

УДК 539.42  
PACS 81.40.Lm, 62.20.mm

## Исследование локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении методом инфракрасной термографии

**М. А. Соковиков**

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

Проведено экспериментальное исследование механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении методами инфракрасной термографии. Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона–Кольского и при пробивании преград. Для исследования локализованного сдвига при высокоскоростном нагружении использовались образцы типа «сдвиг–сжатие» и образцы специальной формы, разработанные для проведения данных экспериментов. Локализация пластической деформации при высоких скоростях нагружения исследовалась также при пробивании преград в виде формирования и выноса пробки при соударении с цилиндрическими ударниками из высокопрочной стали. Для изучения данного явления выбраны алюминиевые сплавы АМгб и Д16. 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. Наряду с термопластической неустойчивостью механизмы локализации пластической деформации при динамическом нагружении связываются со скачкообразными процессами в структуре материала. Данное положение подтверждается структурными исследованиями, проведенными с нагруженными образцами и результатами численного моделирования, реализованного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале

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

*Поступила в редакцию 04.04.2018; принята к опубликованию 15.05.2018*

## The study of plastic strain and fracture localization under dynamic loading using infrared thermography technique

**M. A. Sokovikov**

Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, 614013, Perm, Ak. Korolev str., 1  
e-mail: sokovikov@icmm.ru

Experimental study into the mechanisms of plastic strain localization under dynamic loading was carried out by the infrared thermography methods. Dynamic tests of specimens were conducted us-

ing the split Hopkinson bar and target perforation techniques. The localized shear strains under high rate loading were explored in shear-compression specimens and specimens of special shape designed for such experiments. Localization of plastic strains under high-rate loading was investigated in target perforation tests involving the formation and ejection of a plug due to impact of a cylindrical striker made of high strength steel on the specimen. This phenomenon was studied in specimens made of aluminum alloys АМг6 and Д16. The investigation of the specimen surface was made online using the high-speed infrared camera CEDIP Silver 450M. The distributions of the temperature field obtained at different instants of time made it possible to get insight into the evolution of the process of plastic strain localization. The mechanisms of plastic strain localization under dynamic loading are supposed to be due to the two main factors: thermoplastic instability and jump-like processes occurring in the material structure. This statement was substantiated by the data of structural analysis of the loaded specimens and the results of numerical simulation, which was performed taking into account the kinetics of accumulation of micro-defects in the material under investigation

**Keywords:** plastic strain localization; infrared thermography; dynamic loading

Received 04.04.2018; accepted 15.05.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-52-57

## 1. Введение

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

Целью данной работы является экспериментальное обоснование, в том числе методов инфракрасного сканирования, положения о существовании различных механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении.

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

Качественные особенности структурно-обусловленного механизма локализации пластического сдвига (динамическая рекристаллизация) отмечаются также в работах [1–3].

Метод инфракрасной термографии начал активно применяться для исследования свойств материалов во второй половине двадцатого века.

Изучение процесса локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения с помощью методов инфракрасного сканирования проводилось рядом авторов [1–7].

## 2. Экспериментальные исследования

Образцы, на которых может быть реализовано динамическое деформирование по схеме «сдвиг-

сжатие», испытывались на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского [1]. Цилиндрические образцы имели диаметр 10 мм, высоту 20 мм. Вырезы прямоугольного сечения шириной 2 мм и глубиной 3.75 мм, ориентированные под углом 45° к оси образца, обеспечивали при нагружении сжатием локализованное пластическое течение. В качестве исследуемого материала был выбран сплав АМг6, проявляющий «склонность» к неустойчивости пластического течения. Термодинамика процесса деформирования с целью идентификации характерных стадий локализации деформации и развития разрушения локализованным сдвигом исследовалась «in-situ» регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300°К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек.

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

Деформации достигали ~0.2, скорости деформаций –  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Данные по деформации и скорости деформации определены из результатов численного моделирования, расчеты здесь и далее проводились Д. А. Билаловым.

Температура приведена в момент достижения максимума  $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

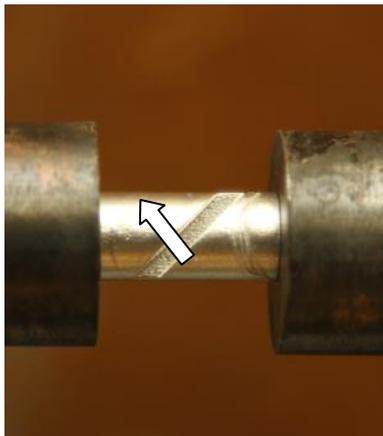
Установленные с учетом разрешения камеры значения температуры по ширине исследуемой области локализации деформации не превышали ~70 °С (приблизительно 0.1 от температуры плавления). Это позволяет сделать вывод о том, что температурный эффект снижения вязкости не играет решающую роль в стадийности локализованного сдвига в представленной работе.



