

DOI: [10.7242/1999-6691/2013.6.4.51](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.4.51)  
УДК 669.017:539.4; 669.017:539.52

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛОВ

М.А. Соковиков<sup>1,2</sup>, Ю.В. Баяндин<sup>1,2</sup>, Е.А. Ляпунова<sup>1</sup>, О.А. Плехов<sup>1,2</sup>, В.В. Чудинов<sup>1</sup>, О.Б. Наймарк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование механизмов неустойчивости и локализации пластического сдвига при динамическом деформировании металлов. Механизмы неустойчивости связываются с коллективными эффектами в ансамбле микросдвигов в пространственно-локализованных областях. Инфракрасное сканирование *in-situ* зоны неустойчивости и последующее изучение дислокационной субструктуры подтвердили предположение о решающей роли неравновесных переходов в ансамблях дефектов при развитии локализованного пластического течения. На основе уравнений, отражающих связь неравновесных переходов с механизмами структурной релаксации и пластического течения, проведено моделирование неустойчивости пластического сдвига.

*Ключевые слова:* пластичность, дефекты, разрушение, сдвиг, динамическое нагружение, пробивание преград

## PLASTIC STRAIN LOCALIZATION AND FRACTURE MECHANISMS OF METALS SUBJECTED TO DYNAMIC LOADING

M.A. Sokovikov<sup>1,2</sup>, Yu.V. Bayandin<sup>1,2</sup>, E.A. Lyapunova<sup>1</sup>, O.A. Plekhov<sup>1,2</sup>, V.V. Chudinov<sup>1</sup> and O.B. Naimark<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The mechanisms responsible for instability and localization of plastic shear during dynamic deformation of metals are investigated. The instability mechanisms are related to the collective effects in the ensemble of micros shears in the regions of space localization. In-situ infrared scanning of the instability region and the analysis of the dislocation substructure confirm the suggestion about the key role of non-equilibrium transitions in the ensembles of defects for the localized plastic flow evolution. Equations that describe the relationships between the non-equilibrium transitions and the mechanisms of structural relaxation and plastic flow are used to model the plastic shear instability.

*Key words:* plasticity, defects, fracture, shear, dynamic loading, target perforation

### 1. Введение

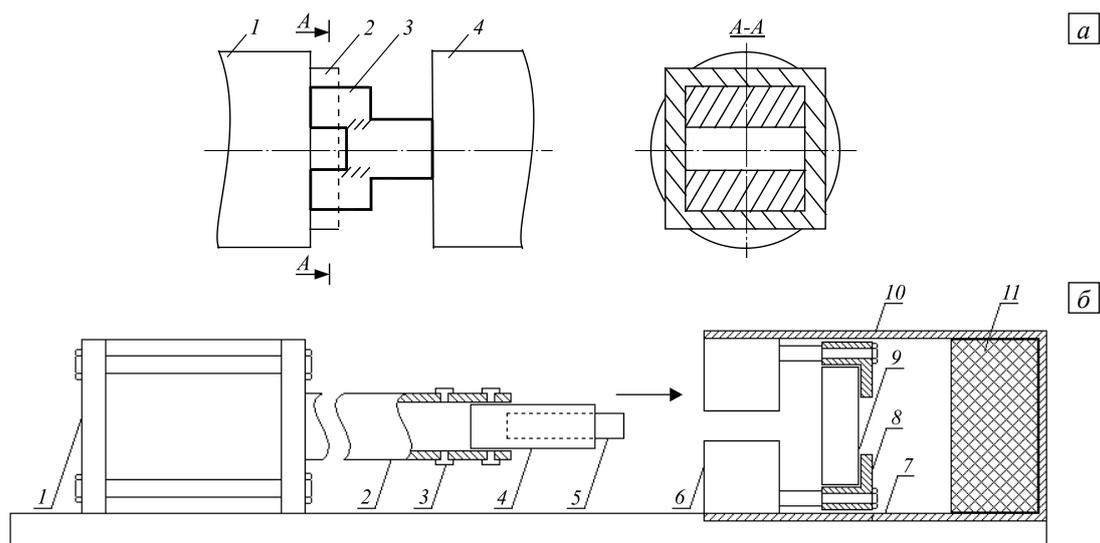
Локализация пластической деформации металлов, подвергнутых динамическому нагружению, является многофакторным процессом, зависящим от скорости и величины деформации, температуры, а также эволюции структуры материала. Так, в работе [1] показано, что одним из механизмов формирования полос пластического сдвига являются множественные многомасштабные неустойчивости в системе микросдвигов (дефектов мезоуровня), сопровождающиеся пластическими ротациями, изменением ориентации зерен в узких полосах сдвига. Исследованию данного явления посвящен цикл работ [1–17].

