

УДК 539.42
PACS 81.40.Lm, 62.20.mm

Определение величины области пластического деформирования при изучении механических свойств материалов при динамических сдвиговых нагрузках

М. А. Соковиков[†], В. В. Чудинов, С. В. Уваров, А. Н. Балахнин, О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†]sokovikov@icmm.ru

В статье рассматривается вопрос об определении величины области пластического деформирования при изучении свойств материалов при динамическом сдвиговом нагружении. В качестве примера проведено исследование поведения образцов из сплава АМг6 при динамических испытаниях на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского с применением высокоскоростной фотокамеры Photron FASTCAM SA-Z 2100K и DIC технологии. Экспериментально определены поля сдвиговых деформаций и ширина области локализации. Значение величины области пластического деформирования, найденное путем численного моделирования, хорошо коррелирует с экспериментальными данными по определению величины данной области, полученными с использованием высокоскоростной фотокамеры и DIC технологии. Методами численного моделирования показано, что в образцах данного типа сдвиговая компонента тензора деформаций существенно преобладает над осевыми по абсолютному значению.

Ключевые слова: изучение сопротивления сдвигу материалов при высокоскоростном нагружении; стержень Гопкинсона–Кольского; величина области пластической деформации; высокоскоростная фотокамера; DIC технология

Поступила в редакцию 05.07.2024; после рецензии 06.08.2024; принята к опубликованию 08.08.2024

Determination of the size of the plastic strain region in the study of mechanical properties of materials under dynamic shear loads

M. A. Sokovikov[†], V. V. Chudinov, S. V. Uvarov, A. N. Balakhnin, O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

[†]sokovikov@icmm.ru

The paper is concerned with the problem of determining the size of the plastic strain region when studying the properties of materials under dynamic shear loads. As an example, the behavior of AMg6 alloy specimens in dynamic tests on the split Hopkinson pressure bar was studied by applying a Photron FASTCAM SA-Z 2100K high-speed camera and DIC technology. The shear strain fields and the width of the strain localization region were determined experimentally. The size of the plastic strain region evaluated through numerical modeling correlates well with the results of the experiment determining the size of this region with the use of high-speed camera and DIC technology. The investigation by means of numerical modeling techniques has shown that in the specimens being considered the shear component of the strain tensor in absolute value significantly prevails over the axial component.

Keywords: study of shear resistance of materials under high-speed loading; split Hopkinson pressure bar; size of plastic strain region; high-speed camera; DIC technology

Received 05 July 2024; revised 06 August 2024; accepted 08 August 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-13-18

1. Введение

При изучении механических свойств материалов, т.е. их поведения в процессе деформирования и разрушения, проводятся испытания при различных видах напряженно-деформированного состояния в широком диапазоне скоростей деформирования. Если при растяжении и сжатии методики испытаний давно хорошо разработаны и апробированы, то изучение механических свойств материалов при сдвиге представляет серьезную научно-техническую проблему. Дело в том, что наиболее информативно поведение материалов в условиях «чистого сдвига», т.е., когда в тензоре напряжений, записанном в определенной системе координат, диагональные компоненты, которые отвечают за растяжение и сжатие, равны нулю и остаются только недиагональные компоненты, отвечающие за сдвиг. При статических нагрузках такое состояние получают при кручении тонкостенного цилиндра (для этого необходимо иметь соответствующее специальное оборудование). При динамическом (высокоскоростном) нагружении изучение поведения материалов связано с большими техническими трудностями. В экспериментах применяют крутильный стержень Гопкинсона–Кольского, который представляет собой достаточно сложную конструкцию и имеется в немногих научных центрах. Поэтому при испытаниях на стержне Гопкинсона–Кольского применяются образцы, которые деформируются в условиях «преимущественного сдвига», т.е. компоненты, отвечающие за растяжение и сжатие, не равны нулю, но они существенно меньше, чем компоненты, отвечающие за сдвиг. Такие образцы и методики обсуждаются в работах [1–17]. Данный вопрос рассматривался в статье [1].

Одной из главных задач данного направления исследований является определение ширины области пластического сдвига. Ширина области сдвига существенно влияет на величину и скорость деформации сдвига.

В работе сделана попытка решения данной задачи. В качестве примера, проведено исследование поведения образцов из сплава АМгб при динамических испытаниях на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского с применением высокоскоростной фотокамеры и DIC технологии.

Для построения динамических диаграмм при скоростях деформирования 10^2 – 10^5 с⁻¹ чаще всего применяется стержень Гопкинсона–Кольского [2–17].

Исследование поведения материалов при динамическом сдвиге проводится с использованием образцов различного вида [2–17].

