



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.14

УДК 669.017:539.4; 669.017:539.52

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВЕ АМГ6 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

М.А. Соковиков, В.А. Оборин, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 апреля 2021 г.
Принята: 30 июня 2021 г.
Опубликована: 22 октября 2021 г.

Ключевые слова:

динамическое нагружение, локализация пластической деформации, инфракрасное сканирование, исследование рельефа поверхности деформированных образцов.

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено обоснованию одного из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении, связанном со скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

Для этого проводились эксперименты по изучению локализации пластической деформации в образцах из сплава АМг6 при нагружении на стержне Гопкинсона–Кольского и при пробивании преград. Температурные поля при пластическом деформировании с целью идентификации характерных стадий локализации деформации исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Значения температур в зоне локализации свидетельствуют от том, что механизм локализации деформации, обусловленный термопластической неустойчивостью в осуществленных условиях нагружения для сплава АМг6, не реализуется.

Испытанные образцы специальной формы подвергались исследованию рельефа поверхности с помощью оптического интерферометра-профилометра NewView-5010 с последующей обработкой 3D-данных деформационного рельефа, а также вычислением масштабного инварианта (показателя Хёрста) и пространственного масштаба области, на которой наблюдается коррелированное поведение мезодефектов.

Результаты экспериментальных исследований по динамическому нагружению с изучением температурных полей, изучение рельефа поверхности деформированных образцов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации при реализованных условиях нагружении в сплаве АМг6 обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материала.

© ПНИПУ

© Соковиков Михаил Альбертович – к.ф.-м.н., доц., с.н.с., e-mail: sokovikov@icmm.ru, ID: [0000-0003-0298-6240](https://orcid.org/0000-0003-0298-6240).

Оборин Владимир Александрович – вед. инж., e-mail: oborin@icmm.ru, ID: [0000-0003-2836-2073](https://orcid.org/0000-0003-2836-2073).

Чудинов Василий Валерьевич – инж., e-mail: chudinov@icmm.ru, ID: [0000-0002-4109-1573](https://orcid.org/0000-0002-4109-1573).

Уваров Сергей Витальевич – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: usv@icmm.ru, ID: [0000-0002-7538-0971](https://orcid.org/0000-0002-7538-0971).

Наймарк Олег Борисович – д.ф.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: naimark@icmm.ru, ID: [0000-0001-6537-1177](https://orcid.org/0000-0001-6537-1177).

Mikhail A. Sokovikov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: sokovikov@icmm.ru, ID: [0000-0003-0298-6240](https://orcid.org/0000-0003-0298-6240).

Vladimir A. Oborin – Leading Engineer, e-mail: oborin@icmm.ru, ID: [0000-0003-2836-2073](https://orcid.org/0000-0003-2836-2073).

Vasiliy V. Chudinov – Engineer, e-mail: chudinov@icmm.ru, ID: [0000-0002-4109-1573](https://orcid.org/0000-0002-4109-1573).

Sergey V. Uvarov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: usv@icmm.ru, ID: [0000-0002-7538-0971](https://orcid.org/0000-0002-7538-0971).

Oleg B. Naimark – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory,

e-mail: naimark@icmm.ru, ID: [0000-0001-6537-1177](https://orcid.org/0000-0001-6537-1177).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE EXPERIMENTAL STUDY OF PLASTIC STRAIN LOCALIZATION IN THE AMG6 ALLOY UNDER VARIOUS TYPES OF DYNAMIC LOADS

M.A. Sokovikov, V.A. Oborin, V.V. Chudinov, S.V. Uvarov, O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 April 2021
Accepted: 30 June 2021
Published: 22 October 2021

Keywords:

dynamic loading, plastic strain localization, infrared thermography, study of the surface relief of the deformed samples.

ABSTRACT

This study is concerned with substantiation of one of the mechanisms of plastic strain localization under high rate loading associated with discontinuous processes in the defect structure of materials.

To this end, a series of experiments were carried out to study the localization of plastic strain in specimens of the AMg6 alloy subject to high rate loads on a split Hopkinson–Kolsky bar and during target perforation tests. The temperature fields generated during the plastic deformation tests aimed to identify the characteristic stages of strain localization were investigated "in-situ" using a high-speed infrared camera CEDIP Silver 450M.

The values of temperatures in the strain localization zone indicate that in the AMg6 alloy subject to dynamic loads the mechanism of strain localization caused by thermoplastic instability is not realized.

After testing of specially-shaped specimens, their surface relief was explored using an optical interferometer-profilometer NewView-5010 with a subsequent processing of the obtained 3D data of the deformation relief and computation of the scale invariant (Hurst exponent) and the spatial scale of the region displaying a correlated behavior of mesodeflects.

The results of experimental studies on dynamic loading with a subsequent investigation of the temperature fields, the study of the surface relief of deformed specimens suggest that one of the mechanisms of plastic strain localization in the AMg6 alloy under the realized loading conditions is caused by jump processes in the defect structure of the material.

© PNRPU

Введение

Явление локализации пластической деформации, т.е. возникновение больших градиентов пластической деформации в малых областях, представляет серьезный теоретический и практический интерес.

Локализация пластической деформации металлов при динамическом нагружении является сложным процессом, зависящим от скорости и величины деформации, температуры, а также эволюции структуры материала. На сегодняшний день существует две наиболее распространённые точки зрения о механизмах локализации деформации: термопластическая неустойчивость и механизмы, связанные с эволюцией структуры.

Учет механизмов термопластической неустойчивости [1–12] позволил предсказать инициирование полос сдвига, их толщины и расстояние между ними при множественном возникновении полос локализации.