В настоящей работе изучается локализация пластического течения при динамическом нагружении металлов на основе развитой структурно-феноменологической модели твердых тел с дефектами [18, 19] и оригинальных экспериментов по регистрации *in-situ* кинетики и термодинамики развития неустойчивости пластического сдвига и структурных исследований. Скачкообразный переход к более упорядоченной дефектной структуре часто приводит к изменениям деформационных свойств, которые могут проявиться при динамическом нагружении в условиях чистого сдвига и при высокоскоростном соударении ударника с преградой (выбивание пробки) [20–28].

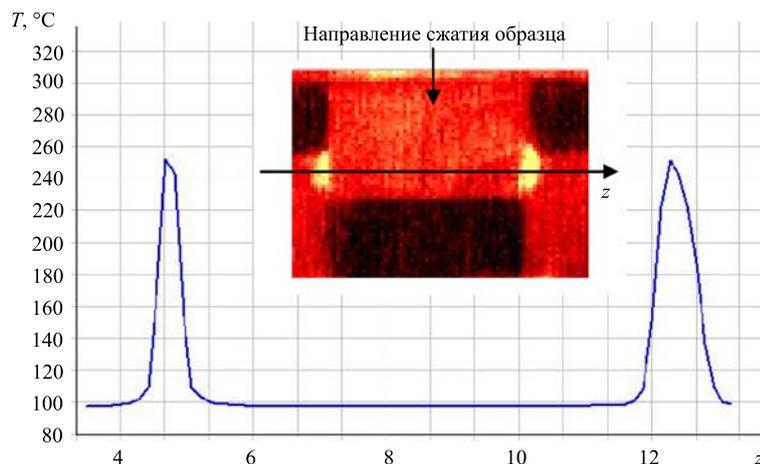
### 2. Экспериментальное исследование механизмов локализации пластического сдвига

Динамическое нагружение металлических образцов осуществлялось по двум схемам: сжатие на установке Гопкинсона–Кольского образцов П-образной формы с концентратором напряжений (из сплава Д16) и выбивание пробки (в мишени из алюминиевого сплава А6061) разгоняемым ударником [21–23]. В качестве ударника при испытании образцов на пробивание использовался стержень из высокоуглеродистой стали диаметром 5 мм, длиной 50 мм и массой 7,4 г. Скорости соударения составляли 101–280 м/с.

Схемы экспериментов по реализации нагружения, близкого к чистому сдвигу, и по пробиванию металлических преград представлены на рисунке 1. Использование инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M позволило проследить *in-situ* картину распределения температур вблизи зоны локализации деформации (Рис. 2).

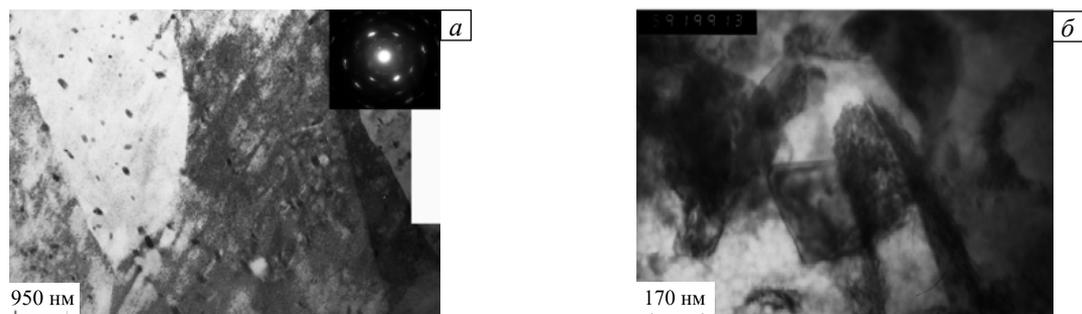


**Рис. 1.** Схемы экспериментов: (а) – нагружение металлических образцов в условиях, близких к чистому сдвигу: 1 – входной стержень, 2 – рамка-держатель, 3 – образец, 4 – выходной стержень; заштрихованные области находятся в состоянии близком к чистому сдвигу; (б) – испытание образцов на пробивание: 1 – камера высокого давления, 2 – ствол, 3 – фотодатчики, 4 – поддон, 5 – ударник, 6 – отсекаль, 7 – рама, 8 – устройство для крепления мишени, 9 – мишень, 10 – приёмная камера, 11 – улавливатель



