

УДК 539.42

PACS 81.40.Lm, 62.20.mm

Исследование локализованного пластического сдвига при динамическом нагружении с применением стержня Гопкинсона–Кольского

М. А. Соковиков

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

Проведено экспериментальное исследование механизмов локализации пластического сдвига при динамическом нагружении. Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона–Кольского. Для исследования локализованного сдвига при высокоскоростном нагружении использовались два вида образцов специальной формы, разработанные для проведения экспериментальных исследований локализации пластической деформации при динамическом нагружении. Для изучения данного явления выбран алюминиевый сплав АМг6. В режиме реального времени поверхность образцов исследовалась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Полученное распределение температурного поля в различные моменты времени позволило судить о развитии процесса локализации пластической деформации. Инфракрасные исследования, структурный анализ, численное моделирование проведенных экспериментов, учитывающие эволюцию дефектной структуры материала, подтверждают представления о механизме локализации деформации, не связанном с термическим разупрочнением.

Ключевые слова: локализация пластической деформации; инфракрасная термография; динамическое нагружение

Поступила в редакцию 20.05.2019; принята к опубликованию 31.05.2019

Investigation of localized plastic shear under dynamic loading in a split Hopkinson pressure bar

M. A. Sokovikov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
Ak. Korolev Street 1, 614013 Perm
email: sokovikov@icmm.ru

The mechanisms of plastic shear localization under dynamic loading were investigated experimentally. The dynamic load tests of the specimens were performed in the split Hopkinson pressure bar. To study the localized shear under high-rate loading, we used two types of specimens of special shape, which were designed to conduct experimental studies of plastic strain localization under dynamic loading. The study was conducted on the specimens made of aluminum alloy AMg6. The surface of the specimens was investigated in real time mode using a CEDIP Silver 450M high-speed infrared camera. The obtained distribution of the temperature field at different times allowed us to judge the development of the process of plastic strain localization. The infrared studies, structural analysis, and numerical modeling of the experiments, taking into account the evolution of the

defective subsystem of the material, lend support to the view that the mechanism of strain localization is not associated with thermal softening.

Keywords: plastic strain localization; infrared thermography; dynamic loading

Received 20.05.2019; accepted 31.05.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-41-45

1. Введение

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

Локализация пластической деформации в металлах при динамическом деформировании может быть следствием влияния различных факторов: температуры, скорости и величины деформации, эволюции структуры материала. В настоящее время существует две наиболее распространённые точки зрения о механизмах локализации деформации: термопластическая неустойчивость и механизмы, связанные с эволюцией структуры.

Целью данной работы является экспериментальное обоснование положения о существовании механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении, 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].

Среди известных к настоящему времени методов динамических испытаний выделяется метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Данный метод получил широкое распространение ввиду своей хорошей теоретической обоснованности, простоты, доступности. Используемый метод позволяет проводить испытания широкого круга материалов, в том числе и высокопластичных алюминиевых сплавов в диапазоне скоростей деформации $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$ [4].

Изучение процесса локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения с использованием стержня Гопкинсона–Кольского проводилось рядом авторов [1–3, 5–7].

2. Экспериментальные исследования

Для изучения процессов локализации пластической деформации в режиме близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона–Кольского были разработаны и запав-

тентованы образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния [8].

В качестве исследуемого материала был выбран сплав АМгб, проявляющий «склонность» к неустойчивости пластического течения. Температурные поля в процессах высокоскоростного деформирования для установления характерных стадий локализации деформации исследовались «in situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M [7]. Основные технические параметры 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») ~0.2 мм, разрешение по времени ~0.25 мс.

В работе [9] было показано, что при исследуемых скоростях деформации ($\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$) и выше характерные времена теплопроводности для сплава АМгб существенно меньше характерных времен процесса деформирования.

Полученные распределения температурных полей на боковой поверхности образца в режиме реального времени позволяют судить о развитии процесса локализации пластической деформации.