Необходимо, чтобы в ходе испытаний в образцах реализовывалось напряженно – деформированное состояние преимущественного сдвига.

Для этого используются образцы, описанные в работе [17].

2. Экспериментальные исследования

В качестве исследуемого материала был выбран сплав АМгб.

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

Осуществлены динамические испытания образцов на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского с применением высокоскоростной фотокамеры Photron FASTCAM SA-Z 2100K и DIC технологии, разрешение 256×136 пикселей, скорость съемки 100800 кадр/с, время открывания затвора $1/2880000$ с, масштаб 0.03 мм/пиксель.

Экспериментально определены поля сдвиговых деформаций и ширина области локализации.

Образец, схема экспериментов и результаты приведены на рис. 1–4.

Д.Р. Ледоном с использованием подходов [12, 18] проведено численное моделирование осуществленного эксперимента по динамическому деформированию образцов. Задача решалась в плоской постановке. Условия нагружения моделировались заданием перемещений, известных из эксперимента на торцах образцов. Для описания неупругого поведения материала использовали модель с изотропным упрочнением. Зависимость напряжения течения от пластической деформации получена в работе [18] при характерной скорости деформации 1 с⁻¹.

На рис. 5 показано полученное путем численного моделирования распределение осевых и сдвиговой компонент тензора деформаций в различные моменты времени. Из приведенных результатов можно сделать вывод, что значения сдвиговой компоненты превышает значения осевых на порядок (достигает ~0.36, в то время как значения осевых компонент не превосходят ~0.04).

На рис. 6 представлено распределение интенсивности напряжений в образце в момент времени 0.1 мс.

По данным численного моделирования [12, 18] определена средняя ширина области сдвига, равная 0.29 мм. На рис. 4 показано распределение

сдвиговой компоненты тензора деформаций в сечениях, показанных на рис. 3. Данные получены с использованием высокоскоростной фотокамеры и DIC технологии.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что ширина области пластической деформации примерно 0.4–0.45 мм, что является приемлемым результатом для динамических испытаний.

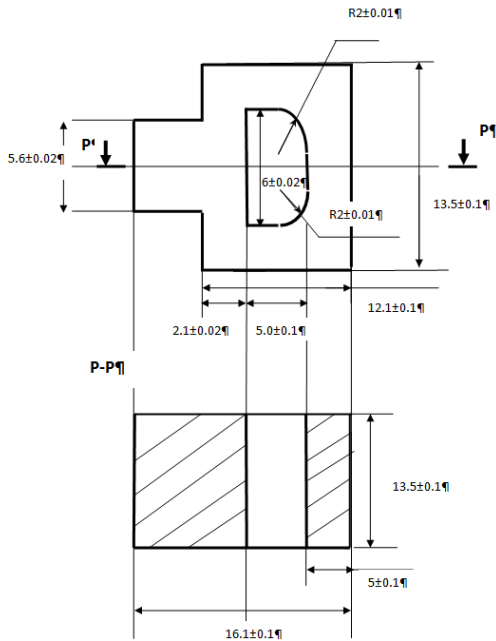


Рис. 1. Образец из сплава АМгб для изучения механического поведения материала при динамическом сдвиговом нагружении

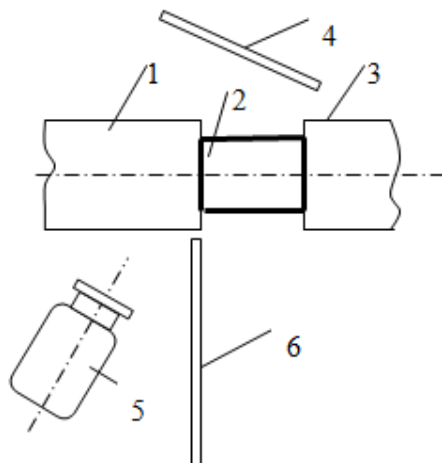


Рис. 2. Схема проведения эксперимента: 1- опорный стержень, 2 – образец, 3- нагружающий стержень, 4- зеркало, 5 – высокоскоростная камера, 6 – защитный экран