**Рис. 2.** Профиль температуры боковой поверхности плоского П-образного образца из сплава Д16, подвергнутого динамическому сжатию, с характерными зонами интенсивной сдвиговой деформации

Микроструктурные исследования слоев материала, расположенных вблизи зоны локализации деформации, показали существенное увеличение плотности дислокаций и формирование ячеистой дислокационной структуры как для случая динамического нагружения, так и для выбивания пробки (Рис. 3). Просвечивающая электронная микроскопия образцов проводилась в Институте физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург) с участием профессора И.Г. Бродовой и научного сотрудника А.Н. Петровой [21, 22]. Восстановленные величины сдвиговых деформаций по смещению линий течения, а также



**Рис. 3.** Ячеистая дислокационная структура образцов в зонах локализации деформации при динамическом сжатии (а) и после выбивания пробки (б)

результаты измерения микротвердости выявили расширение области деформированного материала по мере продвижения ударника в материале мишени.

При помощи сканирующей электронной микроскопии поверхностей разрушения, образующихся при выбивании пробки, обнаружился неоднородный характер распространения разрушения в материале мишени: так, в зоне, соответствующей сдвиговым механизмам деформирования материала и начальному формированию магистральной трещины, шероховатость поверхности разрушения оказалась относительно малой, с низкими значениями параметров масштабной инвариантности. В зоне, соответствующей финальному распространению магистральной трещины, рельеф поверхности разрушения стал более грубым, параметры масштабной инвариантности выросли.

Повышение твердости, характер расположения линий течения материала и их сгущение вблизи поверхности разрушения, а также результаты просвечивающей электронной микроскопии позволяют сделать вывод об интенсивных структурных изменениях, сопровождающих процессы локализации пластического течения при динамическом нагружении металлов.

### 3. Моделирование процесса локализации пластического сдвига

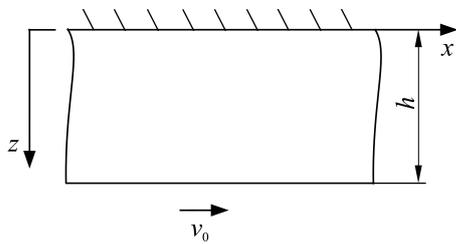


Рис. 4. Плоский слой в условиях чистого сдвига

Численное моделирование механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации (в квазиодномерной постановке) проводилось с учетом особенностей кинетики накопления микросдвигов в материале. Рассматривалось деформирование плоского слоя толщиной  $h$  в условиях чистого сдвига. Одна сторона слоя была жестко закреплена, на другой задавалась постоянная скорость  $v_0$  (Рис. 4).

Поведение материала плоского слоя с учетом кинетики накопления микросдвигов в материале

описывалось следующими уравнениями [18, 24]:

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

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

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

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

Использовались начальные и граничные условия:

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

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

В выражениях (1)–(6) приняты обозначения:  $\rho$  — плотность материала слоя;  $v_x$ , — компонента вектора скорости;  $\dot{\epsilon}_{xz}^p$  — компонента тензора пластических деформаций;  $\tau_{xz}$  — компонента тензора напряжений;  $l_1, l_2, l_3$  — кинетические коэффициенты;  $A_1, B_1, p_a, p_b$  — параметры аппроксимации;  $p$  — компонента тензора плотности микросдвигов;  $D_1$  — параметр нелокальности

Неоднородное пластическое течение слоя и дальнейшая локализация пластической деформации инициировались начальным неоднородным распределением компоненты тензора плотности микросдвигов. Принималось условие аддитивности упругих ( $\dot{\epsilon}_{xz}^e$ ) и пластических ( $\dot{\epsilon}_{xz}^p$ ) скоростей деформаций:

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

Поведение материала слоя описывалось уравнением:

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

где  $G$  — модуль сдвига. При численном решении системы уравнений (1)–(8) использовалась конечно-разностная схема второго порядка точности.

В процессе высокоскоростного деформирования в материале происходит структурно-кинетический переход по параметру плотности микросдвигов в локальной области, который характеризуется быстрым ростом параметра плотности микросдвигов (Рис. 5, а). Это приводит к резкому — скачкообразному, изменению эффективных характеристик среды, в частности, к падению эффективной вязкости, и, как следствие, к быстрому росту скорости пластической деформации и релаксации напряжений и, следовательно, падению сопротивления сдвигу в этой области (Рис. 5, б).

