

УДК 539.42  
PACS 81.40.Lm, 62.20.mm

## Изучение механических свойств материалов при динамических сдвиговых нагрузках

**М. А. Соковиков**

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

В статье рассматривается один из методов изучения свойств материалов при динамическом сдвиговом нагружении. В качестве примера, проведено исследование поведения образцов из сплава АМг6 при динамических испытаниях на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского. Показано, что в образцах данного типа сдвиговая компонента тензора деформаций существенно преобладает над осевыми по абсолютному значению. Данные численного моделирования динамического деформирования образцов хорошо коррелируют с экспериментальными данными по исследованию температурных полей «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры. Исследованные образцы вполне пригодны для изучения сопротивления сдвигу материалов при высокоскоростном нагружении на стержне Гопкинсона–Кольского.

**Ключевые слова:** сопротивление сдвигу при высокоскоростном нагружении; стержень Гопкинсона–Кольского; инфракрасная термография

*Поступила в редакцию 08.08.2023; после рецензии 10.11.2023; принята к опубликованию 13.11.2023*

## Study of the mechanical properties of materials subjected to dynamic shear loading

**M. A. Sokovikov**

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

This paper considers one of the methods for studying the properties of materials subjected to dynamic shear loading. As an example problem, we have investigated the behavior of samples made of alloy AMg6 during dynamic tests conducted on a split Hopkinson pressure bar. It is shown that in the samples of this type, the shear components of the strain tensor significantly prevail over axial components in absolute values. The results of numerical simulation of the deformation of samples correlate well with the data obtained during in situ experimental measurements of temperature fields with a high-speed infra-red camera. The investigated samples can be used to study the shear resistance of materials subjected to high-speed loading in split Hopkinson pressure bar tests.

**Keywords:** shear resistance under high-speed loading; split Hopkinson pressure bar; IR thermography.

*Received 08 August 2023; revised 10 November 2023; accepted 13 November 2023*

doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-75-80

## 1. Введение

Проблема изучения механических свойств материалов при испытаниях на сдвиг в условиях высоких скоростей деформирования представляет серьезный теоретический и практический интерес.

В работе рассматривается один из методов изучения свойств материалов при динамическом сдвиговом нагружении. В качестве примера, проведено исследование поведения образцов из сплава АМгб при динамических испытаниях на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского.

Для построения динамических диаграмм при скоростях деформирования  $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup> чаще всего применяется стержень Гопкинсона–Кольского [1–16]. Исследование поведения материалов при динамическом сдвиге проводится с использованием образцов различного вида. Необходимо, чтобы в ходе испытаний в образцах реализовывалось напряженно – деформированное состояние преимущественного сдвига.

В работах [1–4] применяются образцы типа сдвиг–сжатие и сдвиг – растяжение (круглые образцы с симметричными вырезами под углом 45° по обеим сторонам), в которых реализуется сложное напряженно-деформированное, далекое от состояния преимущественного сдвига. В [5–7] используются скошенные (наклонные) цилиндрические образцы, в которых также реализуется сложное напряженно-деформированное состояние. В [8, 9] для изучения сдвига применены круглые («шляпообразные») образцы. Напряженное состояние в них ближе к преимущественному сдвигу, но область сдвига в процессе деформирования недоступна для исследования, например, с применением инфракрасной камеры. В работах [10–13] авторы разработали и запатентовали П-образный образец, в котором реализуется плоское напряженно – деформируемое состояние, что делает доступной область сдвига для исследования в процессе деформирования, но в этих образцах напряженно – деформированное состояние сильно отличается от чистого сдвига.

В [14, 15] для изучения поведения материалов поведения материалов при динамическом сдвиге применен крутильный стержень Гопкинсона–Кольского, при испытании на котором тонкостенных образцов реализуется состояние, близкое к чистому сдвигу, но такое оборудование представляет достаточно сложную конструкцию и имеется в немногих научных центрах. В данной работе рассматривается реализация сдвига при высоких скоростях нагружения, которую можно осуществить на стержне Гопкинсона–Кольского, предназначенном для испытания образцов на сжатие. Для этого используются образцы, описанные в работе [16].

## 2. Экспериментальные исследования

В качестве исследуемого материала был выбран сплав АМгб.

Проводилось исследование механических свойств в условиях сдвига при динамическом нагружении на установке Гопкинсона–Кольского.

При динамическом сжатии в исследуемых образцах реализуется напряженно – деформированное состояние преимущественного сдвига.

Температурные поля, обусловленные диссипацией энергии в процессе деформирования образцов на стержне Гопкинсона–Кольского с целью изучения распределения пластических деформаций при разрушении сдвигом, исследовались «in-situ» регистрацией распределения температур 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.