В [13, 14] показано, что поведение материала на динамических нагрузках связано с состоянием микроструктуры (размер зерен, распределение их ориентации, плотность дислокаций, дислокационных субструктур и т.д.). В работах [15, 16] механизм формирования полос пластического течения при высоких скоростях деформирования связывается с процессами в микроструктуре материала.

В работах [17–19] показано, что динамическое разрушение при сдвиге кристаллических твердых тел может быть связано со структурными переходами (динамическая рекристаллизация).

Процесс формирования полос локализованного сдвига с учетом развития их пространственной самоорганизации, скорости роста, характерных времен взаимодействия между полосами был проанализирован в [20–28].

Возникновение полос сдвига традиционно связывается с наличием максимума на кривой растяжения. Этот максимум обусловлен конкуренцией между стабилизирующим влиянием упрочнения за счет деформации, а также дестабилизирующим влиянием термического разупрочнения [6, 7, 9, 20, 21, 29].

В ряде работ для исследования эволюции полос локализованного сдвига и определения расстояний между ними использовались известные феноменологические модели: степенной закон [30], модель Джонсона–Кука [31], в [32] используется MTS- модель [33].

Настоящее экспериментальное и теоретическое исследование посвящено обоснованию установленного в работах [34,35] механизма локализации пластической деформации при динамическом нагружении материалов, обусловленному коллективным многомасштабным поведением типичных мезоскопических дефектов (микросдвигов).

1. Экспериментальные исследования

Проведено теоретическое и экспериментальное изучение механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении на разрезном стержне Гопкинсона–Кольского образцов из алюминии-

вого сплава АМг6, проявляющего «склонность» к неустойчивости пластического течения.

Для изучения процессов локализации пластической деформации в режиме, близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкинсона-Кольского, были разработаны и запатентованы образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированного состояния [36], и образцы для исследования локализации пластического сдвига при динамическом кручении [37].

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

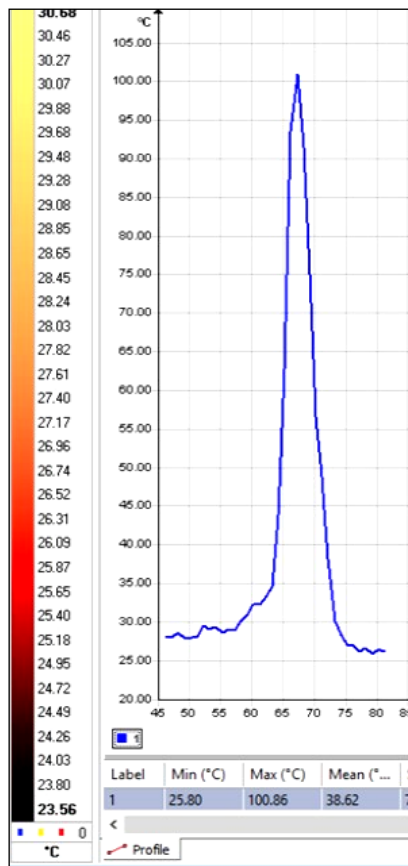
Термодинамика процесса деформирования с целью идентификации характерных стадий локализации деформации и развития разрушения локализованным сдвигом исследовалась *in situ* регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Основные тех-

нические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек [38]. Разрешение записи по координате («размер пиксела») ~ 0,2 мм, разрешение по времени ~ 0,25 мс.

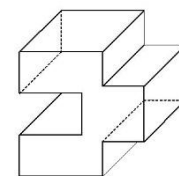
В работе [39] было показано, что при исследуемых скоростях деформации ($\sim 10^3 \text{ c}^{-1}$) и выше характерные времена теплопроводности для сплава АМг6 существенно больше характерных времен процесса деформирования, поэтому, исследуя температурные поля в режиме реального времени, можно делать выводы о распределении температур и пластических деформаций.

Образцы, схемы экспериментов и результаты приведены на рис. 1 и 2.

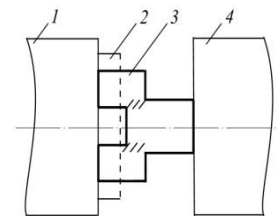
Получены поля температур *in situ* в процессе деформирования. На рис. 1, а, в и 2, а, г показаны графики зависимости температуры от координат в выбранные моменты времени и инфракрасные образцы образцов из материала АМг6 в процессе испытаний.



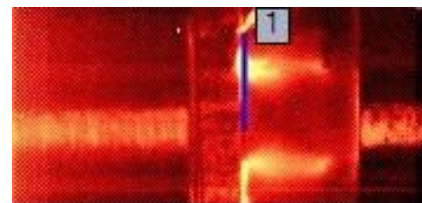
a



б



в



г

Рис. 1. Зависимость температуры вдоль показанной координаты в выбранный момент времени. Максимальная температура ~100 °C (а); образец для испытаний в условиях, близких к чистому сдвигу (П-образный) (б); схема установки образца между стержнями Гопкинсона-Кольского: 1 – входной стержень; 2 – рамка; 3 – образец (заштрихованные области находятся в состоянии, близком к чистому сдвигу); 4 – выходной стержень (в); изображения образца из сплава АМг6 при испытаниях в условиях, близких к чистому сдвигу в инфракрасных лучах в процессе эксперимента (г)

Fig. 1 Temperature variation along the indicated coordinate at the specified moment. Maximum temperature ~100 °C (a). The test specimen under loading conditions close to pure shear (U-shaped) (b). The schematic representation of the specimen fixing between the Hopkinson-Kolsky bars: 1 – input bars, 2 – the frame, 3 – the specimen with shaded areas are in the state close to pure shear, 4 – output bars (c). Infrared image of the specimen made of АМг6 alloy subject to tests under conditions close to pure shear (d)

