

УДК 539.42:620.172.254

**М.А. Соковиков¹, В.В. Чудинов¹, С.В. Уваров¹,
О.А. Плехов¹, Е.А. Ляпунова¹, А.Н. Петрова², Ю.В. Баяндин¹,
О.Б. Наймарк¹, И.Г. Бродова²**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия,

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА
И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ
СТРУКТУРНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ
В СИСТЕМЕ МЕЗОДЕФЕКТОВ**

Исследовалось поведение образцов в режиме, близком к чистому сдвигу при динамическом нагружении на стержне Гопкисона – Кольского. Для этого были разработаны образцы специальной формы и оснастка, обеспечивающие реализацию плоского деформированное состояния. В режиме реального времени боковая поверхность образцов исследовалась с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M (чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек). Полученное распределение температурного поля в различные моменты времени позволило судить о развитии процесса локализации пластической деформации. Проведено изучение пробивания преграды в виде формирования и выноса пробки с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры и системы измерения скорости VISAR. На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания были исследованы образцы, для которых были реализованы различные режимы импульсного нагружения, сопровождающиеся неустойчивостью пластического течения и выносом пробки. Сохраненные после эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа с последующей обработкой 3D-данных деформационного рельефа, что позволило получить оценку распределений градиентов пластической деформации в различные моменты времени при формировании и выносе пробки. В областях локализации деформации субзерна вытягиваются в полосы и фрагментируются, образуя ультрамикроструктурную структуру с размером зерен ~300 нм. За счет ротационных мод деформации возникают высокоугловые разориентировки зерен. Проведено численное моделирование появления областей неустойчивости пластического сдвига. Для этого использовалась ранее разработанная теория, в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на деформационные свойства материалов.

Ключевые слова: неустойчивость и локализация пластической деформации, динамическое нагружение, неравновесные переходы, микросдвиги.

**M.A. Sokovikov¹, V.V. Chudinov¹, S.V. Uvarov¹, O.A. Plekhov¹,
E.A. Lyapunova¹, A.N. Petrova¹, J.V. Bayandin¹,
O.B. Naimark¹, I.G. Brodova²**

¹Institute of Continuous Media Mechanics UB PAC, Perm, Russian Federation

²Institute of Metal Physics UB PAC, Ekaterinburg, Russian Federation

**INSTABILITY OF PLASTIC SHEAR AND PLASTIC
DEFORMATION LOCALIZATION CAUSED BY STRUCTURAL
KINETIC TRANSITIONS IN MEZODEFECT ENSEMBLES
UNDER DYNAMIC LOADING CONDITIONS**

We study the behavior of samples in the regime close to a pure shear using a Hopkinson-Kolsky bar to apply a dynamic load. For the purpose of our investigation, special-shaped samples and appropriate test rig were developed to realize a plane strain state. The lateral surface of the samples was investigated in a real-time mode using a high-speed infra-red camera CEDIP Silver 450M with sensitivity ~25 mK (at 300 K), spectral range 3–5 μm , and maximum frame size 320×240 pixels. The temperature field distribution obtained at different moments of time allowed us to trace the evolution of plastic strain localization. The process of perforation of a target involving plug formation and ejection at impact velocities of 101–260 m/c was investigated using a high-speed infra-red camera and a VISAR velocity interferometer system. The original ballistic set-up for studying perforation was used to test samples in different impulse loading regimes followed by plastic flow instability and plug ejection. The microstructure analysis of the recovered samples was performed using an optical interferometer-profilometer and a scanning electron microscope. Processing of 3D-data obtained for the deformation relief at different time of plug ejection provided plastic strain gradient distribution estimates. In the regions of strain localization, subgrains are highly elongated and fragmented providing the formation of ultramicrocrystalline structure with grain size ~300 nm. Due to rotational modes, the high-angle grain boundaries occur. The appearance of plastic shear instability regions is simulated numerically. To this end, a recently developed theory is used, in which the influence of microshears on the deformation behavior of the material is investigated by the methods of statistical physics and thermodynamics of irreversible processes.

Keywords: instability and localization of plastic strain, dynamic loading, non-equilibrium transitions, micro-shears.

К числу основных гипотез, объясняющих неустойчивость пластического сдвига и тесно связанного с ней явления локализации пластической деформации, относятся предположения о разупрочнении материала, обусловленном влиянием: а) скорости деформации; б) деформации; в) температуры вследствие диссипации энергии; г) структурных изменений. Исследованию данного явления посвящен также цикл работ по анализу устойчивости решений систем дифференциальных уравнений с использованием модельных определяющих соотношений.

Влиянию всех этих факторов посвящено значительное количество работ [1–14].

Значительное внимание вопросам неустойчивости и локализации пластической деформации уделено в работах научного направления, возглавляемого академиком В.Е. Паниным [15–17], где развивается представление о деформируемом твердом теле как о многоуровневой системе, в которой пластическое течение развивается как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях: микро, мезо и макро.

Длительное время доминирующим объяснением механизма неустойчивости и локализации пластической деформации при высоких скоростях нагружения было представление о термопластической неустойчивости [10, 11]. Предполагалось, что тепло, выделяемое в процессе пластической деформации, за малые характерные времена не успевает отводиться, что приводит к термическому разупрочнению и дальнейшему росту пластической деформации. Реализуется лавинообразный процесс, приводящий к скачкообразному росту температур в области локализации пластической деформации. Предполагалось, что температуры могут достигать высоких значений, даже температур плавления материала. Экспериментальные исследования микроструктуры полос адиабатического сдвига, проведенные в ряде работ, в частности [1], указывают на то, что одним из механизмов формирования полос пластического сдвига являются множественные многомасштабные неустойчивости в системе микросдвигов (дефектов мезоуровня), имеющих следствием пластические ротации и изменение ориентации зерен в узких полосах сдвига.