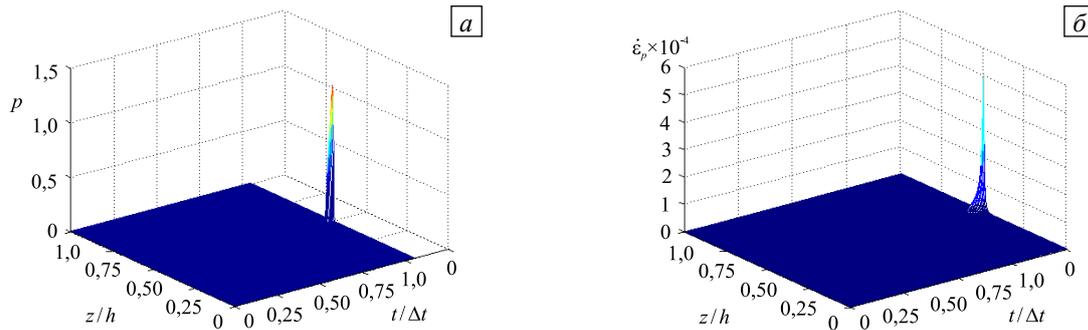


Рис. 5. Распределение компоненты тензора плотности микросдвигов (а) и скорости пластической деформации (б);  $\Delta t$  — характерное время

Таким образом, 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.

#### 4. Трехмерная математическая модель

Полная математическая постановка, описывающая деформирование и разрушение твердых тел с мезоскопическими дефектами при динамических и квазистатических условиях нагружения, представлена в работах авторов [29–34] и в данной работе применена для трехмерного численного моделирования динамического нагружения металлов в условиях чистого сдвига. Система дифференциальных уравнений модели имеет вид

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{V}, \quad (10)$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e + \dot{\mathbf{p}} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \quad (12)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_s + \mathbf{p}_d, \quad (13)$$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \lambda I_1(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e) + 2G\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e, \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = A_1 \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - A_2 \dot{\mathbf{p}}, \quad (15)$$

$$-\frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} = A_3 \dot{\mathbf{p}} - A_2 \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p, \quad (16)$$

$$-\frac{\partial F}{\partial \delta} = A_4 \dot{\delta}, \quad (17)$$

$$A_1 A_3 - A_2^2 > 0, \quad A_i > 0, \quad i = \overline{1, 4} \quad (18)$$

и включает: уравнения движения (9); уравнения неразрывности (10); гипотезы аддитивности упругой, пластической и структурной деформаций (11); представление напряжения в виде разложения на шаровую

и девиаторную части (12); аналогичное разложение для деформации, обусловленной дефектами (13); закон Гука в скоростной форме (14); определяющие соотношения для макроскопических переменных, характеризующие неупругое поведение среды (15)–(17); ограничения на кинетические коэффициенты (квазиравновесный подход Онсагера) (18).

В выражениях (9)–(18) используются обозначения:  $\sigma$  — напряжение, при этом  $\sigma_s$  и  $\sigma_d$  — его шаровая и девиаторная составляющие;  $u$  — перемещение;  $\rho$  — плотность;  $V$  — скорость;  $\epsilon$  — полная деформация, при этом  $\epsilon^e$  и  $\epsilon^p$  — ее упругая и пластическая составляющие;  $p$  — тензор плотности дефектов, физический смысл которого есть деформация, обусловленная дефектами, где  $p_s$  и  $p_d$  — его шаровая и девиаторная части;  $I_1(\dot{\epsilon}^e)$  — первый инвариант скорости упругой деформации;  $\lambda$  и  $G$  — первый и второй параметр Ламе;  $F$  — свободная энергия Гельмгольца (термодинамический потенциал);  $\delta$  — параметр структурного скейлинга;  $A_i$  — кинетические коэффициенты, которые в общем случае зависят от инвариантов  $p$  [18, 19]. Переменные  $p$  и  $\delta$  имеют смысл независимых термодинамических переменных среды с дефектами (аналогичных параметрам порядка в теории фазовых переходов).

Разрушение материала представляется как процесс накопления повреждений (микросдвигов, микротрещин), а критерием разрушения является условие достижения инвариантами введенного тензора плотности дефектов своих критических значений.

Трехмерная математическая модель (9)–(18) реализована в пакете прикладных программ Abaqus/Explicit в виде отдельного программного модуля, задающего свойства материала. С ее использованием рассмотрено динамическое нагружение П-образного образца в условиях чистого сдвига (Рис. 6). На торце образца, граничащего с входным стержнем, задавались граничные условия в виде известного импульса напряжений, а на противоположном торце — нулевые перемещения, Остальные поверхности образца считались свободными. Граничные условия представлялись соотношениями:

$$\Gamma_f : \sigma \cdot n = f(t), \tag{19}$$

$$\Gamma_0 : \sigma \cdot n = 0, \tag{20}$$

$$\Gamma_u : \vec{u} = \vec{u}_s(t), \tag{21}$$

где  $\Gamma_f$  — граница образца, на которой прикладывался входной импульс напряжений,  $\Gamma_0$  — свободная поверхность образца,  $\Gamma_u$  — граница образца, на которой были известны перемещения. Начальные условия по всем переменным модели выбирались однородными.