Разрешение записи по координате («размер пиксела») ~0.2мм, разрешение по времени ~0.25мс. Погрешность измерения температуры ~10%.

Образец, схема экспериментов и результаты приведены на рис. 1–4. Д. Р. Ледоном проведено численное моделирование осуществленного эксперимента с использованием модели Джонсона–Кука. Результаты численного моделирования показаны на рис. 5, 6.

Распределение сдвиговой компоненты тензора скорости деформаций представлено на рис. 6, а. Средняя скорость деформации в полосе сдвига ~11000 с<sup>-1</sup>.

При нагружении скорость деформации продолжает увеличиваться, однако дальнейшие расчеты нельзя считать достоверными, так как не учитывается разрушение образца, которое происходит в реальности.

Распределение осевых и сдвиговой компонент тензора деформаций приведено на рис. 6, б. Из полученных результатов можно сделать вывод, что значения сдвиговой компоненты больше осевых на порядок (достигает ~0.36, в то время как значения осевых компонент не превосходят ~0.04).

Методом численного моделирования определена средняя ширина области сдвига равная 0.29 мм. Ширина области сдвига существенно влияет на величину и скорость деформации сдвига.

На рис. 7 показана зависимость технического напряжения сдвига от технической деформации сдвига для сплава АМгб, полученная для образца, показанного на рис. 1, при испытании на стержне Гопкинсона–Кольского, ширина полосы сдвига 0.29мм.

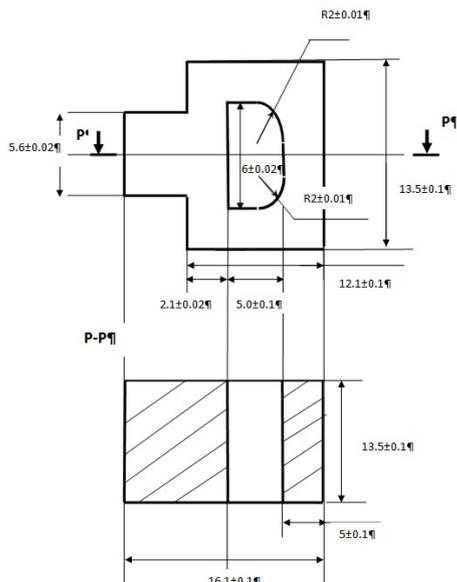


Рис. 1. Образец из сплава АМгб для изучения механического поведения материала при динамическом сдвиговом нагружении



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

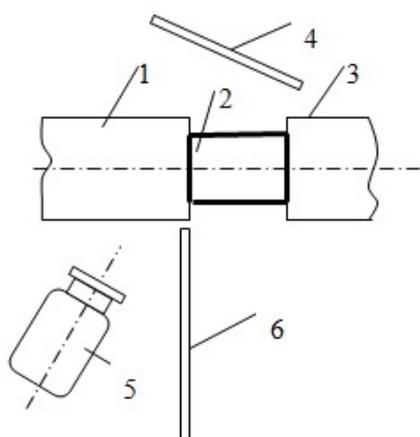
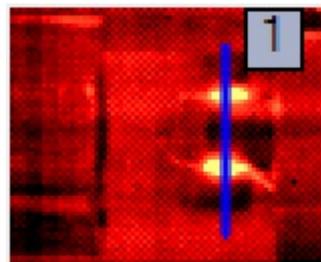


Рис. 3. Схема проведения эксперимента: 1 – опорный стержень, 2 – образец, 3 – нагружающий стержень, 4 – зеркало, 5 – инфракрасная камера, 6 – защитный экран



(a)