Рис. 1. Разрезной стержень Гопкинсона с установленной инфракрасной камерой



(a)

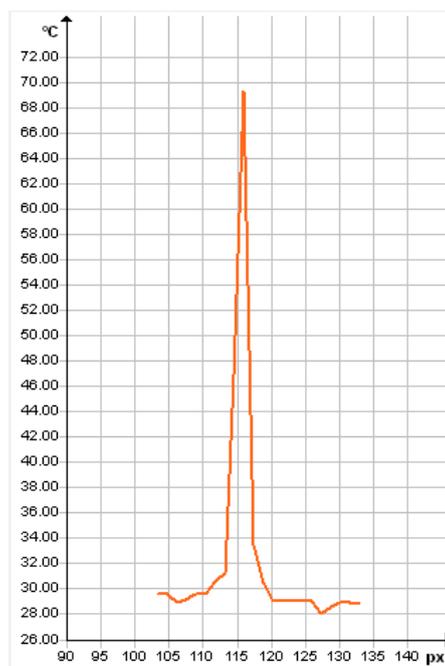


(б)

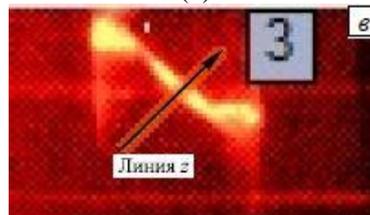
Рис 2 Образец для испытаний на сдвиг: а – внешний вид; б – образец между входным и выходным стержнями Гопкинсона–Кольского. Стрелкой показана область преимущественного сдвига



(a)



(б)



(в)

Рис.3. Испытание на сдвиг: а – образец № 3 после испытания; б – зависимость температуры вдоль линии z, в пикселях инфракрасной камеры в выбранный момент времени; в – изображение образца в инфракрасных лучах в процессе испытания

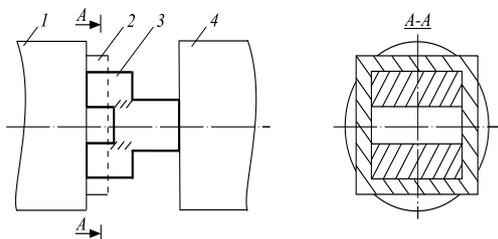
Для исследования поведения материалов в режиме близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона–Кольского были разработаны образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния [8]. Полученные распределения температурных полей на боковой поверхности образца в различные моменты времени позволили судить о развитии процесса локализации пластической деформации.

В качестве исследуемого материала был выбран сплав Д16. Термодинамика процесса деформирования исследовалась *in situ* регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

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  $\sim 48^{\circ}\text{C}$  для сплава Д16 (рис. 4, 5).

Деформации достигали  $\sim 0.1$ , скорости деформаций –  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Данные по деформации и скорости деформации определены из результатов численного моделирования.

Температура приведена в момент достижения максимума  $\sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .



(а)

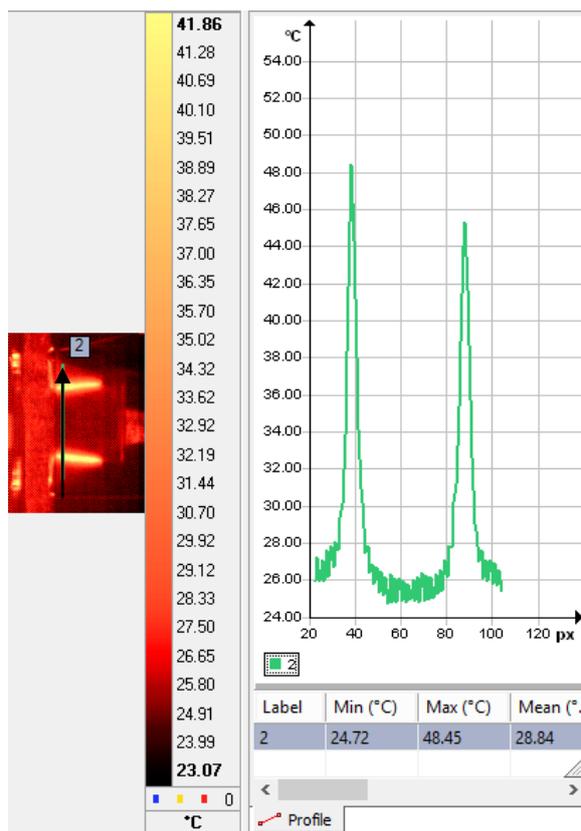


(б)