Изучались неустойчивость и локализация пластической деформации пластического деформирования при динамическом нагружении. Для теоретического анализа использовалась ранее разработанная теория, в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на пластические свойства твердых тел [18, 19].

Для изучения поведения материалов в условиях, близких к чистому сдвигу, в условиях динамического нагружения использовался разрезной стержень Гопкинсона–Кольского. В процессе динамического деформирования производилось исследование распределения пла-

стических деформаций использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M на боковой поверхности образца (рис. 1).

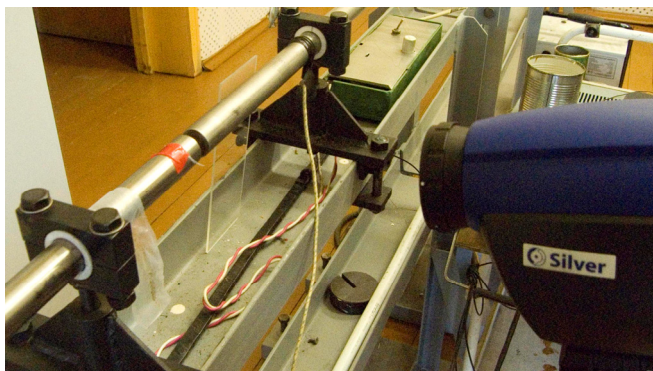


Рис. 1. Разрезной стержень Гопкинсона с установленной инфракрасной камерой

Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек. Для изучения материала в условиях близких к чистому сдвигу, были разработаны образцы специальной формы (рис. 2). Образцы изготавливались из сплава Д16. Выбранная форма образца обусловлена необходимостью иметь плоскую боковую поверхность для исследования распределений пластической деформации методом инфракрасного сканирования. Схема испытаний представлена на рис. 3.

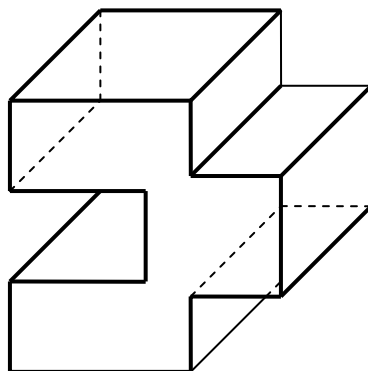


Рис. 2. Образец специальной формы для испытаний в условиях, близких к чистому сдвигу

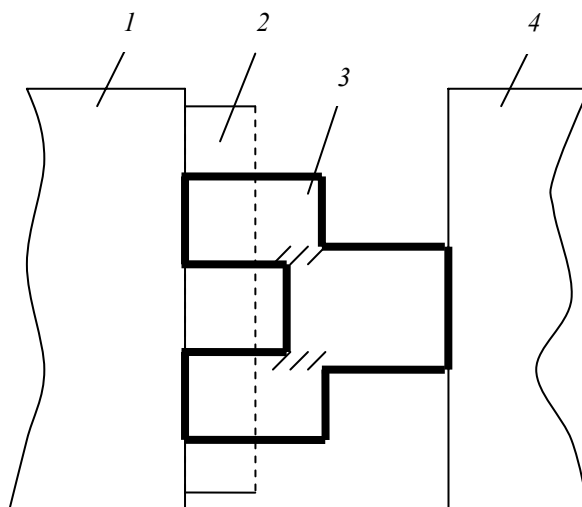


Рис. 3. Схема нагружения образца на стержне Гопкинсона–Кольского: 1 – входной стержень; 2 – рамка; 3 – образец; 4 – выходной стержень (заштрихованные области находятся в состоянии, близком к чистому сдвигу)

В результате проведения тестовых испытаний образцов на чистый сдвиг получены поля пластических деформаций *in situ* в процессе деформирования (рис. 4, 5).

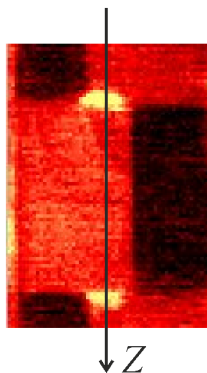


Рис. 4. Инфракрасное изображение образца в процессе деформирования

Исследования процесса деформирования на стержне Гопкинсона–Кольского с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают ~ 250 °С.

Изучение поверхности разрушения образцов с помощью просвечивающего электронного микроскопа показало, что в областях локализации произошло образование участков полосовой структуры и ячеистой структуры в деформированном слое (рис. 6).