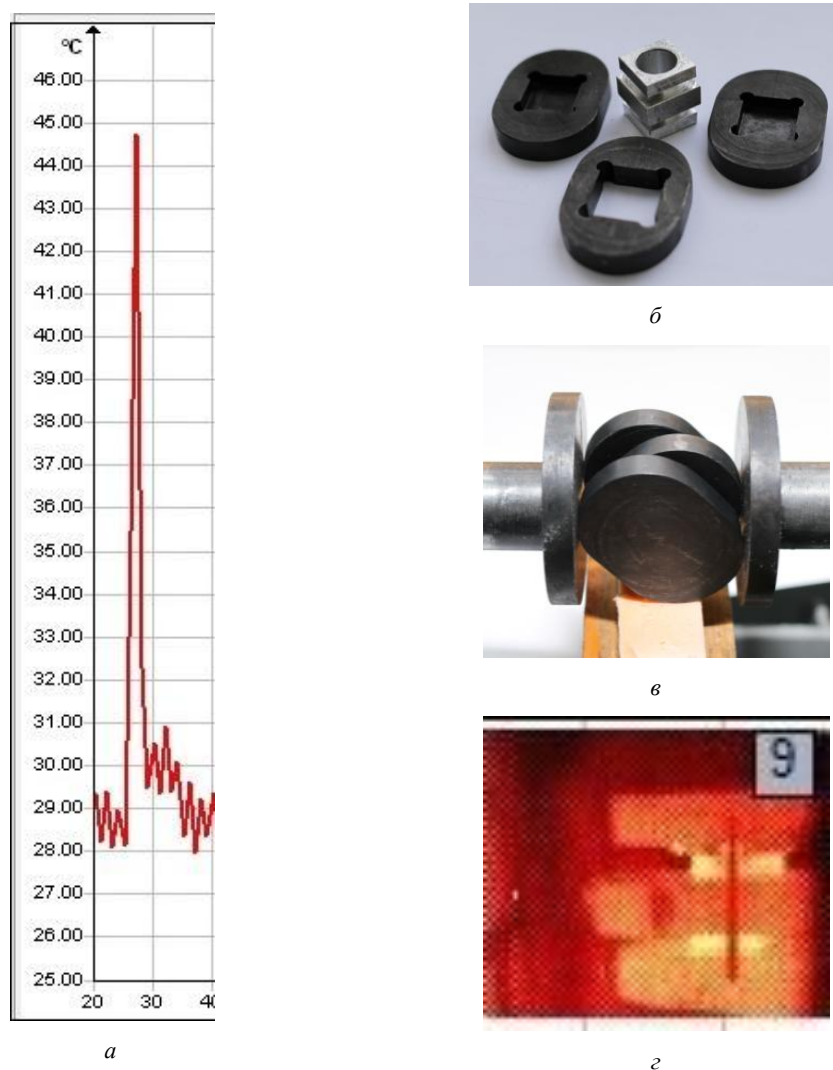


Рис. 2. Зависимость температуры вдоль показанной координаты в выбранный момент времени. Максимальная температура ~45 °С (а); образец и оснастка для испытаний на динамическое кручение (б); образец и оснастка, установленные между стержнями Гопкинсона – Кольского (в); изображения образца из сплава АМгб при испытаниях на динамическое кручение в инфракрасных лучах в процессе эксперимента (г)

Fig. 2. An infrared image of the specimen made of AMg6 alloy in dynamic torsion tests and temperature variation along the indicated coordinate at the specified moment. Maximum temperature ~ 45 °С (a). The specimen and tooling for dynamic torsion tests (b). The specimen and tooling installed between the Hopkinson-Kolsky bars (c). Infrared image of the specimen made of AMg6 alloy in dynamic torsion tests (d)

Температура в области локализации пластической деформации не превышает ~100 °С. Это позволяет сделать вывод о том, что температурное разупрочнение не играет решающей роли в механизме локализованного сдвига в данных условиях нагружения.

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 450 M.

На рис. 3 график зависимости температуры от координаты в выбранные моменты времени, инфракрасный образ отверстия после пробивания образцов из материала АМгб, схема эксперимента, пробитая мишень, выбитая пробка и деформированный ударник. Температурное поле в образце показано в момент достижения максимума температур в процессе испытания. Погрешность измерения температуры ~ 10 %.

