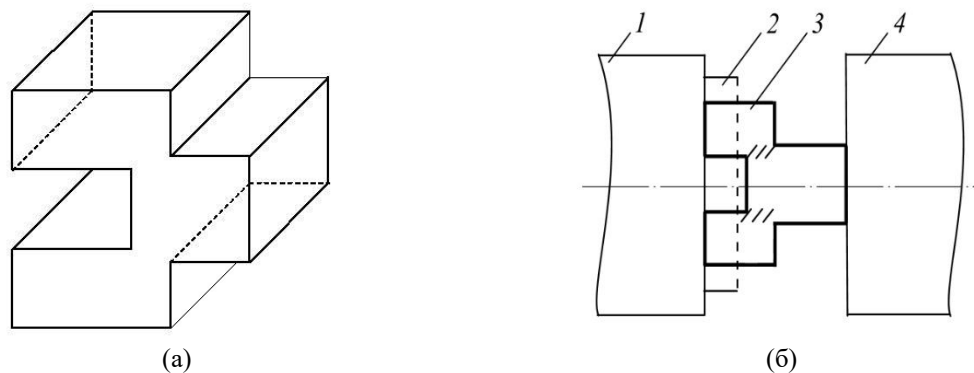


Рис 1. Образец для испытаний на сдвиг (а), схема установки образца между стержнями Гопкинсона–Кольского (б): 1 – входной стержень, 2 – рамка, 3 – образец, заштрихованные области находятся в состоянии близком к чистому сдвигу, 4 – выходной стержень



Рис. 2. Внешний вид установки с разрезным стержнем Гопкинсона–Кольского

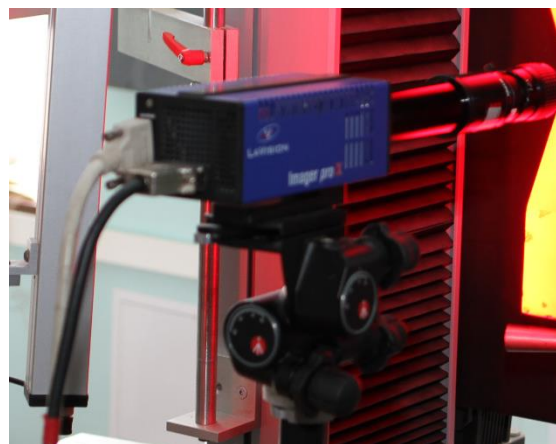
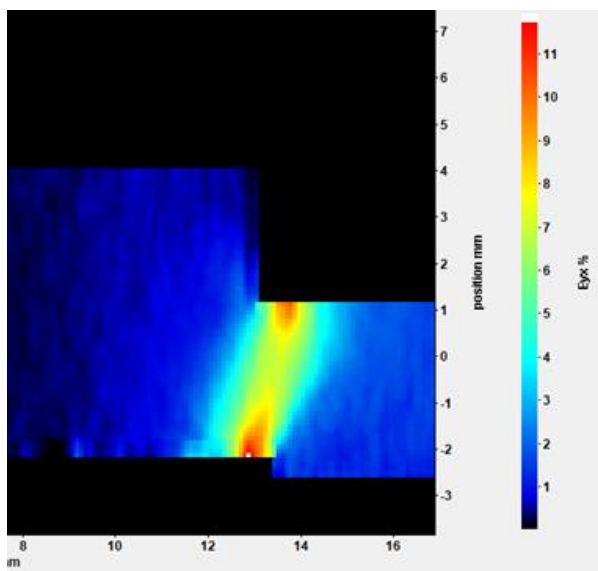
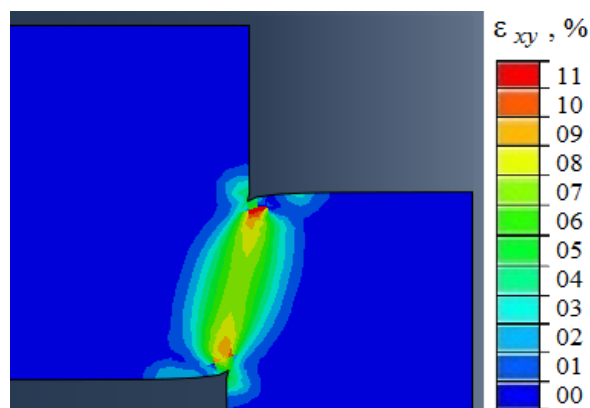


Рис. 3. Внешний вид системы неинвазивного измерения перемещений и деформаций StrainMaster



(а)



(б)

Рис. 4. Распределение абсолютной величины сдвиговой деформации в момент окончания нагружения при статическом воздействии П-образца из сплава АМгб: а – эксперимент; б – численное моделирование