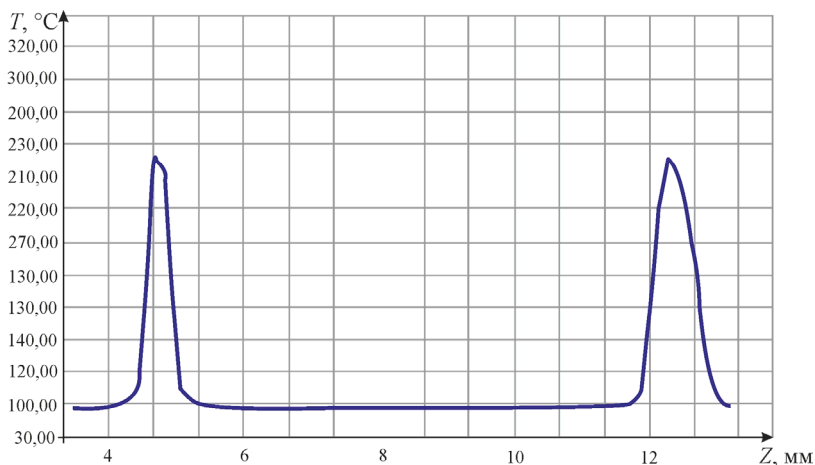


Рис. 5. Распределение температуры по координате перпендикулярно области сдвига

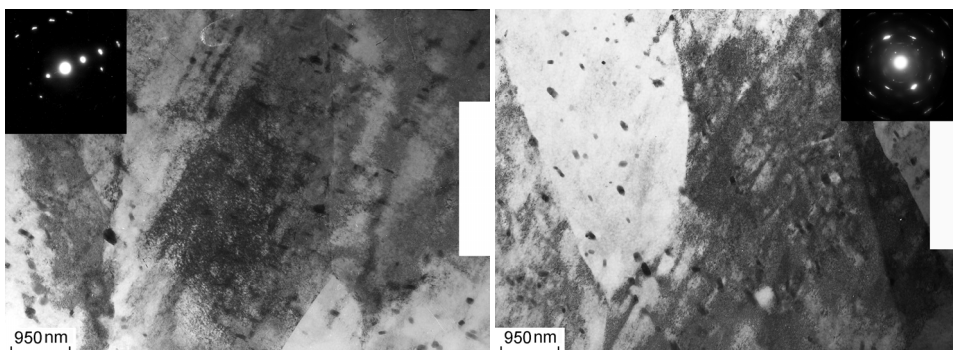


Рис. 6. Развитие полосовой структуры и ячеистой структуры в деформированном слое

Исследования процесса деформирования на стержне Гопкинсона–Кольского с помощью инфракрасной камеры и микроструктурные исследования позволяют сделать вывод о возможности реализации механизма локализации пластической деформации, не связанного с термомпластической неустойчивостью при данном режиме нагружения.

Резкий переход к более упорядоченной дефектной структуре часто приводит к аномалиям деформационных свойств, которые могут проявиться, в частности, при высокоскоростном соударении ударника с преградой (выбивание пробки) [20–25].

На установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из алюминиевого сплава марки 6061.

Установка для высокоскоростного пробивания образцов (рис. 7, 8) смонтирована на раме 7 и состоит из камеры высокого давления 1, ствола 2, системы измерения скорости ударника 3, устройство 8 для крепления мишени 9 с отсекателем 6, приемной камеры 10 и улавливателя 11.

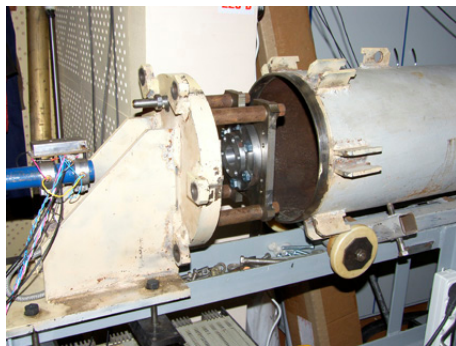


Рис. 7. Установка для испытания образцов на пробивание

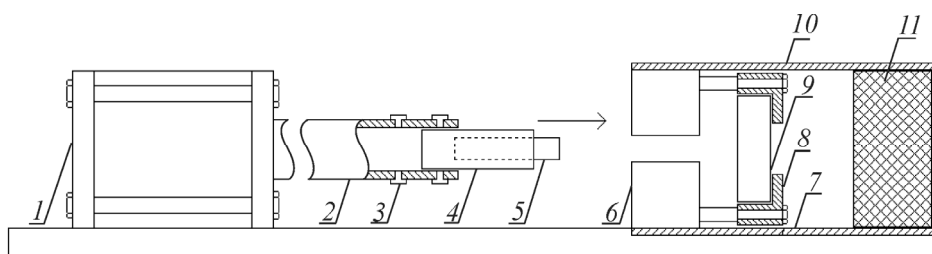


Рис. 8. Схема установки для испытания образцов на пробивание: 1 – камера высокого давления; 2 – ствол; 3 – фотодатчики; 4 – поддон; 5 – ударник; 6 – отсекатель; 7 – рама; 8 – устройство для крепления мишени; 9 – мишень; 10 – приемная камера; 11 – улавливатель

Для разгона ударника в стволе используется эбонитовый поддон, внешний диаметр которого соответствует калибру ствола. Для создания воздушной прослойки с целью уменьшения трения поддона при движении в стволе были сделаны специальные канавки. В качестве ударника использовался стержень из высокоуглеродистой стали диаметром 5 мм, длиной 50 мм и массой 7,4 г.

Скорость ударника задается давлением воздуха в камере и длиной разгона ударника. Выстрел происходит путем открытия в воздушной камере специального клапана. Скорость поддона с ударником оп-

ределяется измерением времени пролёта между двумя фотодатчиками. Перед мишенью установлен отсекающий диск, внутренний диаметр которого меньше внешнего диаметра поддона, но больше диаметра ударника. При соударении с отсекающим диском поддон тормозится и разрушается, а ударник продолжает движение до соударения с мишенью.

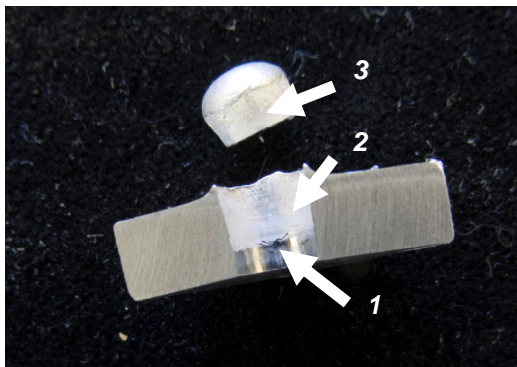


Рис. 9. Внешний вид поверхности разрушения и пробки. Зеркальная и шероховатая поверхности разрушения на образце обозначены цифрами 1 и 2 соответственно; пробка – 3

При высокоскоростном взаимодействии ударника с мишенью реализуется разрушение в виде формирования и выноса пробки. Распиленный по диаметру образец и выбитая пробка показаны на рис. 9. Продолжающие движение после пробивания преграды ударник и пробка улавливаются приемной камерой с помощью мягкого наполнителя, не искажающего форму пробки.