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

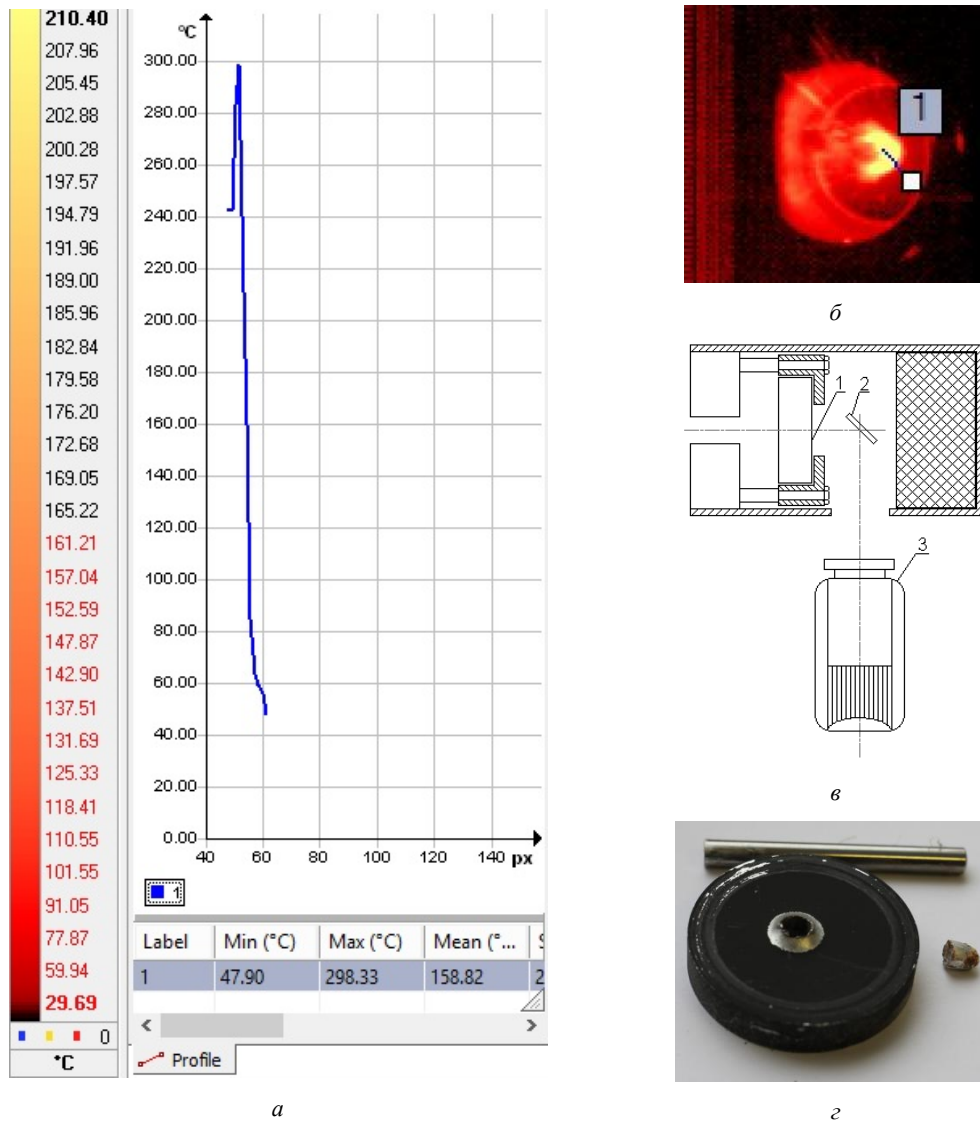


Рис. 3. График зависимости температуры от координаты в выбранные моменты времени (а); инфракрасный образ отверстия после пробивания образцов из материала АМгб (б); схема эксперимента: 1 – образец, 2 – зеркало, 3 – инфракрасная камера (в); пробитая мишень, выбитая пробка и деформированный ударник (г); скорость налета ударника на преграду 368 м/с; максимальная температура ~ 300 °С

Fig. 3. The plot of temperature versus coordinate at the specified moment (a), the infrared image of the hole after perforation of the specimen made of AMg6 (b) experimental scheme, 1 – the specimen, 2 – the mirror, 3 – the infrared camera (c); the perforated target, the ejected plug and deformed striker (d); the speed of hitting the target with a striker is 368 m/s. Maximum temperature ~300 °C

2. Структурный анализ

Соответствие теоретических предположений о ведущей роли многомасштабных механизмов структурной релаксации, обусловленных коллективным поведением ансамблей дефектов, развитием локализации пластического течения и разрушения, исследовалось методами структурного анализа морфологии поверхностного рельефа с использованием оптического интерферометра-профилометра NewView-5010 для последующего вычисления масштабного инварианта (показателя Хёрста) и пространственного масштаба области, на которой наблюдается коррелированное поведение микросдвигов. Определение показателя Хёрста деформационных дефектных структур может дать физическое объяснение

универсальности критических явлений применительно к сценариям разрушения различных классов материалов и роли состояния структуры (в том числе формируемой динамическими воздействиями) на «пороговые» характеристики перехода пластически деформированного материала к разрушению.

Поверхностный рельеф в области максимальных сдвиговых деформаций деформированных образцов (рис. 4) регистрировался с помощью интерферометра-профилометра высокого разрешения New View (при увеличении $\times 500$) и затем анализировался методами фрактального анализа для определения условий коррелированного поведения многомасштабных дефектных структур.

12 одномерных «срезов» анализировались в пределах каждого «окна» размером 284×213 мкм, обеспечи-

вая представительность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами, с вертикальным разрешением $\sim 0,1$ нм и горизонтальным $\sim 0,44$ мкм.

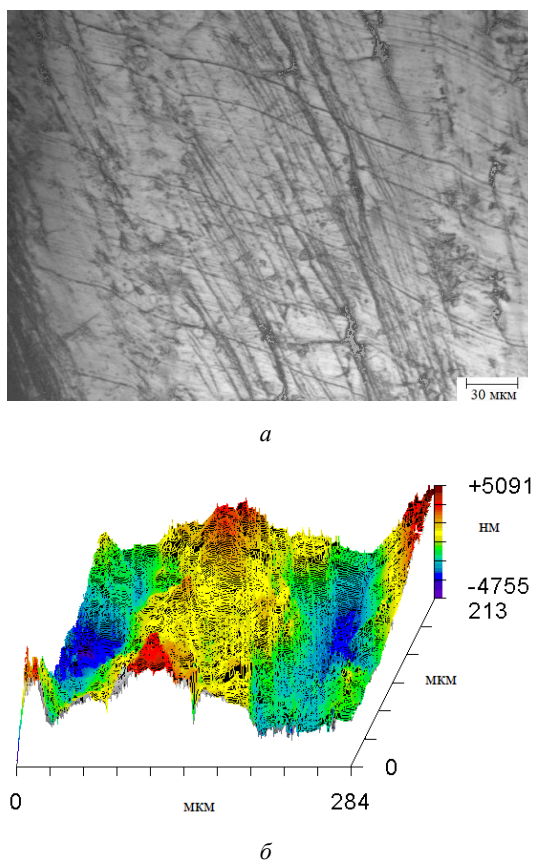


Рис. 4. Поверхность образца №6 после динамического нагружения: *a* – оптическое изображение; *b* – 3D-изображение
 Fig. 4. The surface of Specimen 6 after dynamic loading: *a* – an optical image, *b* – 3D image