**Рис.4.** Нагрузка образца на стержне Гопкинсона–Кольского: а – схема эксперимента, 1 – входной стержень, 2 – рамка, 3 – образец, заштрихованные области находятся в состоянии близком к чистому сдвигу, 4 – выходной стержень; б – образец специальной формы после испытания, сплав Д16; стрелками показаны области преимущественного сдвига

На оригинальной баллистической установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из сплава алюминия АМг6. Для этого использовались цилиндрические ударники из высокопрочной стали массой 7.4 г, диаметром 5 мм, длиной 48 мм.

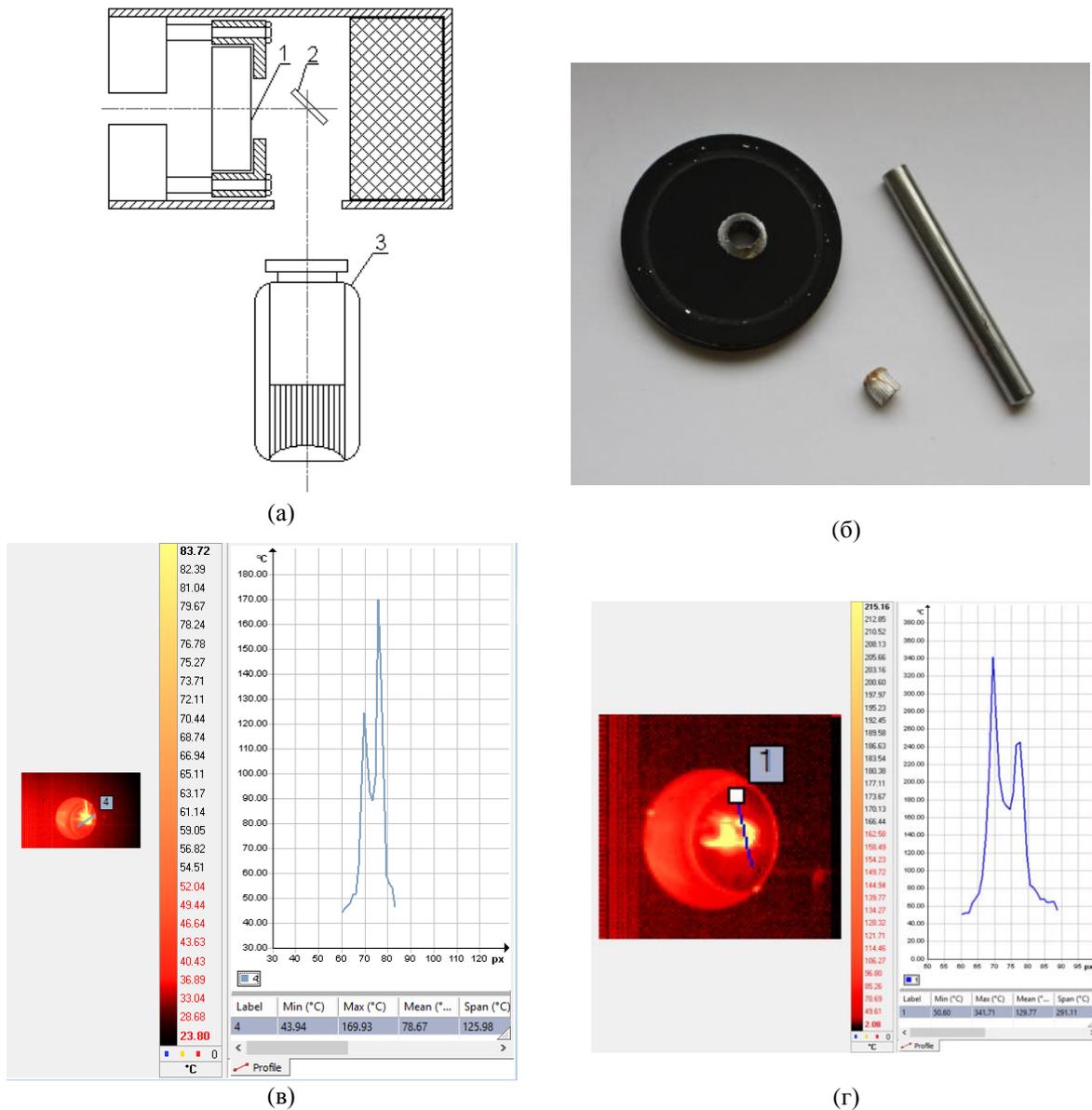
При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Для исследования распределения пластических деформаций на тыльной поверхности мишени в процессе формирования и выноса пробки использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M [6, 7].