Для исследования распределения пластических деформаций в процессе формирования и выноса пробки использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. Схема эксперимента приведена на рис. 10.

На рис. 11 представлено изображение в инфракрасных лучах отверстия после пробивания и летящей пробки. Скорость налета ударника на преграду 120 м/с. Максимальная температура по периметру отверстия 62 °С.

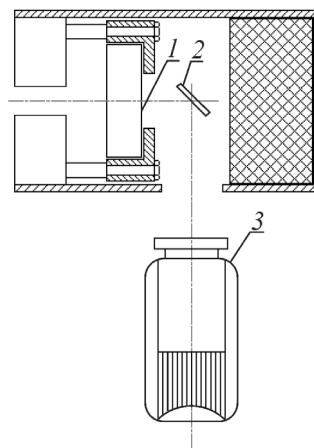


Рис. 10. Схема эксперимента:
1 – образец; 2 – зеркало;
3 – инфракрасная камера

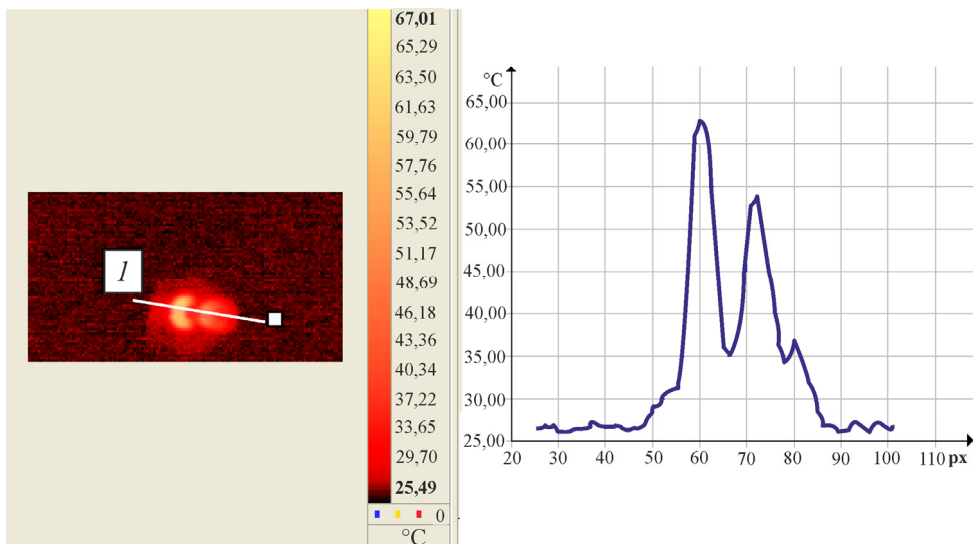


Рис. 11. Инфракрасный образ отверстия после пробивания и летящей пробки и поле температур в этих областях

На рис. 12 представлено инфракрасное изображение тыльной поверхности мишени при формировании пробки.

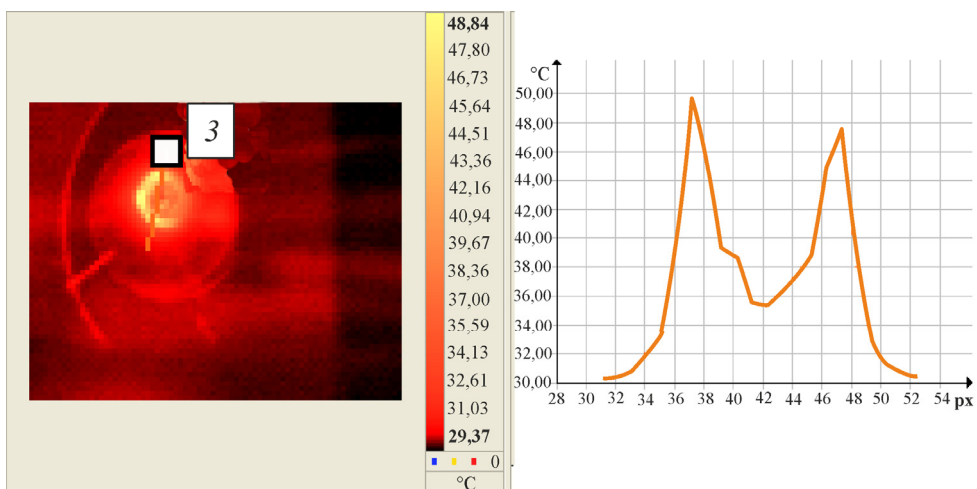


Рис. 12. Инфракрасный образ тыльной поверхности мишени при формировании пробки и поле температур в этой области

Исследования процесса пробивания преград с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени указывают на то, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают ~ 100 °C, что позволяет сделать вывод о возможно-

сти реализации механизма формирования и выноса пробки, не связанных с термопластической неустойчивостью.

Изучался процесс формирования и выноса пробки при пробивании с использованием лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR, схема эксперимента приведена на рис. 13.