Результаты численного моделирования динамического нагружения П-образного образца в различные моменты времени представлены на рисунке 6. Из полученных распределений поврежденности —

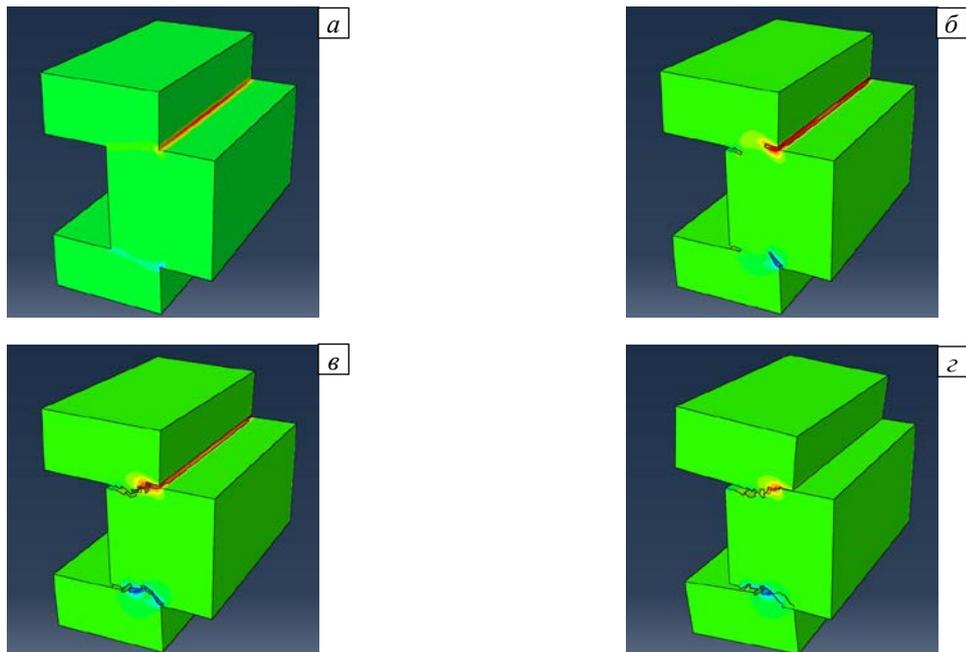


Рис. 6. Результаты численного моделирования: распределение поврежденности и геометрия трещины в различные моменты времени  $t$ , мкс: 8 (а); 16 (б); 20 (в); 50 (г)

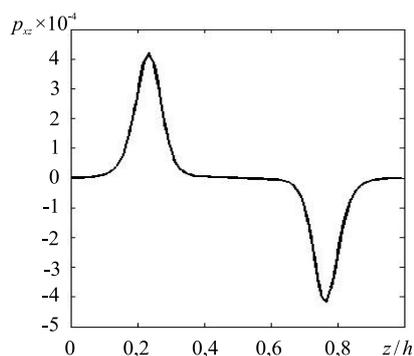


Рис. 7. Зависимость деформации сдвига, обусловленной дефектами, в момент времени  $t = 10$  мкс

деформации, обусловленной дефектами, можно сделать заключение, что зарождение и рост дефектов сопровождаются пластическими деформациями в зонах, где реализуется состояние чистого сдвига, приводящими к повышению температуры этих зон, которая и регистрируется методами инфракрасного сканирования температурных полей (Рис. 2).

На рисунке 7 представлено распределение вдоль вертикальной оси  $z$  деформации  $p_{xz}$ , обусловленной дефектами, в центре П-образного образца в момент времени нагружения 10 мкс. Показанная зависимость отражает интенсивный рост дефектов в зонах сдвига, который сопровождается пластической деформацией и, как следствие, приводит к нагреванию материала (см. экспериментально полученную зависимость температуры на рисунке 2).

## 5. Обсуждение результатов

Проведенные микроструктурные исследования позволили восстановить картину деформационных процессов, протекающих при динамическом нагружении мишеней из алюминиевого сплава А6061 и сплава Д16. Стадийность процесса пробивания отражается в особенностях формирования рельефа поверхности разрушения и прилегающих к ней внутренних слоев материала. Показано существенное увеличение плотности дислокаций и формирование ячеистой дислокационной структуры в областях локализации пластического течения как при динамическом нагружении образцов, так и при нагружении мишеней, сопровождающемся инициированием «пробки».