По одномерным профилям рельефа поверхности разрушения (рис. 5) вычислялась функция $K(r)$ по формуле [39–41]

$$K(r) = \left\langle (z(x+r) - z(x))^2 \right\rangle_x^{1/2} \propto r^H,$$

где $K(r)$ представляет собой усредненную разность значений высот рельефа поверхности $z(x+r)$ и $z(x)$ на окне размером r ; H – показатель Хёрста.

Представление функции $K(r)$ в логарифмических координатах позволяет провести оценку показателя структурного скейлинга H (показателя Хёрста) как пространственного инварианта, определяемого постоянством наклона зависимости $\ln K(r)$ от $\ln(r)$.

Сравнительный анализ масштабнo-инвариантных характеристик динамически нагруженных образцов из сплава АМгб позволил установить значительное увеличение показателя Хёрста $H \sim 0,6$ в широком диапазоне пространственных масштабов (2,7–103,7 мкм) в отличие от недеформированных образцов ($H \sim 0,5$ в диапазоне пространственных масштабов (2,9–42,2 мкм). Более содержательные результаты могут быть связаны с из-

менением как нижнего масштаба, так и верхнего масштаба, что отражает более выраженные черты локализации деформации. Сами значения пространственных масштабов могут быть использованы для прогнозирования кинетики распространения трещин при высокоскоростном нагружении.

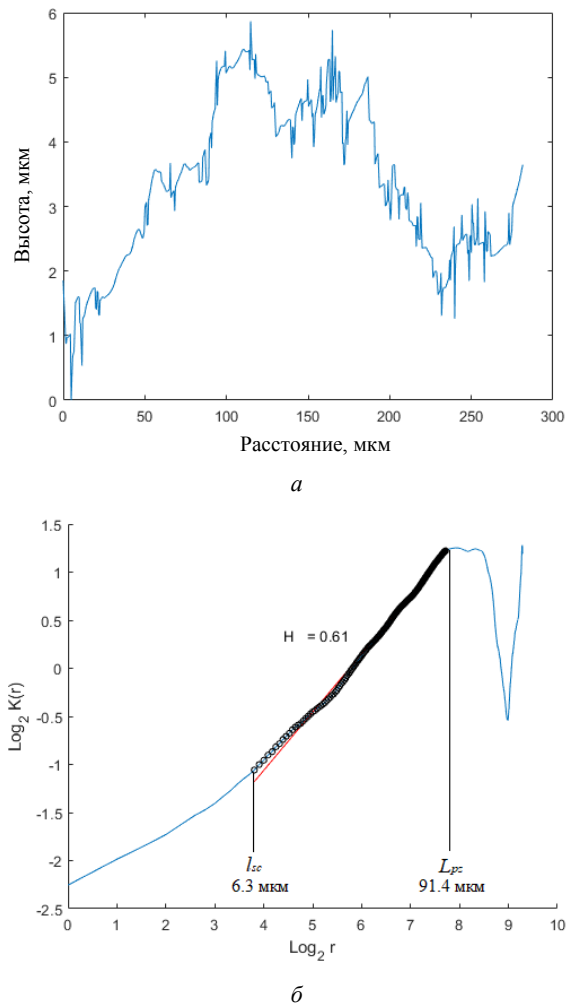


Рис. 5. Характерный одномерный профиль (*a*); вид зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2(r)$ для поверхности образца № 6 после деформирования (*b*)

Fig. 5. Typical forms of: *a* – the one-dimensional profile; *b* – the dependence of $\log_2 K(r)$ on $\log_2(r)$ for the surface of Specimen 6 after deformation

Выводы

Величины температурных полей, полученные при высокоскоростном деформировании образцов из сплава АМгб на стержне Гопкинсона–Кольского и при проби-вании преград с использованием инфракрасной термографии, исследование рельефа поверхности деформированных образцов с помощью оптического интерферометра-профилометра NewView-5010 с последующей обработкой 3D-данных деформационного рельефа, приведенные в данной статье, а также результаты числен-

ного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления мезодефектов в материале, изложенные в статьях [38,39] позволяют предполагать, что при реализованных условиях нагружения для сплава АМгб один из механизмов локализации пластической деформации при высокоскоростном нагружении обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материала.

Благодарности

Теоретические исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № АААА-А19-119013090021-5).