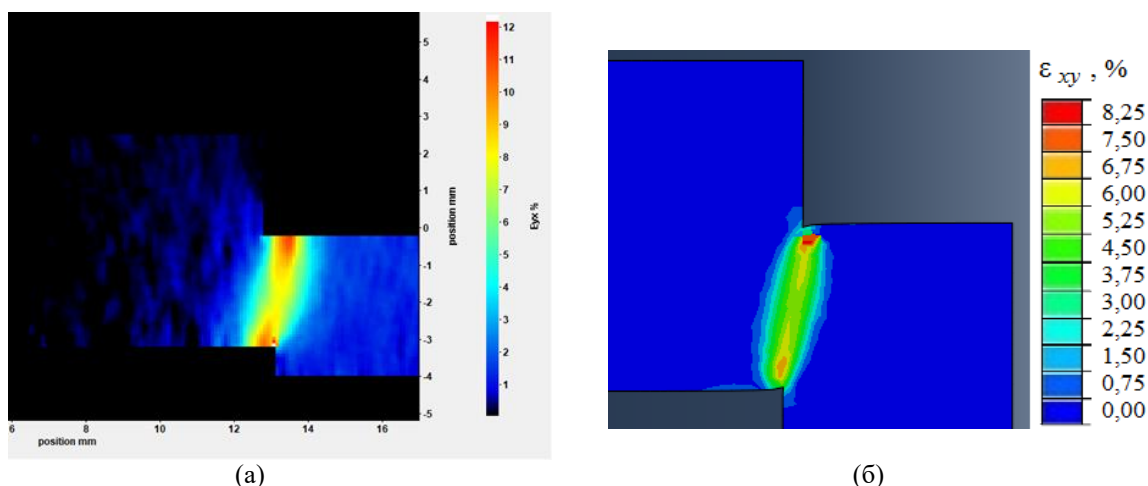


Рис. 5. Распределение абсолютной величины сдвиговой деформации в момент окончания нагружения при статическом воздействии П-образца из сплава Д16: а – эксперимент; б – численное моделирование

3. Обсуждение результатов

Результаты исследования процессов нагружения с применением системы неинвазивного измерения формы и деформаций StrainMaster и данные численного моделирования позволяют предположить, что для алюминиевых сплавов АМг6 и Д16 при реализованных условиях нагружения механизм локализации пластической деформации связан со структурными процессами в системе микродефектов.

4. Выводы

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов, а также данные численного моделирования [9–13], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что механизм локализации пластической деформации для сплавов АМг6 и Д16 при реализованных условиях воздействия (статическое и динамическое нагружение) обусловлен структурными процессами в системе микродефектов.

Полученные результаты позволяют распространить справедливость ранее сделанных выводов на более широкий диапазон скоростей деформирования.

Теоретические исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № АААА-А19-119013090021-5). Экспериментальные исследования и численное моделирование осуществлялись при частичной финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590009 p_a

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. Chu T.C., Ranson W. F., Sutton M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Exp. Mech.* 1985. V. 25. N. 3. P. 232–244.
5. Pan B., Asundi A., Xie H., Gao J. Digital image correlation using iterative least squares and point wise least squares for displacement field and strain field measurements // *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. V. 47. P. 865–874.
6. Третьякова Т. В., Вильдеман В. Э. Закономерности и схематизация процессов локализации пластического течения при испытании плоских образцов алюминий-магниевого сплава // *Физическая мезомеханика*. 2017. Т. 20. № 2. С. 71–78.
7. Вильдеман В. Э., Ломакин Е. В., Третьякова Т. В., Третьяков М. П. Закритическое деформирование и разрушение тел с концентраторами в условиях плоского напряженного состояния // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2017. № 5. С. 22–29.
8. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. N 7. P. 59–71.
9. 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.
10. Sokovikov M. A., Bilalov D. A., Chudinov V. V., Uvarov S. V., Plekhov O. A., Terekhina A. I., Naimark O. B. Nonequilibrium transitions in en-

- sembles of defects attributed to dynamic localization of plastic deformation // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40. N. 12. P. 1075–1077.
11. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands // *Frattura ed Integrita Strutturale*. 2016. Vol. 10. N. 38. P. 296–304.
 12. Наймарк О. Б., Баяндин Ю. В., Соковиков М. А., Плехов О. А., Уваров С. В., Банников М. В., Чудинов В. В. Образец для испытания на сдвиг (варианты) и способ испытаний его. Патент РФ № 2482463.
 13. Билалов Д. А., Соковиков М. А., Чудинов В. В., Оборин В. А., Баяндин 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.
- measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, vol. 47, pp. 865–874.
6. Tretyakova T. V., Wildemann V. E. Plastic strain localization and its stages in Al-Mg alloys. *Physical Mesomechanics*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 314–319.
 7. Vildeman V. E., Lomakin E. V., Tretyakova T. V., Tretyakov M. P. Supercritical deformation and fracture of bodies with concentrators under plane stress state conditions. *Mechanics of Solids*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 488–494.
 8. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, no 7, pp. 59–71.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2016, vol. 10, no 38, pp. 296–304.
 12. Naimark O. B., Bayandin Yu. V., Sokovikov M. A., Plekhov O. A., Uvarov S. V., Bannikov M. V., Chudinov V. V. Specimen for shear test (variants) and test method for it. Patent no. 2482463, Russia.
 13. 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. no. 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. no. 96, 075502.
3. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure. *Phys. Rev. Lett*, 2008. no. 101, 165501.
4. Chu T. C., Ranson W. F., Sutton M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech*. 1985, vol. 25, no. 3, pp. 232–244.
5. Pan B., Asundi A., Xie H., Gao J. Digital image correlation using iterative least squares and point wise least squares for displacement field and strain field

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Соковиков М. А. Исследование локализации пластической деформации при статическом и динамическом нагружении с применением системы неинвазивного измерения деформаций StrainMaster // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2021. № 2. С. 59–63. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-59-63

Please cite this article in English as:

Sokovikov M. A. A study of plastic strain localization under static and dynamic loading using the StrainMaster non-invasive strain measurement system. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 59–63. doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-59-63

Сведения об авторах

Михаил Альбертович Соковиков, 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 foundation of strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Acad. Koroleva str. 1, 614013, Perm, Russia