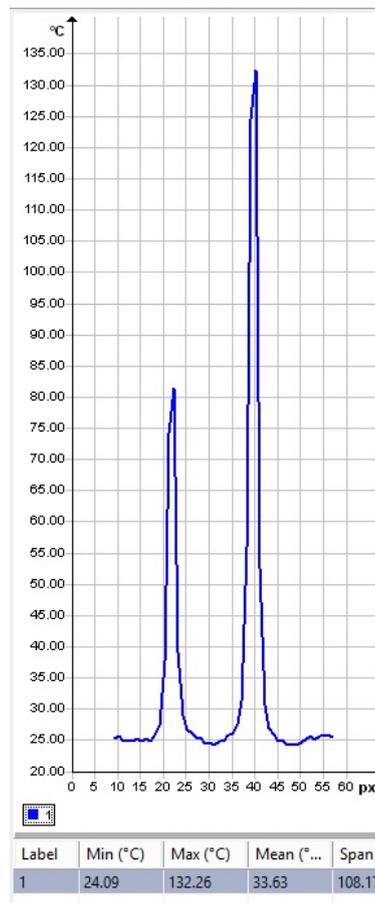
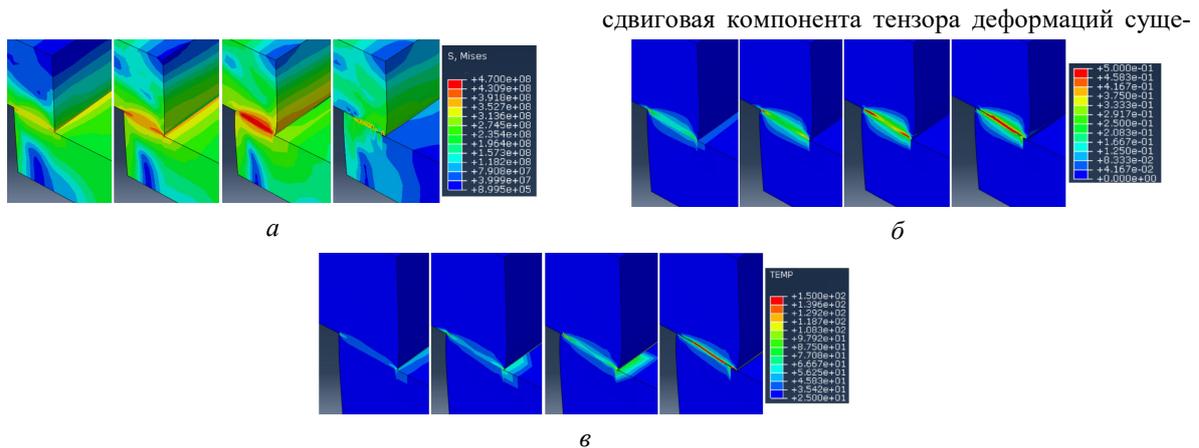


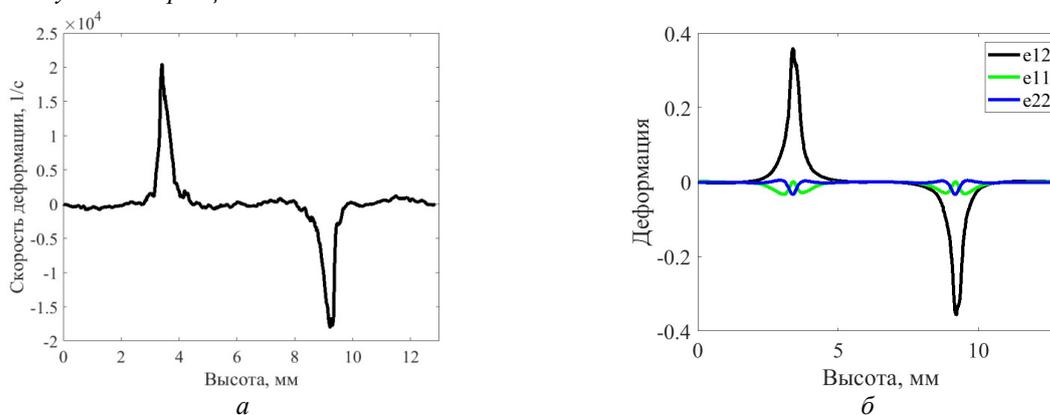
Рис. 4. Эксперимент по изучению динамического сдвига в сплаве АМгб: а – изображение образца в инфракрасных лучах в процессе эксперимента; б – зависимость температуры вдоль показанной координаты в выбранный момент времени. Максимальная температура ~132°C

Сравнение температуры, измеренной в экспериментах на боковой поверхности образцов в процессе нагружения, и полученной в расчётах, приведено в таблице.

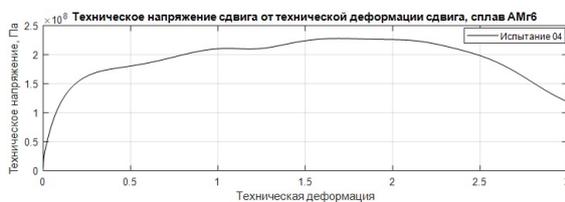
Несколько завышенная температура в расчётах по сравнению с экспериментом объясняется тем, что в расчетах предполагалось, что вся энергия диссипации расходуется на тепло. В действительности, часть энергии расходуется на структурные процессы в материале.