Библиографический список

1. Grady D.E., Kipp M.E. The growth of unstable thermo-plastic shear with application to steady-wave shock compression in solids // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1987. – Vol. 35, no. 1. – P. 95–119. DOI.org/10.1016/0022-5096(87)90030-5
2. Bai Y.L. Thermo-plastic instability in simple shear // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1982. – Vol. 30, no. 4. – P. 195–207. DOI.org/10.1016/0022-5096(82)90029-1
3. On critical conditions for shear band formation at high strain rates / Clifton R.J., Duffy J., Hartley K.A., Shawki T.G. // *Scripta Metall.* – 1984. – Vol. 18, no. 5. – P. 443–448. DOI.org/10.1016/0036-9748(84)90418-6
4. Molinari A. Instabilité thermoviscoplastique en cisaillement simple // *J. Mec. Theor. Appl.* – 1985. – Vol. 4, no. 5. – P. 659–684.
5. Molinari A. Shear band analysis // *Solid State Phenom.* – 1988. – Vol. 3-4. – P. 447–467.
6. Molinari A. Collective behavior and spacing of adiabatic shear bands // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1997. – Vol. 45, no. 9. – P. 1551–1575. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00012-4
7. Molinari A., Clifton R. Localisation de la déformation viscoplastique en cisaillement simple, résultats exacts en théorie non-linéaire // *C. R. Acad. Sci.* – 1983. – Vol. 2, no. 296. – P. 1–4.
8. Wright T.W. Shear band susceptibility: work hardening materials // *Int. J. Plast.* – 1992. – Vol. 8. – P. 583–602. DOI.org/10.1016/0749-6419(92)90032-8
9. Wright T.W., Ockendon H. A scaling law for the effect of inertia on the formation of adiabatic shear bands // *Int. J. Plast.* – 1996. – Vol. 12, no. 7. – P. 927–934. DOI.org/10.1016/S0749-6419(96)00034-4
10. Wright T.W., Walter J.W. On stress collapse in adiabatic shear bands // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1987. – Vol. 35, no. 6. – P. 701–720. DOI.org/10.1016/0022-5096(87)90051-2
11. Zhou F., Wright T.W., Ramesh K.T. 2006. The formation of multiple adiabatic shear bands // *J. Mech. Phys. Solids.* – 2006. – Vol. 54, no. 7. – P. 1376–1400. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.01.006
12. Yang Y., Zeng Y., Gao Z.W. Numerical and experimental studies of self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy // *Mater. Sci. Eng.* – 2008. – Vol. A 496. – P. 291–302.
13. McDowell D.L. A perspective on trends in multiscale plasticity // *Int. J. Plast.* – 2010. – Vol. 26, no. 9. – P. 1280–1309. DOI.org/10.1016/j.ijplas.2010.02.008
14. Austin R.A., McDowell D.L. A dislocation-based constitutive model for viscoplastic deformation of fcc metals at very

Экспериментальные исследования осуществлялись при частичной финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590009 р_а.

Acknowledgments

Theoretical studies were carried out within the framework of the state assignment of the PFIC UB RAS (topic No. АААА-А19-119013090021-5).

Experimental studies were carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Perm Territory within the framework of scientific project No. 19-48-590009 r_a.

high strain rates // *Int. J. Plast.* – 2011. – Vol. 27. – P. 1–24. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.03.002

15. An experimental and numerical study of the localization behavior of tantalum and stainless steel / C. Bronkhorst, E. Cerreta, Q. Xue, P. Maudlin, T., III, G.G. Mason // *Int. J. Plast.* – 2006. – Vol. 22, no. 7. – P. 1304–1335.

16. 2009. The influence of microstructure on the mechanical response of copper in shear / E. Cerreta, I. Frank, G. Gray, C. Trujillo, D. Korzekwa, L. Dougherty // *Mater. Sci. Eng.* – 2009. – Vol. A 501, no. 1-2. – P. 207–219.

17. Rittel D., Wang Z., Merzer M. Adiabatic shear failure and dynamic stored energy of cold work // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96. – P. 075502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.075502

18. Rittel D. A different viewpoint on adiabatic shear localization // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 42. – P. 214009. DOI: 10.1088/0022-3727/42/21/214009

19. On the dynamic character of localized failure / S. Osovski, Y. Nahmany, D. Ritte, P. Landau, A. Venkert // *Scripta Materialia.* – 2012. – Vol. 67, no. 7-8. – P. 693–695. DOI.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.001

20. Grady D.E. Properties of an adiabatic shear-band process zone // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1992. – Vol. 40, no. 6. – P. 1197–1215. DOI.org/10.1016/0022-5096(92)90012-Q

21. Grady D.E., Kipp M.E. The growth of unstable thermo-plastic shear with application to steady-wave shock compression in solids // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1987. – Vol. 35, no. 1. – P. 95–119. DOI.org/10.1016/0022-5096(87)90030-5

22. Nesterenko V.F., Meyers M.A., Wright T.W. Self-organization in the initiation of adiabatic shear bands // *Acta Mater.* – 1998. – Vol. 46, no. 1. – P. 327–340. DOI.org/10.1016/S1359-6454(97)00151-1

23. Nesterenko V.F., Xue Q., Meyers M.A. Self-organization of shear bands in Ti, Ti-6Al-4V, and 304 stainless steel // *J. Phys. IV 10 (Pr9).* – 2000. – P. 269–274. DOI: 10.1016/j.msea.2004.05.069

24. Xue Q., Meyers M.A., Nesterenko V.F. 2002. Self-organization of shear bands in titanium and Ti-6Al-4V alloy // *Acta Mater.* – 2002. – Vol. 50, no. 3. – P. 575–596. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00356-1

25. 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. – P. 251–283. DOI.org/10.1016/0022-5096(88)90012-9

26. Giovanola J.H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. Part I: direct observation of strain localization and energy dissipation measurements // *Mech. Mater.* – 1988. – Vol. 7, no. 1. – P. 59–71. DOI.org/10.1016/0167-6636(88)90006-3

27. Yang Y., Zeng Y., Gao Z.W. Numerical and experimental studies of self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy // *Mater. Sci. Eng.* – 2008. – Vol. A 496. – P. 291–302. DOI: 10.1016/j.msea.2008.07.043

28. Effect of orientation on self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy / Y. Yang, H.G. Zheng, Z.J. Shi, Q.M. Zhang // *Mater. Sci. Eng.* – 2011. – Vol. A 528. – P. 2446–2453. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.050

29. Mott N., Jones H. The theory of the properties of metals and alloys. Dover books on physics. – Dover Publications, 1958. – 326 p.