Используемая математическая модель позволила описать процесс деформирования и разрушения металлов в условиях чистого сдвига. Проведенные на ее основе расчеты подтвердили, что выбранные два параметра порядка (обусловленная дефектами деформация и структурный параметр) описывают эволюцию дефектной структуры материала в условиях динамического нагружения. Предложенный вид критерия разрушения определяет условие, при котором наступает разрушение, что позволяет установить место и момент наискорейшего зарождения и роста дефектов, что в дальнейшем приводит к образованию макроскопической трещины и окончательному разрушению образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятий по реализации Постановления Правительства РФ № 218).

## Литература

1. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burbliks A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 203-214. [DOI](#)
2. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 261-271. [DOI](#)
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 // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 111-134. [DOI](#)
4. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of microstructure and shear-band formation in  $\alpha$ -hcp titanium // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P.175-193. [DOI](#)
5. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates // J. Mech. Phys. Solids. – 1987. – V. 35, N. 2. – P. 185-211. [DOI](#)
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. – V. 40, N. 8. – P. 1735-1756. [DOI](#)
7. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 83-96. [DOI](#)
8. Mgbokwere C.O., Nutt S.R., Duffy J. Shear band formation in 4340 steel: A TEM study // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 97-100. [DOI](#)
9. Bai Y., Xuc Q., Xu Y., Shen L. Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 155-164. [DOI](#)
10. Grady D.E. Dynamic of adiabatic shear// Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Jour. de Physique III. – 1991. – V. 1. – P. 653-660.
11. Коффи К.С., Армстронг Р.В. Образование областей перегрева при ударном нагружении // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под. ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. – 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 / Под. ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. – М.: Металлургия. – 1984. – С. 301-309.
13. Астанин В.В., Надеждин Г.Н., Петров Ю.Н. и др. Локализация пластической деформации при скоростном ударном деформировании алюминия и сплава АМг6 // Проблемы прочности. – 1987. – № 3. – С. 81-85.

14. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластического течения в кристаллах. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 196 с.
15. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
16. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – 225 с.
17. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов в 2-х т. / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука. – 1995. – Т. 1. – 297 с.; Т. 2. – 320 с.
18. Naimark O.B. Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture // Proc. IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Cambridge, United Kingdom, September 3-7, 1995. – P. 285-298.
19. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 45-72.
20. Jonas G.H., Zukas J.A. Mechanics of penetration: Analysis and experiment // Int. J. Eng. Sci. – 1978. – V. 16, N. 11. – P. 879-903. [DOI](#)
21. Ляпунова Е.А., Петрова А.Н., Бродова И.Г. и др. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061 // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38, № 1. – С. 13-20.
22. Ляпунова Е.А., Петрова А.Н., Бродова И.Г. и др. Исследование закономерностей локализации пластической деформации и формирования многомасштабных дефектных структур в процессе динамического нагружения алюминиевого сплава 6061 // Физ. мезомех. – 2012. – Т. 15, № 2. – С. 61-67.
23. Сокоиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В. и др. Неустойчивость пластического сдвига и локализация пластической деформации при динамическом нагружении как результат структурно-кинетических переходов в системе мезодефектов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2 – С. 154-175.
24. Сокоиков М.А. Неустойчивость пластического сдвига при ударном нагружении как результат кинетических переходов в системе микросдвигов // Вычислительная механика. Сборник научных трудов. – 2003. – № 1. – С. 87-94.
25. Сокоиков М.А. Численное исследование неустойчивости пластического сдвига при динамическом нагружении // Вестник ПГТУ. Математическое моделирование систем и процессов. – 2004. – № 12. – С. 82-88.
26. Сокоиков М.А. Численное моделирование неустойчивости пластического сдвига в плоской волне сжатия // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – 2004. – № 1. – С. 28-36.
27. Сокоиков М.А. Автомодельность неустойчивости пластического сдвига при ударном нагружении как результат кинетических переходов в системе микросдвигов // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7, Спец. выпуск Ч. 1. – С. 332-335.
28. Сокоиков М.А. Численное исследование неустойчивости пластического сдвига при высокоскоростном ударе // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – № 7. – С. 13-17.
29. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Численное моделирование откола, индуцированного мезодефектами при ударно-волновом нагружении металлов // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 13-23. [DOI](#)
30. Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Численное моделирование деформирования и разрушения металлов в условиях плоского удара // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 300-307. [DOI](#)
31. Баяндин Ю.В., Костина А.А., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А. Моделирование деформационного поведения ванадия при квазистатическом нагружении // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 33-39. [DOI](#)
32. Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Леонтьев В.А., Пантелеев И.А., Плехов О.А. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро- (нано-)кристаллическом состоянии // Физ. мезомех. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 47-60.
33. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 90-100. [DOI](#)
34. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное и теоретическое исследование автомодельной структуры пластического фронта ударных волн в конденсированных средах // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7, Спец. выпуск Ч. 1. – С. 305-308.