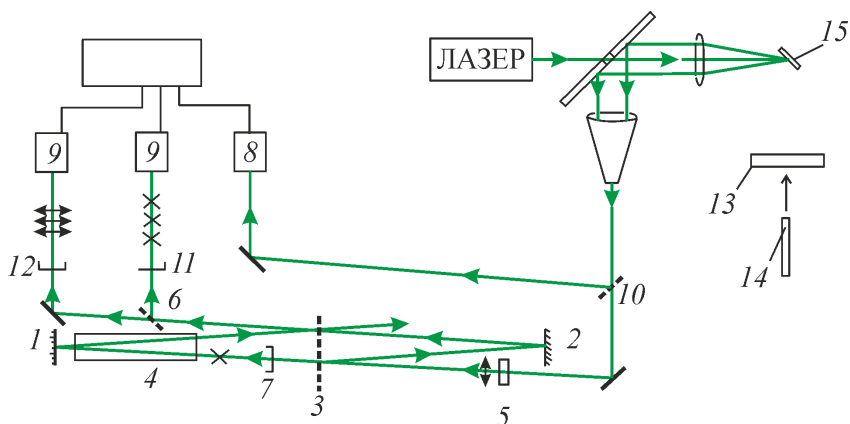


Рис. 13. Схема регистрации волновых профилей лазерным доплеровским измерителем скорости: 1, 2 – 100%-ные концевые зеркала; 3, 6, 10 – 50%-ный светоделитель; 4 – стеклянная линия задержки; 5, 11, 12 – поляризаторы; 7 – четвертьволновая пластинка; 8 – фотоприемник контроля интенсивности; 9 – фотоприемники выходного излучения; 13 – мишень; 14 – ударник; 15 – зеркало

В результате были получены зависимости скорости свободной поверхности от времени в месте формирования и выноса пробки (рис. 14).

На установке по исследованию пробивания были нагружены образцы из алюминия марки 6061. После эксперимента сохраненные образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического микроскопа-интерферометра NewView-5000 и сканирующего электронного микроскопа.

При скоростях соударения 101–103 м/с энергия удара была недостаточной для выбивания пробки из образца, однако наблюдалось образование магистральной трещины у концентраторов напряжений по образующей цилиндрического ударника (рис. 15). Условия для формирования и выноса пробки осуществлялись при скоростях ударника свыше 112 м/с.

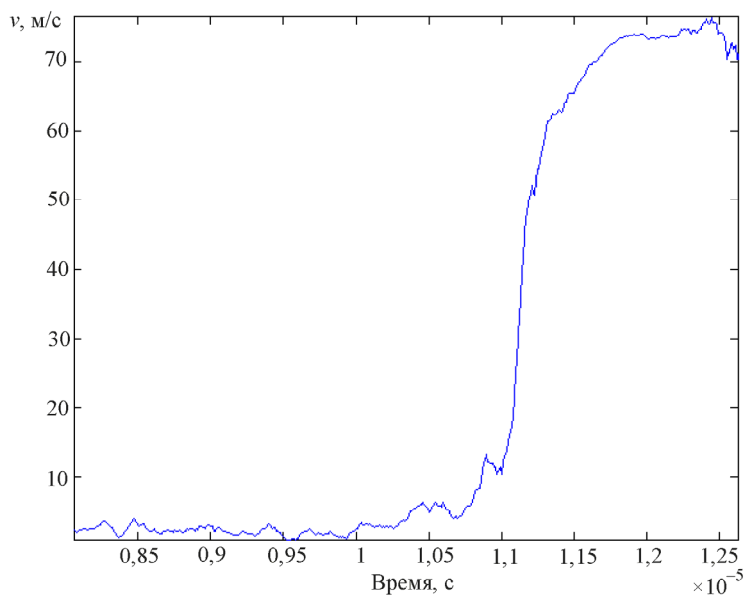


Рис. 14. Зависимость скорости свободной поверхности от времени в области формирования пробки при пробивании образца

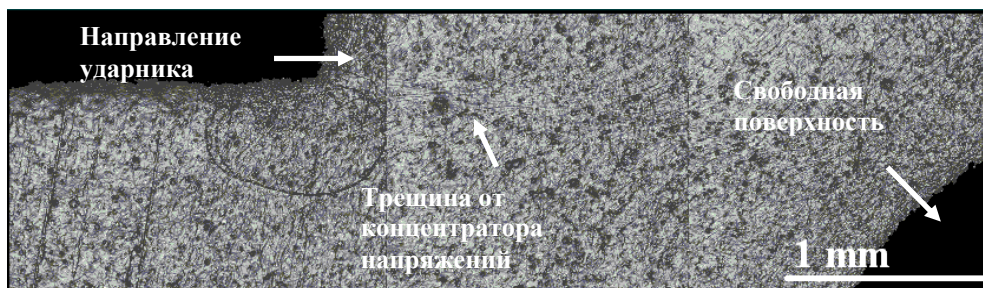


Рис. 15. Образование трещины у концентратора напряжений

Обнаружено, что для зоны первоначального проникновения ударника в образец, соответствующей зеркальной, гладкой поверхности разрушения, наблюдается относительно равномерное распределение деформации, тогда как при формировании и выносе пробки это распределение становится существенно неоднородным по радиусу образца. Имеет место локализация пластической деформации в узкой области по образующей пробки. По мере продвижения пробки происходит как огрубление рельефа поверхности разрушения, так и увеличение локальных неоднородностей сдвиговых деформаций вследствие

искажений внутренней структуры. При этом на зеркальной поверхности контакта наблюдаются частицы ударника (железо) и бороздки, обусловленные трением грубоотполированной поверхности ударника о материал.

Изучение шероховатой зоны с помощью сканирующего электронного микроскопа показало наличие двух областей с различной морфологией поверхности: однородной в центральной части образца и более грубой вблизи тыльной поверхности (рис. 16). Сравнительно однородная шероховатая область, следующая за зеркальной поверхностью, соответствует сдвиговым механизмам деформирования материала с последующим огрублением деформационных структур (рис. 16, б).