Экспериментальная установка, образец, схема эксперимента и результаты испытаний представлены на рис. 1–3.



Рис. 1. Внешний вид установки

Согласно результатам расчётов значение интенсивности тензора деформаций равно $\varepsilon = 0.25$. Соответственно, средняя скорость деформации принимает значение $\dot{\varepsilon} = 5000 \text{ с}^{-1}$.

Данные по деформации и скорости деформации определены из результатов численного моделирования, расчеты проводились Д. А. Билаловым.

Получены поля температур *in situ* в процессе деформирования. Температурные поля в образцах в момент достижения максимума температуры показаны на рис. 3.

Температура в области локализации пластической деформации не превышает $\sim 45^{\circ}\text{C}$. Это позволяет сделать вывод о том, что температурное разупрочнение не играет решающую роль в инициировании процесса локализации пластической деформации при данных условиях нагружения.

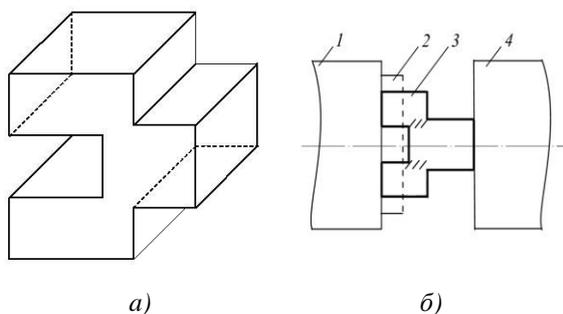


Рис. 2. Элементы установки: а – образец для испытаний на сдвиг; б – схема размещения образца между стержнями Гопкинсона-Кольского. 1 – входной стержень, 2 – рамка, 3 – образец, заштрихованные области находятся в состоянии, близком к чистому сдвигу, 4 – выходной стержень

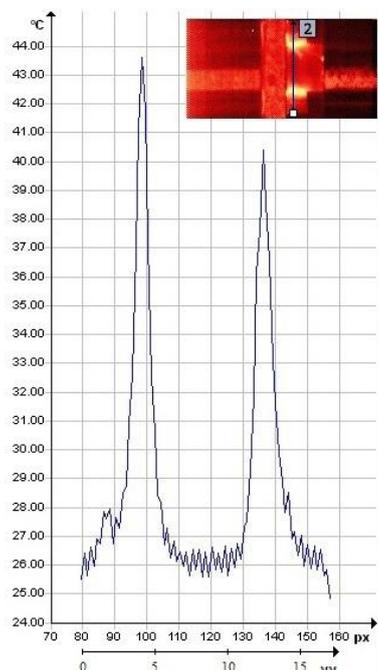


Рис.3. Зависимость температуры вдоль линии z в пикселях инфракрасной камеры в выбранный момент времени; изображение образца в инфракрасных лучах в процессе испытания

Для исследования поведения материалов в режиме близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона – Кольского были разработаны образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию

напряженно-деформированного состояния, близкого к чистому сдвигу при динамическом кручении [10]. Полученные распределения температурных полей позволили судить о развитии процесса локализации пластической деформации.

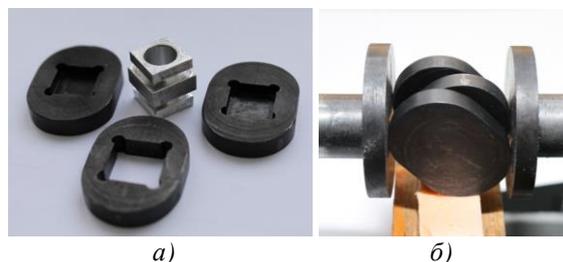


Рис. 4. Образец и оснастка для испытаний на динамическое кручение: а – в разобранном виде; б – установленные между стержнями Гопкинсона – Кольского



Рис.5. Изображение образца в инфракрасных лучах в процессе испытания образца из сплава АМгб при динамическом кручении и зависимости температуры вдоль показанной координаты в пикселях инфракрасной камеры в выбранный момент времени. Максимальная температура $\sim 45^{\circ}\text{C}$

В качестве исследуемого материала также был выбран сплав АМгб. Термодинамика процесса деформирования исследовалась *in situ* регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Образец, оснастка, схема эксперимента и результаты испытаний представлены на рис. 4, 5.