30. Batra R.C., Chen L. Effect of viscoplastic relations on the instability strain, shear band initiation strain, the strain corresponding to the minimum shear band spacing, and the band width in a thermoviscoplastic material // *Int. J. Plast.* – 2001. – Vol. 17. – P. 1465–1489. DOI:10.1016/S0749-6419(01)00004-3

31. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // *Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands. 19–21 April 1983.* – P. 541–547.

32. Daridon L., Oussouaddi O., Ahzi S. Influence of the material constitutive models on the adiabatic shear band spacing: MTS, Power Law and Johnson-Cook models // *Int. J. Solids Struct.* – 2004. – Vol. 41. – P. 3109–3124. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2004.01.008

33. Follansbee P.S., Kocks U.F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable // *Acta Metall.* – 1988 – Vol. 36, no. 1. – P. 81–93. DOI.org/10.1016/0001-6160(88)90030-2.

34. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // *Физическая мезомеханика.* – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45–72.

35. Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // *Advances in*

Multifield Theories of Continua with Substructure, Ed. G. Capriz and P. Mariano. – Birkhäuser, Boston, 2004. – P. 75–114.

36. Образец для испытания на сдвиг (варианты) и способ испытаний его: пат. 2482463 Рос. Федерация / Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Сокоиков 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.

37. Устройство для испытания материала на сдвиг и кручение при скорости деформации 10^2 – 10^5 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 Рос. Федерация / Наймарк О.Б., Сокоиков М.А., Плехов О.А., Уваров С.В., Чудинов В.В., Биалалов Д.А., Оборин В.А. № 2014146367/28; заявл. 18.11.2014; опубл. 20.05.2016. – Бюл. № 14.

38. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands / M. Sokovikov, D. Bilalov, V. Oborin, V. Chudinov, S. Uvarov, Y. Bayandin, O. Naimark // *Frattura ed Integrità Strutturale.* – 2016. – Vol. 10, no. 38. – P. 296–304. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.38.40

39. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу / Д.А. Биалалов, М.А. Сокоиков, В.В. Чудинов, В.А. Оборин, Ю.В. Баяндин, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103–112. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.1.9

40. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // *J. Phys. Condens. Matter.* – 1997. – Vol. 9, no. 21. – P. 4319–4344. DOI 10.1088/0953-8984/9/21/002

41. Multiscale study of fracture in aluminum-magnesium alloy under fatigue and dynamic loading / V.A. Oborin, M.A. Bannikov, O.B. Naimark, M.A. Sokovikov, D.A. Bilalov // *Frattura ed Integrità Strutturale.* – 2015. – Vol. 34. – P. 479–483. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.47

References

1. Grady D.E., Kipp M.E. The growth of unstable thermo-plastic shear with application to steady-wave shock compression in solids. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1987, vol. 35, no.1, pp. 95–119. DOI: 10.1016/0022-5096(87)90030-5

2. Bai Y. L. Thermo-plastic instability in simple shear. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1982, vol.30, no.4, pp.195-207. DOI: 10.1016/0022-5096(82)90029-1

3. Clifton R. J., Duffy J., Hartley K. A., Shawki T. G. On critical conditions for shear band formation at high strain rates. *Scripta Metall.*, 1984, vol.18, no.5, pp.443-448. DOI: 10.1016/0036-9748(84)90418-6

4. Molinari A. Instabilité thermoviscoplastique en cisaillement simple. *J. Mec. Theor. Appl.*, 1985, vol.4, no.5, pp.659-684.

5. Molinari A. Shear band analysis. *Solid State Phenom.*, 1988, vol.3-4, pp.447-467.

6. Molinari A. Collective behavior and spacing of adiabatic shear bands. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1997, vol.45, no.9, pp.1551-1575. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00012-4

7. Molinari A., Clifton R. Localisation de la déformation viscoplastique en cisaillement simple, résultats exacts en théorie non-linéaire. *C. R. Acad. Sci.*, 1983, vol.2, no.296, pp.1-4.

8. Wright T. W. Shear band susceptibility: work hardening materials. *Int. J. Plast.*, 1992, vol.8, pp.583-602. DOI: 10.1016/0749-6419(92)90032.

9. Wright T. W., Ockendon H. A scaling law for the effect of inertia on the formation of adiabatic shear bands. *Int. J. Plast.*, 1996, vol.12, no.7, pp.927-934. DOI: 10.1016/S0749-6419(96)00034-4

10. Wright T. W., Walter J. W. On stress collapse in adiabatic shear bands. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1987, vol. 35, no.6, pp.701-720. DOI: 10.1016/0022-5096(87)90051-2

11. Zhou F., Wright T. W., Ramesh K. T. The formation of multiple adiabatic shear bands. *J. Mech. Phys. Solids.*, 2006, vol.54, no7, pp.1376-1400. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.01.006

12. Yang Y., Zeng Y., Gao Z. W. Numerical and experimental studies of self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng.*, 2008, vol. A 496, pp. 291–302.

