

Билалов Д.А., Соковиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Описание эффекта падения прочности сплава АМг6 с ростом температуры при динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 2. С. 5-14. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.01

Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Bayandin Yu.V., Chudinov V.V., Oborin V.A., Naimark O.B. Description of the effect of AlMg6 alloy strength decrease during temperature increase under dynamic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 2, pp. 5-14. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.01



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.01

УДК 669.017:539.4; 669.017:539.52

## ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ПАДЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СПЛАВА АМГ6 С РОСТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Д.А. Билалов, М.А. Соковиков, Ю.В. Баяндин, В.В. Чудинов,  
В.А. Оборин, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 11 марта 2019 г.  
Принята: 28 марта 2019 г.  
Опубликована: 28 июня 2019 г.

#### Ключевые слова:

динамическое нагружение, локализация пластической деформации, термическое разупрочнение, микросдвиги, численное моделирование, АМг6, пробивание преград.

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному изучению механизмов локализации пластической деформации при динамическом нагружении. В рамках исследования на основе широкодиапазонных определяющих соотношений построена математическая модель, учитывающая структурную релаксацию и термическое разупрочнение. Предложенная модель способна адекватно описывать деформационное поведение пластичных материалов (металлы и сплавы) в диапазоне скоростей деформаций  $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup> и диапазоне температур от 0 до 0,7 температуры плавления. В качестве исследуемого материала был выбран алюминиевый сплав АМг6 – перспективный материал машиностроения. Однако все полученные результаты могут быть распространены на широкий класс материалов: металлы и сплавы. Идентификация параметров модели проводилась с использованием экспериментальных данных (диаграмм деформирования) при различных скоростях деформации и температурах. Для апробации построенной модели была проведена серия оригинальных экспериментов по пробиванию дискообразных преград цилиндрическим ударником. В процессе эксперимента измерялась скорость соударения и температура на тыльной поверхности преграды в момент интенсивной локализации пластической деформации и разрушения. Скорость деформации в эксперименте, которая определена с помощью численного анализа, варьировалась от 500 до 30000 с<sup>-1</sup>. В результате численных исследований было показано, что для сплава АМг6 при скоростях деформации менее  $10^4$  с<sup>-1</sup> решающую роль в процессе локализации пластической деформации играют дефекты, а при скоростях деформации выше  $10^4$  с<sup>-1</sup> существенную роль начинает играть термическое разупрочнение. Полученный теоретический результат также подтверждается проведенными оригинальными экспериментами по пробиванию преград.

© ПНИПУ

© Билалов Дмитрий Альфредович – к.ф.-м.н., вед. инж., e-mail: ledon@icmm.ru, ID: 0000-0003-1541-2246.  
Соковиков Михаил Альбертович – к.ф.-м.н., доц., с.н.с., e-mail: sokovikov@icmm.ru, ID: 0000-0003-0298-6240.  
Баяндин Юрий Витальевич – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: buv@icmm.ru, ID: 0000-0002-1824-1940.  
Чудинов Василий Валерьевич – инж., e-mail: chudinov@icmm.ru, ID: 0000-0002-4109-1573.  
Оборин Владимир Александрович – вед. инж., e-mail: oborin@icmm.ru, ID: 0000-0003-2836-2073.  
Наймарк Олег Борисович – д.ф.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: naimark@icmm.ru, ID: 0000-0001-6537-1177.

Dmitry A. Bilalov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Leading Engineer, e-mail: ledon@icmm.ru, ID: 0000-0003-1541-2246.

Mikhail A. Sokovikov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: sokovikov@icmm.ru, ID: 0000-0003-0298-6240.

Yuriy V. Bayandin – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: buv@icmm.ru, ID: 0000-0002-1824-1940.

Vasily V. Chudinov – Engineer, e-mail: chudinov@icmm.ru, ID: 0000-0002-4109-1573.

Vladimir A. Oborin – Leading Engineer, e-mail: oborin@icmm.ru, ID: 0000-0003-2836-2073.

Oleg B. Naimark – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory, e-mail: naimark@icmm.ru, ID: 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)

## DESCRIPTION OF THE EFFECT OF ALMG6 ALLOY STRENGTH DECREASE DURING TEMPERATURE INCREASE UNDER DYNAMIC LOADING

D.A. Bilalov, M.A. Sokovikov, Yu. V. Bayandin, V.V. Chudinov,  
V.A. Oborin, O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy of Science,  
Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 11 March 2019  
Accepted: 28 March 2019  
Published: 28 June 2019

#### Keywords:

dynamic loading, plastic strain localization, thermal softening, microshears, numerical simulation, AlMg6, penetration of a barrier.