## References

1. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burblies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 203-214. [DOI](#)
2. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 261-271. [DOI](#)
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 // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 111-134. [DOI](#)
4. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of microstructure and shear-band formation in  $\alpha$ -hcp titanium // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P.175-193. [DOI](#)
5. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates // J. Mech. Phys. Solids. – 1987. – V. 35, N. 2. – P. 185-211. [DOI](#)
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. – V. 40, N. 8. – P. 1735-1756. [DOI](#)
7. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 83-96. [DOI](#)
8. Mgbokwere C.O., Nutt S.R., Duffy J. Shear band formation in 4340 steel: A TEM study // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 97-100. [DOI](#)
9. Bai Y., Xuc Q., Xu Y., Shen L. Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy // Mech. Mater. – 1994. – V. 17, N. 2-3. – P. 155-164. [DOI](#)
10. Grady D.E. Dynamic of adiabatic shear// Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Jour. de Physique III. – 1991. – V. 1. – P. 653-660.

11. *Koffi K.S., Armstrong R.V.* Obrazovanie oblastei peregreva pri udarnom nagruzhenii // Udarnye volny i iavleniia vysokoskorostnoi deformatsii metallov / Pod. red. M.A. Meiersa, L.E. Murra. – M.: Metallurgii, 1984. – S. 67-89.
12. *Rodzhers Kh.K., Shastri N.V.* Strukturnye izmeneniia v staliakh pri adiabaticheskom sdvige // Udarnye volny i iavleniia vysokoskorostnoi deformatsii metallov / Pod. red. M.A. Meiersa, L.E. Murra. – M.: Metallurgii. – 1984. – S. 301-309.
13. *Astanin V.V., Nadezhdin G.N., Petrov Iu.N. i dr.* Lokalizatsiia plasticheskoi deformatsii pri skorostnom udarnom deformirovanii aliuminiia i splava AMg6 // Problemy prochnosti. – 1987. – N. 3. – С. 81-85.
14. *Kolupaeva S.N., Starenchenko V.A., Popov L.E.* Neustoichivosti plasticheskogo techeniia v kristallakh. – Tomsk: Izd-vo TGU, 1994. – 196 s.
15. *Panin V.E., Likhachev V.A., Griniaev Iu.V.* Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 229 s.
16. *Panin V.E. Griniaev Iu.V., Danilov V.I. i dr.* Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniia. – Novosibirsk: Nauka, 1990. – 225 s.
17. Fizicheskaiia mezomekhanika i komp'uternoe konstruirovaniie materialov v 2-kh t. / Pod red. V.E. Panina. – Novosibirsk: Nauka. – 1995. – Т. 1. – 297 s.; Т. 2. – 320 s.
18. *Naimark O.B.* Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture // Proc. IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Cambridge, United Kingdom, September 3-7, 1995. – P. 285-298.
19. *Naimark O.B.* Kollektivnye svoistva ansamblei defektov i nekotorye nelineinye problemy plastichnosti i razrusheniia // Fiz. Mezomekh. – 2003. – Т. 6, N. 4. – S. 45-72.
20. *Jonas G.H., Zukas J.A.* Mechanics of penetration: Analysis and experiment // Int. J. Eng. Sci. – 1978. – V. 16, N. 11. – P. 879-903. [DOI](#)
21. *Liapunova E.A., Petrova A.N., Brodova I.G. i dr.* Issledovanie morfologii mnogomasshtabnykh defektnykh struktur i lokalizatsii plasticheskoi deformatsii pri probivanii mishenei iz splava A6061 // PZhTF. – 2012. – Т. 38, N. 1. – S. 13-20.
22. *Liapunova E.A., Petrova A.N., Brodova I.G. i dr.* Issledovanie zakonovernosti lokalizatsii plasticheskoi deformatsii i formirovaniia mnogomasshtabnykh defektnykh struktur v protsesse dinamicheskogo nagruzheniia aliuminievolgo splava 6061 // Fiz. mezomekh. – 2012. – Т. 15, N. 2. – S. 61-67.