**Рис. 5.** Результаты численного моделирования: а – интенсивность напряжений; б – сдвиговая деформация; в – температура в моменты времени:  $1.75 \cdot 10^{-5}$  с.  $2.25 \cdot 10^{-5}$  с.  $3.0 \cdot 10^{-5}$  с.  $3.25 \cdot 10^{-5}$  с для исследуемого образца



**Рис. 6.** Тензор деформаций в момент времени 0.04 с: а – сдвиговая компонента; б – распределение компонент



**Рис. 7.** Зависимость технического напряжения сдвига от технической деформации для сплава АМгб

Максимальная температура в эксперименте и расчёте в процессе деформирования

№ образца	Температура (эксперимент), °С	Температура (расчёт), °С
4	132	150
6	120	140
8	110	120

### 3. Обсуждение результатов

Результаты изучения процесса динамического деформирования в исследованных образцах, данные численного моделирования для алюминиевого сплава АМгб позволяют сделать вывод о том, что

сдвиговая компонента тензора деформаций суще-

ственно преобладает над осевыми по абсолютному значению, т.е. напряженно-деформированное состояние близко к преимущественному сдвигу. Данные численного моделирования динамического деформирования образцов хорошо коррелируют с экспериментальными данными по исследованию температурных полей с применением инфракрасной камеры. Исследованные образцы вполне пригодны для изучения сопротивления сдвигу материалов при высокоскоростном нагружении на обычном стержне Гопкинсона–Кольского, предназначенном для испытаний образцов при сжатии.

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. A 432. 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. Dorogoy A., Rittel D., Godinger A. A Shear-tension specimen for large strain testing // *Experimental Mechanics*, 2016. N. 56, P. 437–449.
5. 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.
6. 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.
7. Pursche F., Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels // *Engineering Transactions*. 2011. N. 59 (2). P. 67–84.
8. Xue Q., Gray G.T. III, Henrie B.L., Maloy S.A., Chen S.R. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36A. P. 1471–1486.
9. Пухов М.А., Пушков В.А., Борисенко В.А., Вяткин Ю.А., Батков Ю.В. Исследование локализации адиабатического сдвига в меди марки М1 методом составного стержня Гопкинсона // *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. № 4. С. 379–384.
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 Integrita Strutturale*. 2016. Vol. 10. N. 38. P. 296–304.
11. 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.
12. Соковиков М. А., Чудинов В. В., Оборин В. А., Уваров С. В., Наймарк О. Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019. Т. 12, № 3. С. 301–312. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.3.26.
13. Образец для испытания на сдвиг (варианты) и способ испытаний его: патент RU № 2482463 / Наймарк О. Б., Баяндин Ю. В., Соковиков М. А., Плехов О. А., Уваров С. В., Банников М. В., Чудинов В. В. № 2011114711/28; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.
14. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. N 7. P. 59–71.
15. 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.
16. Budiwantoro B., Kariem M. A., Febrinawarta B. The influence of shear angles on the split Hopkinson shear bar testing // *International Journal of Impact Engineering*. 2022. Vol. 149. P. 1–16.

## 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., 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. Dorogoy A., Rittel D., Godinger A. A Shear-tension specimen for large strain testing. *Experimental Mechanics*, 2016. no. 56, pp. 437–449.
5. Meyer L. W., Staskewitsch E., Burblies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading. *Mechanics of Materials*, 1994. no.17, pp. 203–214.
6. 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, no. 24, pp. 747–758.
7. Pursche F., Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels. *Engineering Transactions*, 2011, no. 59 (2), pp. 67–84.
8. Xue Q., Gray G. T. III, Henrie B. L., Maloy S. A., Chen S.R. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 36A, pp. 1471–1486.
9. Pukhov M.A., Pushkov V.A., Borisenok V.A., Vyatkin Yu. A., Batkov Yu.V. Investigation of the localization of adiabatic shearing M<sub>1</sub> copper using split Hopkinson bar method. *Problems of Strength And Plasticity*, 2015, no. 4, pp. 379–384. (In Russian).
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 Integrita 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., Terkhina 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. 1179–1188.
12. Sokovikov M., Chudinov V., Oborin V., Uvarov S., Naimark O. Study of localized shear fracture mechanisms of alloys under dynamic loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, vol. 61, no. 7, pp. 135–146.
  13. 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 the test method for it. Patent RU N. 2482463, 2013.
  14. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, no 7, pp. 59–71.
  15. 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.
  16. Budiwantoro B., Kariem M. A., Febrinawarta B. The influence of shear angles on the split Hopkinson shear bar testing. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, vol. 149, pp 1–16.

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

Сокоиков М. А. Изучение механических свойств материалов при динамических сдвиговых нагрузках // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 4. С. 75–80. doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-75-80

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

Sokovikov M. A. Study of the mechanical properties of materials subjected to dynamic shear loading. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 4, pp. 75–80. doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-75-80

**Сведения об авторах**

Михаил Альбертович Сокоиков, канд. физ.-мат. наук, доцент, с.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева 1, 614013, г. Пермь.

**Author information**

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