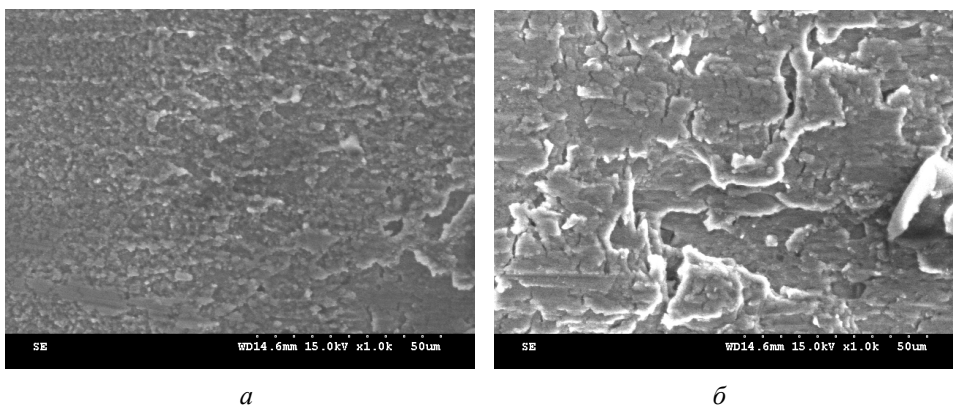


Рис. 16. Рельеф шероховатой поверхности, отвечающей сдвигу пробки в образце:
а – шероховатая область вблизи зеркального участка; б – шероховатая область
вдали от зеркальной поверхности

Изучение поверхности разрушения с помощью просвечивающего электронного микроскопа показало, что в областях локализации деформации субзерна вытягиваются в полосы и фрагментируются, образуя ультрамикроструктурную структуру с размером зерен ~ 300 нм. За счет ротационных мод деформации возникают высокоугловые разориентировки зерен.

Результаты микроструктурных исследований указывают на существенную роль в процессах локализации пластической деформации многомасштабных процессов неустойчивости в системах микросдвигов.

Результаты микроструктурных исследований указывают на существенную роль в процессах локализации пластической деформации многомасштабных процессов неустойчивости в системах микросдвигов.

В данном исследовании проведено численное моделирование механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации (в квазиодномерной постановке) с учетом особенностей кинетики накопления микросдвигов в материале.

Было рассмотрено деформирование плоского слоя в условиях чистого сдвига. Одна сторона слоя жестко закреплена. На другой стороне слоя задается постоянная скорость v_0 (рис. 17).

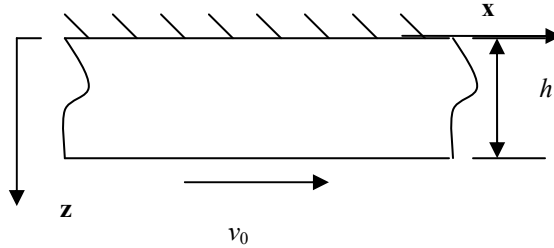


Рис. 17. Схема нагружения

Поведение плоского слоя с учетом кинетики накопления микросдвигов в материале описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\rho_0}{V} \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\tau_{xz} = l_1 \dot{\varepsilon}_{xz}^p - l_2 \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{l_2}{l_3} \dot{\varepsilon}_{xz}^p - \frac{1}{l_3} \Pi, \quad (3)$$

$$\Pi = -A_1 \tau_{xz} \exp(-p_a / p) + B_1 (p - p_b) - D_1 \frac{\partial}{\partial z} \left(p \frac{\partial p}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где l_1, l_2, l_3 – кинетические коэффициенты; A_1, B_1, p_a, p_b – параметры аппроксимации; p_z – компонента тензора плотности микросдвигов.

Использовались начальные и граничные условия

$$\tau_{xz}(z, 0) = 0; \quad v_z(z, 0) = 0; \quad v_x(0, t) = 0; \quad v_x(h, t) = v_0, \quad (5)$$

$$p(z, 0) = p_0 \sin^8(\pi z); \quad \frac{\partial p}{\partial z}(0, t) = \frac{\partial p}{\partial z}(h, t) = 0. \quad (6)$$

Неоднородное пластическое течение слоя и дальнейшая локализация пластической деформации инициируются начальным неоднородным распределением тензора плотности микродвигов.

Принималось условие аддитивности упругих и пластических скоростей деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{xz} = \dot{\varepsilon}_{xz}^e + \dot{\varepsilon}_{xz}^p. \quad (7)$$

Поведение материала слоя описывалось уравнением

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = G \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \dot{\varepsilon}_{xz}^p \right), \quad (8)$$

где G – модуль сдвига.

При численном решении системы уравнений (1)–(8) использовалась явная конечно-разностная схема второго порядка точности.

В процессе высокоскоростного деформирования в материале происходит структурно-кинетический переход по параметру плотности микродвигов в локальной области, характеризующийся быстрым ростом параметра плотности микродвигов (рис. 18), что приводит к резкому скачкообразному изменению эффективных характеристик среды, в частности к резкому падению эффективной вязкости, и, как следствие, к резкому росту скоростей пластических деформаций и релаксации напряжений и падению сопротивления сдвига в этой области (рис. 19).