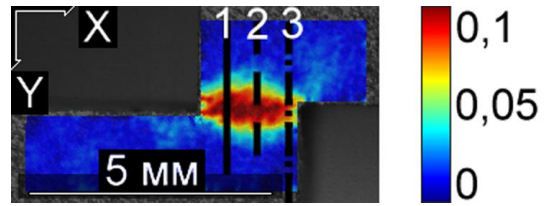


Рис. 3. Пространственное распределение сдвиговой компоненты тензора деформаций

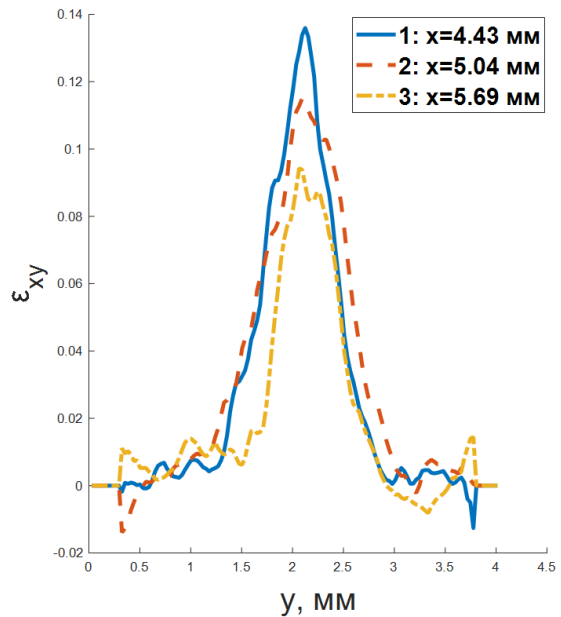


Рис. 4. Распределение сдвиговой компоненты тензора деформаций в сечениях 1, 2, 3, указанных на рис. 3

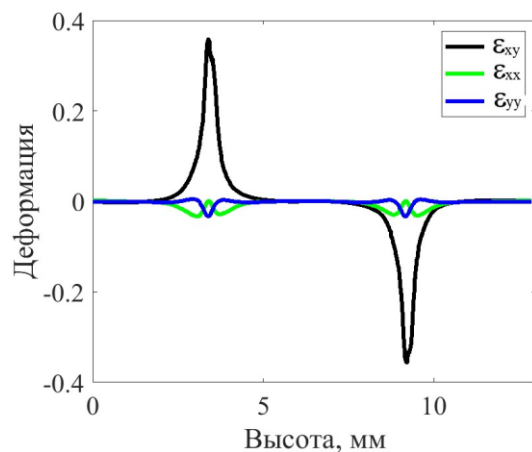


Рис. 5. Распределение компонент тензора деформаций в момент времени 0.04 мс

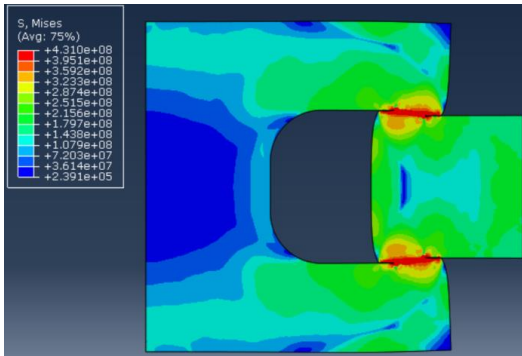


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений в образце в момент времени 0.1 мс

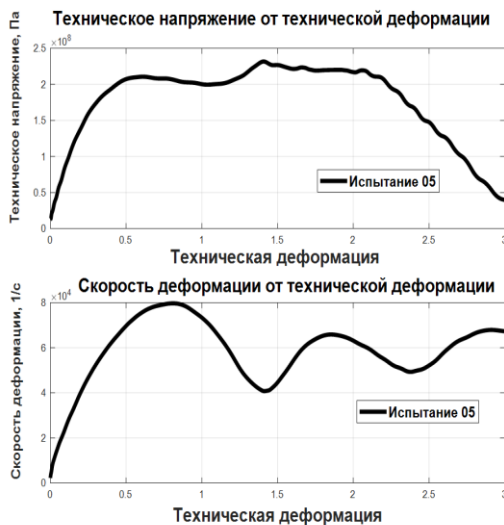


Рис. 7. Зависимость технического напряжения сдвига от технической деформации сдвига и скорости технической деформации сдвига от технической деформации сдвига для сплава АМг6

На рис. 7 показана зависимость технического напряжения сдвига от технической деформации сдвига и скорости технической деформации сдвига от технической деформации сдвига для сплава АМг6, полученная для образца, показанного на рис. 1, при испытании на стержне Гопкинсона-Кольского, ширина полосы сдвига 0.29 мм. Средняя скорость деформации $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Под техническим напряжением понимается отношение усилия к площади начального сечения. Под технической деформацией и технической скоростью деформацией понимается отношение соответственно перемещения и скорости к начальной толщине области деформирования.

3. Обсуждение результатов

Результаты изучения процесса динамического деформирования в исследованных образцах, данные численного моделирования для алюминиевого сплава АМг6 позволяют сделать вывод о том, что

сдвиговая компонента тензора деформаций существенно преобладает над осевыми по абсолютному значению, т.е. напряженно-деформированное состояние близко к преимущественному сдвигу. Значение величины области пластического деформирования, полученное путем численного моделирования, вполне удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными по определению величины данной области, полученными с использованием высокоскоростной фотокамеры и DIC технологии.