23. *Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Uvarov S.V. i dr.* Neustoichivost' plasticheskogo sdviga i lokalizatsiia plasticheskoi deformatsii pri dinamicheskom nagruzhenii kak rezul'tat strukturno-kineticheskikh perekhodov v sisteme mezodefektov // Vestnik PNIPU. Mekhanika. – 2013. – N. 2 – S. 154-175.
24. *Sokovikov M.A.* Neustoichivost' plasticheskogo sdviga pri udarnom nagruzhenii kak rezul'tat kineticheskikh perekhodov v sisteme mikrosdvigov // Vychislitel'naia mekhanika. Sbornik nauchnykh trudov. – 2003. – N. 1. – S. 87-94.
25. *Sokovikov M.A.* Chislennoe issledovanie neustoichivosti plasticheskogo sdviga pri dinamicheskom nagruzhenii // Vestnik PGTU. Matematicheskoe modelirovaniie sistem i protsessov. – 2004. – N. 12. – S. 82-88.
26. *Sokovikov M.A.* Chislennoe modelirovaniie neustoichivosti plasticheskogo sdviga v ploskoi volne szhatiia // Vestnik PGTU. Prikladnaia matematika i mekhanika. – 2004. – N. 1. – S. 28-36.
27. *Sokovikov M.A.* Avtomodel'nost' neustoichivosti plasticheskogo sdviga pri udarnom nagruzhenii kak rezul'tat kineticheskikh perekhodov v sisteme mikrosdvigov // Fiz. mezomekh. – 2004. – Т. 7, Spets. vypusk Ch. 1. – S. 332-335.
28. *Sokovikov M.A.* Chislennoe issledovanie neustoichivosti plasticheskogo sdviga pri vysokoskorostnom udare // Deformatsiia i razrushenie materialov. – 2005. – N. 7. – S. 13-17.
29. *Baiandin Iu.V., Naimark O.B., Uvarov S.V.* Chislennoe modelirovaniie otkola, indutsirovannogo mezodefektami pri udarnovolnovom nagruzhenii metallov // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2010. – Т. 3, N. 1. – S. 13-23. [DOI](#)
30. *Savel'eva N.V., Baiandin Iu.V., Naimark O.B.* Chislennoe modelirovaniie deformirovaniia i razrusheniia metallov v usloviiax ploskogo udara // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2012. – Т. 5, N. 3. – S. 300-307. [DOI](#)
31. *Baiandin Iu.V., Kostina A.A., Naimark O.B., Panteleev I.A.* Modelirovaniie deformatsionnogo povedeniia vanadiia pri kvazistaticheskom nagruzhenii // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2012. – Т. 5, N. 1. – S. 33-39. [DOI](#)
32. *Naimark O.B., Baiandin Iu.V., Leont'ev V.A., Panteleev I.A., Plekhov O.A.* Strukturno-skeilingovye perekhody i nekotorye termodinamicheskie i kineticheskie efekty v materialakh v ob'emnom submikro- (nano-)kristallicheskom sostoianii // Fiz. mezomekh. – 2009. – Т. 12, N. 4. – S. 47-60.
33. *Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B.* Nekotorye avtomodel'nye zakonovernosti razvitiia povrezhdennosti pri kvazikhrupkom razrushenii tverdykh tel // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2011. – Т. 4, N. 1. – S. 90-100. [DOI](#)
34. *Baiandin Iu.V., Naimark O.B.* Eksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie avtomodel'noi struktury plasticheskogo fronta udarnykh voln v kondensirovannykh sredakh // Fiz. mezomekh. – 2004. – Т. 7, Spets. vypusk Ch. 1. – S. 305-308.

Поступила в редакцию 07.10.13; опубликована в электронном виде 27.12.13

#### Сведения об авторах

*Соковиков Михаил Альбертович*, кфмн, доц., снс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; E-mail: sokovikov@icmm.ru

*Баяндин Юрий Витальевич*, кфмн., нс, ИМСС УрО РАН; E-mail: buy@icmm.ru

*Ляпунова Елена Аркадьевна*, кфмн, инж.-исслед., ИМСС УрО РАН; E-mail: lyapunova@icmm.ru

*Плехов Олег Анатольевич*, дфмн., зам.дир., ИМСС УрО РАН; E-mail: roa@icmm.ru

*Чудинов Василий Валерьевич*, инж., ИМСС УрО РАН; E-mail: chudinov@icmm.ru

*Наймарк Олег Борисович*, дфмн, проф., зав.лаб., ИМСС УрО РАН; E-mail: naimark@icmm