### ABSTRACT

The work is devoted to a theoretical and experimental study of mechanisms related to plastic strain localization under dynamic loading. A mathematical model that takes into account structural relaxation and thermal softening is built within the framework of the study on the basis of wide-range constitutive equations. The proposed model is capable to adequately describe the deformation of plastic materials (metals and alloys) in the range of strain rates of 102-104 s<sup>-1</sup> and in the temperature range from 0 to 0.7 of the melting point. AlMg6 aluminum alloy was chosen as a material under study as it is a promising material for mechanical engineering. However, all the obtained results can be applied to a wide class of materials: metals and alloys. The model parameters were identified using experimental data (stress-strain diagrams) at various strain rates and temperatures. The series of original experiments on punching disc-shaped barriers by a cylindrical projectile was carried out to test the constructed model. During the experiment, the impact velocity and the temperature on the back surface of the barrier were measured at the moment of an intense localization of plastic deformation and fracture. The strain rate in the experiment ranged from 500 to 30,000 s<sup>-1</sup>. As a result of the numerical studies, it was shown that defects play a critical part in during strain localization for AlMg6 alloy at strain rates of less than 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>. Thermal softening begins to make a significant contribution at strain rates above 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>. This theoretical result is also confirmed by the original experiments on the penetration of barriers.

© PNRPU

### Введение

Локализация пластической деформации в металлах при динамическом нагружении является сложным процессом, зависящим от ряда факторов: температуры, скорости и величины деформации, эволюции структуры материала. Исследованию данного явления посвящены работы [1–11]. На сегодняшний день существует две наиболее распространенные точки зрения о механизмах локализации деформации: термопластическая неустойчивость [12–14] и механизмы, связанные с эволюцией структуры [15–19]. В исследовании [20] было показано, что, начиная со скоростей деформации 10<sup>4</sup> с<sup>-1</sup>, температура начинает вносить существенный вклад в общую релаксацию напряжений (для AlMg6), а при меньших скоростях деформации решающую роль в инициации процесса локализации пластической деформации играют дефекты. В работах [21–23] отражен процесс изучения изменения прочностных характеристик сплава AlMg6 при различных скоростях деформации и температурах. Также были предложены феноменологические определяющие соотношения, которые хорошо аппроксимируют экспериментальные данные, но не учитывают напрямую механизмы структурной релаксации. Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное изучение механизмов локализации деформации при динамическом нагружении, построение адекватной математической модели, учитывающей как роль дефек-

тов, так и термическое разупрочнение, и выявление границ смены различных механизмов релаксации напряжений и падения прочностных характеристик на примере сплава AlMg6.

### 1. Экспериментальное исследование

Проведен эксперимент по пробиванию пластин из сплава AlMg6 цилиндрическим стальным ударником. Ударник разогнался с использованием газовой баллистической установки и инициировал пробивание мишени, формируя области локализованного сдвига по образующей «пробки». Схема эксперимента изображена на рис. 1. Мишени имели диаметр 40 мм и толщину 5–10 мм, использовался цилиндрический ударник диаметром 5 мм и длиной 48 мм. Скорости соударения варьировались в диапазоне 100–400 м/с, обеспечивая в областях локализации скорости деформации соответственно 3·10<sup>4</sup>–3·10<sup>5</sup> с<sup>-1</sup> (определено с помощью численного моделирования).

В ходе эксперимента в режиме реального времени на тыльной поверхности преград измерялась температура при помощи высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M. Результаты измерений представлены в табл. 1. Символом «→» в столбце «Скорость соударения» обозначены те эксперименты, в которых не происходило пробивание.

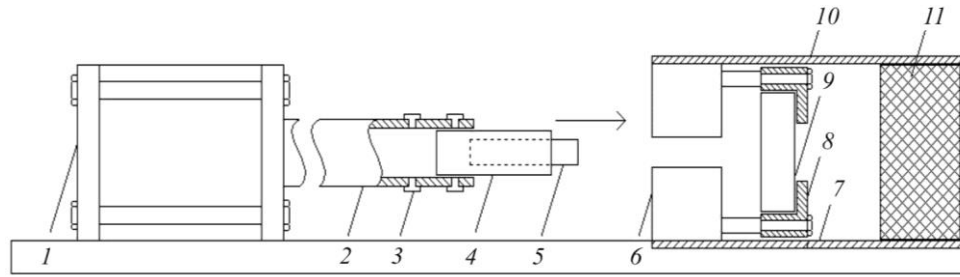


Рис. 1. Схема эксперимента по пробиванию преград: 1 – камера высокого давления; 2 – ствол; 3 – фотодатчики; 4 – поддон; 5 – ударник; 6 – отсекагель; 7 – рама; 8 – устройство для крепления мишени; 9 – мишень; 10 – приемная камера; 11 – улавливатель