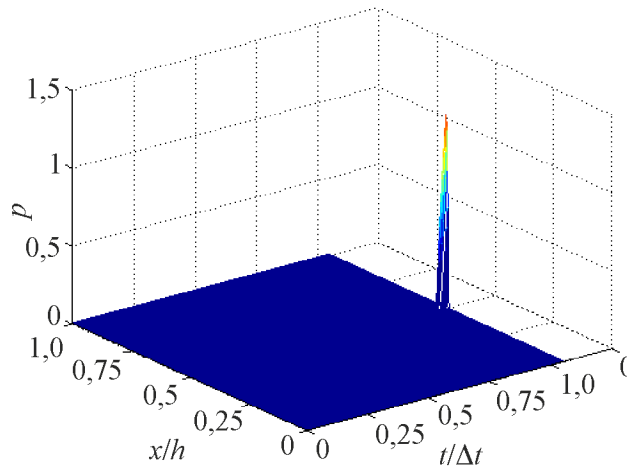


Рис. 18. Распределение параметра плотности микродвигов

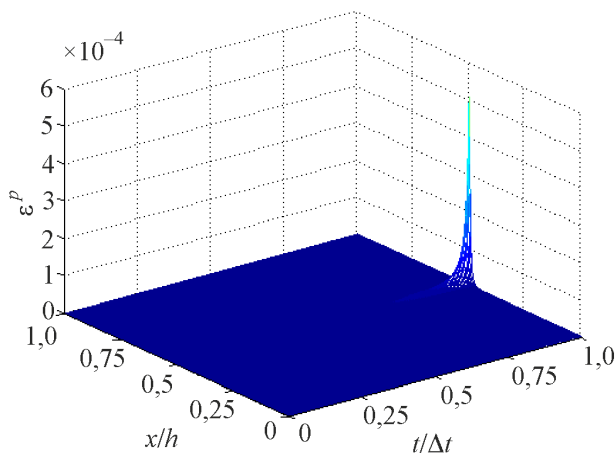


Рис. 19. Распределение скорости пластической деформации $\dot{\epsilon}_p$

Модель упруго-пластического поведения материала с учетом кинетики накопления микросдвигов описывает процессы неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации.

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предположить, что один из механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при динамическом нагружении обусловлен структурно-кинетическими переходами в ансамблях микросдвигов.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы РАН № 12-П-2-1009, грантов РФФИ 11-01-00712_a, 11-01-00153_a.

Библиографический список

1. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burblied A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 175–193.
2. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 261–272.
3. Nemat-Nasser S., Li Y.-F., Isaacs J.B. Experimental computational evolution of flow stress at high strain rates with application to adiabatic shear banding // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 111–134.

4. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of microstructure and shear-band formation in α -hcp titanium // *Mechanics of Material*. – 1994. – No. 17. – P. 175–193.

5. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1987. – Vol. 35, no. 2. – P. 185–211.

6. Frassengeas C., Molinari A. The time development of eulerian/lagrangian perturbations to simple shear and its applications to shear banding // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1992. – Vol. 40, no. 8. – P. 1735–1756.

7. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 83–96.

8. Mgbokwere C.O., Nutt S.R., Duffy J. Shear band formation in 4340 steel: A TEM study // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 97–100.

9. Yilong Bai, Qing Xue, Letian Shen. Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy // *Mechanics of Materials*. – 1994. – No. 17. – P. 155–164.

10. Grady D.E. Dynamic of adiabatic shear // *Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Journal de Physique III*. – 1991. – Vol. 1, october. – P. 653–660.

11. Коффи К.С., Армстронг Р.В. Образование областей перегрева при ударном нагружении // *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов*. – М.: Металлургия, 1984 – С. 67–89.

12. Роджерс Х.К., Шастри Н.В. Структурные изменения в сталях при адиабатическом сдвиге // *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов*. – М.: Металлургия, 1984. – С. 301–309.

13. Локализация пластической деформации при скоростном ударном деформировании алюминия и сплава АМ6 / В.В. Астанин, Г.Н. Надеждин, Ю.Н. Петров [и др.] // *Проблемы прочности*. – 1987. – № 3. – С. 81–86.

14. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластического течения в кристаллах. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1994. – 301 с.

15. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.

16. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – 225 с.

17. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в 2 т. / под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – 297 с.

18. Naimark O.B. Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture // Proceedings IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Cambridge, United Kingdom, September 3–7, 1995, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996, J.R. Willis Eds. – P. 285–298.

19. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 6. – С. 45–72.

20. Jonas G.H., Zukas J.A. Mechanics of penetration: analysis and experiments // Int. J. Eng. Sci. – 1978. – No. 11. – P. 879–900.

21. Соковиков М.А. Неустойчивость пластического сдвига при ударном нагружении как результат кинетических переходов в системе микросдвигов // Вычислительная механика: сб. науч. тр. – Пермь, 2003. – № 1. – С. 87–94.

22. Соковиков М.А. Численное исследование неустойчивости пластического сдвига при динамическом нагружении // Математическое моделирование систем и процессов: сб. науч. тр. – 2004. – № 12. – С. 82–88.

23. Соковиков М.А. Численное моделирование неустойчивости пластического сдвига в плоской волне сжатия // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Прикладная математика и механика: сб. науч. тр. – Пермь, 2004. – № 1. – С. 28–36.

24. Соковиков М.А. Автомодельность неустойчивости пластического сдвига при ударном нагружении как результат кинетических переходов в системе микросдвигов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. 1. – С. 332–335.

25. Соковиков М.А. Численное исследование неустойчивости пластического сдвига при высокоскоростном ударе // Деформация и разрушение материалов. – 2005. № 7. – С. 13–17.

References

1. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burchies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 175-193.

2. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 261-272.
3. Nemat-Nasser S., Li Y.-F., Isaacs J.B. Experimental computational evolution of flow stress at high strain rates with application to adiabatic shear banding. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 111-134.
4. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of microstructure and shear-band formation in α -hcp titanium. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 175-193.
5. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates. *J. Mech. Phys. Solids*, 1987, vol. 35, no. 2, pp. 185-211.
6. Frassengeas C., Molinari A. The time development of eulerian/lagrangian perturbations to simple shear and its applications to shear banding. *J. Mech. Phys. Solids*, 1992, vol. 40, no. 8, pp. 1735-1756.
7. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 83-96.
8. Mgbokwere C.O., Nutt S.R., Duffy J. Shear band formation in 4340 steel: A TEM study. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 97-100.
9. Yilong Bai, Qing Xue, Letian Shen. Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy. *Mechanics of Materials*, 1994, no. 17, pp. 155-164.
10. Grady D.E. Dynamic of adiabatic shear. *Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Journal de Physique III*, 1991, vol. 1, pp. 653-660.
11. Koffi K.S., Armstrong R.V. Obrazovanie oblastej peregreva pri udarnom nagruzhении [Formation of regions of overheating under impact loading]. *Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoj deformacii metallov*. Moscow: Metallurgiya, 1984, pp. 67-89.
12. Rodzhers X.K., Shastri N.V. Strukturnye izmeneniya v stalyah pri adiabaticheskom sdvige [Structural changes in the steel during the adiabatic shear]. *Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoj deformacii metallov*. Moscow: Metallurgiya, 1984, pp. 301-309.
13. Astanin V.V., Nadezhdin G.N., Petrov Yu.N. [et al.]. Lokalizaciya plasticheskoj deformacii pri skorostnom udarnom deformirovanii alyuminiya i splava AM6 [The localization of plastic deformation at high-speed shock deformation of aluminum alloy and AM6]. *Problemy prochnosti*, 1987, no. 3, pp. 81-86.