**Рис.5.** Изображение образца в инфракрасных лучах в процессе испытания образца из сплава Д16 и зависимость температуры вдоль показанной координаты в пикселях инфракрасной камеры в выбранный момент времени. Максимальная температура по периметру отверстия – 48 °C

На рис. 6. показаны схема эксперимента: рис. 6, а – пробитая мишень, выбитая пробка и деформированный ударник (рис. 6, б); инфракрасные образы отверстия после пробивания образцов из материала АМг6 и графики зависимости температуры от координаты в выбранный момент времени: при скорости налета ударника на преграду 161м/с (рис. 6, в), при скорости налета ударника на преграду 417м/с (рис. 6, г).

Средние скорости деформации, определенные из данных численного моделирования –  $6600 \text{ с}^{-1}$  и  $13900 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Средние значения деформации, определенные из данных численного моделирования – 0.5 и 0.8 соответственно. Температура определялась после вылета пробки, характерные времена –  $7.7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  и  $6.5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , соответственно.



**Рис.6.** Эксперимент по высокоскоростному нагружению: а – схема эксперимента: 1 – образец, 2 – зеркало, 3 – инфракрасная камера; б – пробитая мишень, выбитая пробка и деформированный ударник; в – инфракрасные образы отверстий после пробития и графики зависимости температуры от координаты в выбранные моменты времени

### 3. Обсуждение результатов

Исследования процесса высокоскоростного нагружения с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что для алюминиевых сплавов АМг6, Д16 при малых скоростях деформирования отсутствуют условия для реализации механизма термопластической неустойчивости, но для образцов из сплава АМг6 при развитых пластических деформациях и высоких скоростях деформирования возможно сочетание как структурно обусловленного механизма локализации пластической деформации, так и механизма, связанного с температурным разупрочнением.

### 4. Выводы

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов [7,9,10], а также данные численного моделирования [7,9,10], проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен существенным влиянием скачкообразных процессов в дефектной структуре материала.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 17-08-00905\_a, 17-41-590149 p\_a, 16-48-590534 p\_a, 18-08-01186\_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. Vol. A432. P. 191–201.
2. Rittel D., Wang Z. G., Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 96, 075502.
3. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101, 165501.
4. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. Vol. 7, N. 1. P. 59–71.
5. Marchand A., Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1988. Vol. 36. N. 3. P. 251–283.
6. 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.
7. Билалов Д. А., Соковиков М. А., Чудинов В. В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 5. С. 43–47.
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: патент РФ № 2482463 от 20.05.2013. Роспатент, 2013.
9. Билалов Д. А., Соковиков М. А., Чудинов В. В., Оборин В. А., Баяндин Ю. В., Терёхина А. И., Наймарк О. Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2015. Т. 8. № 3. С. 319–328.
10. Билалов Д. А., Соковиков М. А., Чудинов В. В., Оборин В. А., Баяндин Ю. В., Терёхина 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.

## 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. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, 075502.
3. 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.
4. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, vol. 7, no. 1, pp. 59–71.
5. Marchand A., Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel. *Journal of the Mechanics and Physics Solids*, 1988, vol. 36, no. 3, pp. 251–283.
6. 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.
7. Bilalov D. A., Sokovikov M. A., Chudinov V. V. Multiscale mechanisms of plastic strain localization in the process of target perforation. *Deformatsiya I Razrushenie materialov*, 2017, no. 5, pp. 43–47. (In Russian).
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. Patent N. 2482463, 20.05.2013. Rospatent. 2013.
9. Bilalov D. A., Sokovikov M. A., Chudinov V. V., Oborin V. A., Bayandin Yu. V., Terekhina A. I., Naimark O. B. Studying plastic shear localization in aluminum alloys under dynamic loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 67–75.
10. Bilalov D. A., Sokovikov M. A., Chudinov V. V., Oborin V. A., Bayandin Yu. V., Terekhina A. I., Naimark O. B. Numerical modeling and experimental study of plastic strain localization at dynamic loading of samples under conditions close to pure shear *Computational Continuum Mechanics*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 103–112

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Соковиков М. А. Исследование локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении методом инфракрасной термографии // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. № 2 (40). С. 52–57. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-52-57

**Please cite this article in English as:**

Sokovikov M. A. The study of plastic strain and fracture localization under dynamic loading using infrared thermography technique // *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 2 (40), pp. 52–57. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-52-57