В процессе деформирования на стержне Гопкинсона–Кольского с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени установлено, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают $\sim 45^\circ\text{C}$ для сплава АМг6 (рис. 5).

3. Обсуждение результатов

Исследования процесса высокоскоростного нагружения с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что для алюминиевого сплава АМг6 при исследованных условиях нагружения отсутствуют условия для реализации механизма термопластической неустойчивости.

Выводы

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов [7,9], а также данные численного моделирования [7,9], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что механизм локализации пластической деформации для сплава АМг6 при реализованных условиях нагружения не связан с термопластической неустойчивостью.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 17-08-00905_a, 17-41-590149_p_a, 18-08-01186_a, 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. A 432. P. 191–201.
2. Rittel D, Wang Z.G., and Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work // *Phys. Rev. Lett.* 2006. N. 96. 075502.
3. Rittel D, Landau P., and Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // *Phys. Rev. Lett.* 2008. N. 101. 165501.
4. Weinong W. Chen, Bo Song *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. New York: Springer, 2011. 388p.
5. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. N 7. P 59–71.
6. 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.
7. 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.

8. 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: пат. 2482463 Российская Федерация, № 2011114711/28; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.
9. 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.
10. Наймарк О. Б., Соковиков М. А., Плехов О. А., Уваров С. В., Чудинов В. В., Билалов Д. А., Оборин В. А. Устройство для испытания материала на сдвиг и кручение при скорости деформации $10^2\text{--}10^5\text{ с}^{-1}$ и способ определения зависимости максимального касательного напряжения от деформации сдвига в образце материала в виде сплошного цилиндрического стержня и способ определения зависимости напряжения от деформации сдвига в образце материала в виде тонкостенной цилиндрической трубы с использованием этого устройства: пат. 2584344 Российская Федерация. № 2014146367/28, заявл. 18.11.2014; опубл. 20.05.2016. Бюл. № 14.

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. A 432, pp. 191–201.
2. Rittel D, Wang Z.G., and Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work. *Phys. Rev. Lett.* 2006. no. 96, 075502.
3. Rittel D, Landau P., and Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure. *Phys. Rev. Lett.* 2008. no. 101, 165501
4. Weinong W. Chen, Bo Song *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. New York: Springer, 2011. 388p.
5. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, no 7, pp. 59–71.
6. 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.
7. 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.
8. 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. RU Patent No 2011,114,711/28, Byull. Izobret., 20 May 2013.
 9. 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.
 10. Naimark O.B., Sokovikov M.A., Plehov O.A., Uvarov S.V Chudinov V.V., Bilalov D.A., Oborin V.A. A device for shear and torsion tests of materials at strain rates in the range of 10^2 - 10^5 s⁻¹ and a method of determining the dependence of maximum tangential stress on the shear strain in the specimen in the form of a solid cylindrical bar and in the specimen in the form of a thin-walled cylindrical pipe on the basis of the patent pending device. RU Patent No 2014,146,368/28, Byull. Izobret., 20 May 2016.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Соковиков М. А. Исследование локализованного пластического сдвига при динамическом нагружении с применением стержня Гопкинсона–Кольского // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 2. С. 41–45. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-41-45

Please cite this article in English as:

Sokovikov M. A. Investigation of localized plastic shear under dynamic loading in a split Hopkinson pressure bar. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 2, pp. 41–45. doi: 10.17072/1994-3598-2019-2-41-45