Выводы

Значение величины области пластического деформирования, полученное путем численного моделирования, достаточно хорошо коррелирует с экспериментальными данными по определению величины данной области, полученными с использованием высокоскоростной фотокамеры и DIC технологии, в пределах примерно 30%.

Исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № 124020200116-1)

Список литературы

1. Соковиков 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
2. 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.
3. Rittel D., Wang Z. G., Merzner M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96, 075502.
4. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // Phys. Rev. Lett. 2008. N. 101, 165501.
5. Dorogoy A., Rittel D., Godinger A. A Shear-tension specimen for large strain testing // Experimental Mechanics, 2016. N. 56, P. 437–449.
6. Meyer L. W., Staskewitsch E., Burblies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading // Mechanics of Materials. 1994. Vol. 17. P. 203–214.
7. 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. P. 747–758.
8. Pursche F., Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels // Engineering Transactions. 2011. Vol. 59. P. 67–84.
9. 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.
10. Пухов М. А., Пушков В. А., Борисенко В. А., Вяткин Ю. А., Батьков Ю. В. Исследование локализации адиабатического сдвига в меди марки М1 методом составного стержня Гопкинсона // *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. № 4. С. 379–384.
 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. Биалов 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.
 13. Сокоиков 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.
 14. Наймарк О. Б., Байандин Ю. В., Сокоиков М. А., Плехов О. А., Уваров С. В., Банников М. В., Чудинов В. В. Патент РФ 2482463. Образец для испытания на сдвиг (варианты) и способ его испытаний. 2013.
 15. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. 1988. N. 7. P. 59–71.
 16. 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.
 17. 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.
 18. Байандин Ю. В., Биалов Д. А., Уваров С. В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора–Гопкинсона // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020. Т. 13, № 4. С. 449–458. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.35
 19. 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.
 20. Rittel D., Wang Z.G., Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work. *Phys. Rev. Lett.*, 2006. vol. 96, 075502.
 21. Rittel D., Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, 165501.
 22. Dorogoy A., Rittel D., Godinger A. A Shear-tension specimen for large strain testing. *Experimental Mechanics*, 2016, no. 56, pp. 437–449.
 23. Meyer L. W., Staskewitsch E., Burchies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading. *Mechanics of Materials*, 1994, vol. 17, pp. 203–214.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. Pukhov M. A., Pushkov V. A., Borisenok V. A., Vyatkin Yu. A., Batkov Yu. V. Investigation of adiabatic shear localization in copper of M1 grade by the split Hopkinson pressure bar technique. *Problems of Strength and Plasticity*, 2015, no. 4, pp. 379–384. (In Russian).
 28. 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.
 29. 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. 1179–1188.
 30. 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. DOI: 10.1134/S0021894420070147
 31. 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 testing method. RU Patent No. 2482463, 2013.
15. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Material*, 1988, no. 7, pp. 59-71.
 16. 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.
 17. 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.
 18. Bayandin Yu. V., Bilalov D. A., Uvarov S. V. Verification of wide-range constitutive relations for elastic-viscoplastic materials using Taylor-Hopkinson test. *Computational Continuum Mechanics*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 449-458. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.35

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Соковиков М. А., Чудинов В. В., Уваров С. В., Балахнин А. Н., Наймарк О. Б. Определение величины области пластического деформирования при изучении механических свойств материалов при динамических сдвиговых нагрузках // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 3. С. 13-18. doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-13-18

Please cite this article in English as:

Sokovikov M. A., Chudinov V. V., Uvarov S. V., Balakhnin A. N., Naimark O. B. Determination of the size of the plastic strain region in the study of mechanical properties of materials under dynamic shear loads. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 3, pp. 13-18. doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-13-18

Сведения об авторах

1. Соковиков Михаил Альбертович, канд. физ.-мат. наук, доцент, с.н.с., лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013
2. Чудинов Василий Валерьевич, инженер, лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013
3. Уваров Сергей Витальевич, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013
4. Балахнин Александр Николаевич, канд. техн. наук, н.с., лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013
5. Наймарк Олег Борисович, доктор физ.-мат. наук., профессор, заведующий лабораторией физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013

Author information

1. Mikhail A. Sokovikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. Vasily V. Chudinov, Engineer, Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
3. Sergey V. Uvarov, 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.
4. Aleksandr N. Balakhnin, Candidate of Engineering Sciences, Researcher, Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
5. Oleg B. Naimark, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Physical Foundations of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.