14. Kolupaeva S.N., Starenchenko V.A., Popov L.E. Neustojchivosti plasticheskogo techeniya v kristallax [Instability of plastic flow in crystals]. Tomskij gosudarstvennyj universitet, 1994. 301 p.

15. Panin V.E., Lixachev V.A., Grinyaev Yu.V. Strukturnye urovni deformacii tverdyh tel [Structural levels of deformation of solids]. Novosibirsk: Nauka, 1985. 229 p.

16. Panin V.E. Grinyaev Yu.V., Danilov V.I. [et al.] Strukturnye urovni plasticheskoy deformacii i razrusheniya [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 225 p.

17. Fizicheskaya mezomexanika i komp'yuternoe konstruirovaniye materialov [Physical mesomechanics and computer design of materials]. Ed. V.E. Panin. Novosibirsk: Nauka, 1995. 297 p.

18. Naimark O.B. Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture. *Proceedings IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Cambridge, United Kingdom, September 3–7, 1995*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996, J.R. Willis Eds., pp. 285-298.

19. Najmark O.B. Kollektivnye svoystva ansamblej defektov i nekotorye nelinejnye problemy plastichnosti i razrusheniya [Collective properties of defects ensembles and some nonlinear problems of plasticity and fracture]. *Fizicheskaya mezomexanika*, 2004, vol. 6, pp. 45-72.

20. Jonas G.H., Zukas J.A. Mechanics of penetration: analysis and experiments. *Int. J. Eng. Sci.*, 1978, no. 11, pp. 879-900.

21. Sokovikov M.A. Neustojchivost' plasticheskogo sdviga pri udarnom nagruzhении kak rezul'tat kineticheskikh perekhodov v sisteme mikrosvigov [Plastic shear instability under impact loading as a result of kinetic transitions in the microshears]. *Sbornik nauchnyx trudov «Vychislitel'naya mekhanika»*. Perm, 2003, no. 1, pp. 87-94.

22. Sokovikov M.A. Chislennoe issledovanie neustojchivosti plasticheskogo sdviga pri dinamicheskom nagruzhении [Numerical study of plastic shear instability under dynamic loading]. *Sbornik nauchnykh trudov «Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov»*. Perm, 2004, no. 12, pp. 82-88.

23. Sokovikov M.A. Chislennoe modelirovanie neustojchivosti plasticheskogo sdviga v ploskoj volne szhatiya [Numerical simulation of plastic shear instability in a plane wave compression]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2004, no. 1, pp. 28-36.

24. Sokovikov M.A. Avtomodel'nost' neustojchivosti plasticheskogo sdviga pri udarnom nagruzhении kak rezul'tat kineticheskix perexodov v sisteme mikrosdvigov [Scaling plastic shear instability under impact loading as a result of kinetic transitions in the microshears]. *Fizicheskaya mezomehanika*, 2004, vol. 7, spec. iss. part 1, pp. 332-335.

25. Sokovikov M.A. Chislennoe issledovanie neustojchivosti plasticheskogo sdviga pri vysokoskorostnom udare [Numerical study of plastic shear instability at high speed impact]. *Deformaciya i razrushenie materialov*, 2005, no. 7, pp. 13-17.

Об авторах

Соковиков Михаил Альбертович (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: sokovikov@icmm.ru).

Чудинов Василий Валерьевич (Пермь, Россия) – инженер лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: chudinov@icmm.ru).

Уваров Сергей Витальевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: usv@icmm.ru).

Плехов Олег Анатольевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: poa@icmm.ru).

Ляпунова Елена Аркадьевна (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, инженер лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: lyapunova@icmm.ru).

Петрова Анастасия Николаевна (Екатеринбург, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук (620041, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, e-mail: petrovanastya@yahoo.com).

Баяндин Юрий Витальевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: buv@icmm.ru).

Наймарк Олег Борисович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физических основ прочности Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, ИМСС УрО РАН, e-mail: naimark@icmm).

Бродова Ирина Григорьевна (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук (620041, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, e-mail: brodova@imp.uran.ru).

About the authors

Sokovikov Mikhail Al'bertovich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Akademic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: sokovikov@icmm.ru).

Chudinov Vasilij Valerievich (Perm, Russian Federation) – Engineer, Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Akademic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: chudinov@icmm.ru).

Uvarov Sergey Vitalievich (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Akademic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: usv@icmm.ru).

Plekhov Oleg Anatolievich (Perm, Russian Federation) – Professor, Senior Researcher, Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Academic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: poa@icmm.ru).

Lyapunova Elena Arkadievna (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Engineer, Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Academic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: lyapunova@icmm.ru).

Petrova Anastasiia Nikolaevna (Perm, Russian Federation) – Researcher, Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (18, S. Kovalevskaya st., 620990, Ekaterinburg, Russian Federation, e-mail: petrovanastya@yahoo.com).

Naimark Oleg Borisovich (Perm, Russian Federation) – Professor, Head of Laboratory of Physical Foundation of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences (1, Academic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: naimark@icmm).

Brodova Irina Grigorievna (Perm, Russian Federation) – Professor, Doctor of engineering, General Researcher, Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (18, S. Kovalevskaya st., 620990, Ekaterinburg, Russian Federation, e-mail: brodova@imp.uran.ru).

Получено 14.03.13