13. McDowell D. L. A perspective on trends in multiscale plasticity. *Int. J. Plast.*, 2010, vol.26, no.9, pp.1280–1309. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.02.008
14. Austin R. A., McDowell D. L. A dislocation-based constitutive model for viscoplastic deformation of fcc metals at very high strain rates. *Int. J. Plast.*, 2011, vol. 27, pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.ijplas.2010.03.002
15. Bronkhorst C., Cerreta E., Xue Q., Maudlin P., Mason T., III, G. G. An experimental and numerical study of the localization behavior of tantalum and stainless steel. *Int. J. Plast.*, 2006, vol. 22, no.7, pp. 1304-1335.
16. Cerreta E., Frank I., Gray G., Trujillo C., Korzekwa D., Dougherty L. The influence of microstructure on the mechanical response of copper in shear. *Mater. Sci. Eng.*, 2009, vol.A 501, no.1-2, pp. 207-219.
17. Rittel D., Wang Z., Merzer M. Adiabatic Shear Failure and Dynamic Stored Energy of Cold Work. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol.96, pp.075502. DOI:10.1103/PhysRevLett.96.075502.
18. Rittel D. A different viewpoint on adiabatic shear localization. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, vol.42, pp.214009. doi:10.1088/0022-3727/42/21/214009
19. Osovski S., Nahmany Y., Ritte, D., Landau P., Venkert A. On the dynamic character of localized failure. *Scripta Materiala*, 2012. vol. 67, no 7-8, pp. 693-695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.07.001>
20. Grady D. E. Properties of an adiabatic shear-band process zone. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1992, vol.40, no.6, pp. 1197-1215. DOI: 10.1016/0022-5096(92)90012-Q
21. Grady D. E., Kipp M. E. The growth of unstable thermo-plastic shear with application to steady-wave shock compression in solids. *J. Mech. Phys. Solids.*, 1987, vol.35, no.1, pp. 95-119. DOI: 10.1016/0022-5096(87)90030-5
22. Nesterenko V. F., Meyers M. A., Wright T. W. Self-organization in the initiation of adiabatic shear bands. *Acta Mater.*, 1998, vol.46, no.1, pp. 327-340. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00151-1
23. Nesterenko V.F., Xue Q., Meyers M.A. Self-organization of shear bands in Ti, Ti-6Al-4V, and 304 stainless steel. *J. Phys. IV 10 (Pr9)*, 2000, pp. 269-274. DOI:10.1016/j.msea.2004.05.069
24. Xue Q., Meyers M. A., Nesterenko V. F. Self-organization of shear bands in titanium and Ti-6Al-4V alloy. *Acta Mater.*, 2002, vol.50, no.3, pp. 575-596. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00356-1
25. 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. DOI: 10.1016/0022-5096(88)90012-9
26. Giovanola J. H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. Part I: direct observation of strain localization and energy dissipation measurements. *Mech. Mater.*, 1988, vol.7, no.1, pp.59-71. DOI: 10.1016/0167-6636(88)90006-3.
27. Yang Y., Zeng Y., Gao Z. W. Numerical and experimental studies of self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng.*, 2008, vol. A 496, pp. 291-302. DOI: 10.1016/j.msea.2008.07.043
28. Yang Y., Zheng H. G., Shi Z. J., Zhang Q. M. Effect of orientation on self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng.*, 2011, vol.A 528, pp. 2446-2453. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.050
29. Mott N., Jones H. *The theory of the properties of metals and alloys*. Dover books on physics. *Dover Publications*, 1958. 326 p.
30. Batra R. C., Chen L. Effect of viscoplastic relations on the instability strain, shear band initiation strain, the strain corresponding to the minimum shear band spacing, and the band width in a thermoviscoplastic material. *Int. J. Plast.*, 2001, vol.17, pp. 1465-1489. DOI:10.1016/S0749-6419(01)00004-3
31. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics*. The Hague, Netherlands. 19 – 21 April 1983, 1983, pp. 541-547.
32. Daridon L., Oussouaddi O., Ahzi S. Influence of the material constitutive models on the adiabatic shear band spacing: MTS, Power Law and Johnson-Cook models. *Int. J. Solids Struct.*, 2004, vol.41, pp. 3109-3124. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2004.01.008
33. Follansbee P. S., Kocks U. F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable. *Acta Metall.*, 1988, vol.36, no.1, pp.81-93. DOI: 10.1016/0001-6160(88)90030-2.
34. Naimark O.B. Collective properties of defects ensembles and some nonlinear problems of plasticity and fracture. *Physical mesomechanic*, 2003, vol. 6, no. 4, pp. 39-63.
35. Naimark O.B. Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua. *Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure*, Ed. G. Capriz and P. Mariano, *Birkhäuser, Boston*, 2004, pp.75-114.
36. 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. RF Patent No 2011,114,711/28, *Byull. Izobret.*, 20 May 2013.
37. Device for testing material for shearing and twisting at deformation rate 102-105 c-1, method of determining dependence of maximum tangential stress of shear deformation in sample material in form of solid cylindrical rod and method of determining dependence of voltage from shear deformation in sample material in form of thin-walled cylindrical tube using said device. RF Patent No 2014,146,367/28, *Byull. Izobret.*, 20 May 2016.
38. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands. *Frattura ed Integrità Strutturale – Fracture and Structural Integrity*, 2016, vol. 10, no 38, pp. 296-304. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.38.40
39. 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. DOI: 10.1134/S0021894418070027
40. Bouchaud E. Scaling properties of cracks. *J. Phys. Condens. Matter.*, 1997, vol 9, no.21, pp. 4319- 4344. DOI: 10.1088/0953-8984/9/21/002
41. Oborin V.A., Bannikov M.A., Naimark O.B., Sokovikov M.A., Bilalov D.A. Multiscale study of fracture in aluminum-magnesium alloy under fatigue and dynamic loading. *Frattura ed Integrità Strutturale- Fracture and Structural Integrity*, 2015, vol.34, pp.422-426. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.47