Fig. 1. The experimental scheme of the obstacles penetration: 1 – high pressure chamber; 2 – barrel; 3 – photosensors; 4 – pan; 5 – projectile; 6 – shut-off device; 7 – frame; 8 – device for fixing the target; 9 – target; 10 – receiving chamber; 11 – catcher

Таблица 1

Сопоставление температур в расчете и эксперименте

Table 1

Comparison of temperatures in the calculations and experiment

№ п/п	Толщина преграды, мм	Скорость ударника, м/с	Температура в эксперименте, °С	Температура в 2D-расчете, °С	Температура в 3D-расчете, °С
1	10	390	190±21	210	230
2	10	417	260±29	230	250
3	7,5	417	340±38	350	360
4	5	390	380±42	370	380
5	5	368	300±33	330	350
6	5	208	135±15	170	190
7	5	94 (-)	49±6	60	70
8	5	172	165±19	160	170
9	5	111 (-)	53±6	70	80
10	5	161	155±18	140	150
11	5	156	165±19	140	150
12	5	161	180±20	140	150
13	5	138	145±16	100	110
14	5	111 (-)	50±6	70	80
15	5	238	230±26	210	230

## 2. Математическая модель

Существует множество моделей, описывающих деформационное поведение материалов в динамике [24–27], однако отсутствует модель, которая давала бы количественную оценку вкладов структурной релаксации и термического разупрочнения в процессе локализации пластической деформации при динамическом нагружении. Математическая модель, учитывающая влияние дефектов [20, 28], модифицированная для учета термического разупрочнения [29], использовалась в рамках настоящего исследования. Полная система полевых уравнений имеет вид

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T), \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \lambda I_1 (\mathbf{D}) \mathbf{E} + 2G (\mathbf{D} - \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \dot{\mathbf{p}}), \quad (5)$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p = \Gamma_1 \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_2 \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \Gamma_2 \boldsymbol{\sigma}_d - \Gamma_3 \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}}, \quad (7)$$

$$\rho c \dot{T} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} : \dot{\mathbf{p}}, \quad (8)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\boldsymbol{\sigma}_d : \mathbf{p}}{2G}, \quad (9)$$

$$\sqrt{\boldsymbol{\rho} : \mathbf{p}} \geq p_c \quad (10)$$

и включает: уравнения движения (1) и неразрывности (2), кинематического соотношения (3), определяющие соотношения (4–7), уравнения теплопроводности (8) в адиабатическом приближении; выражения для неравновесной свободной энергии (9) и критерия разрушения (10). Здесь приняты обозначения:  $I_1(\cdot)$  – первый инвариант тензора;  $\mathbf{E}$  – единичный тензор;  $(\cdot)^{\dot{\phantom{a}}}$  – материальная производная;  $(\cdot)^R$  – производная Грина-Нагди;  $\nabla(\cdot)$  – оператор набла;  $\rho$  – плотность материала;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений;  $\boldsymbol{\sigma}_s$  и  $\boldsymbol{\sigma}_d$  – его шаровая и девиаторная части;  $\mathbf{D}$  – тензор деформации скорости;  $\boldsymbol{\epsilon}^p$  – тензор (девиатор) пластических деформаций;  $\lambda$  и  $G$  – упругие константы материала;  $\mathbf{p}$  – тензор (девиатор) плотности микросдвигов;  $T$  – температура;  $c$  – удельная теплоемкость;  $p = \sqrt{\boldsymbol{\rho} : \mathbf{p}}$  – интенсивность  $\mathbf{p}$ ;  $F$  – свободная энергия;  $c_1, c_2, c_3, c_4, F_m, \delta$  – константы потенциала  $F$ ;  $p_c$  – критическое значение интенсивности тензора плотности микросдвигов, при котором наступает разрушение материала;  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$  – положительные кинетические коэффициенты, в общем случае завися-

щие от параметров состояния. Для сплава АМг6 параметры модели были получены в работе [28].

Для учета эффекта термического разупрочнения была предложена зависимость от температуры для кинетического коэффициента  $\Gamma_1$  из уравнения (6) в виде

$$\Gamma_1 = \Gamma_1^0 \text{Exp} \left[ \frac{U(T) - \gamma\sigma}{kT} \right], \quad (11)$$

где  $U(T)$  – характерная энергия, являющаяся функцией от температуры;  $\sigma$  – интенсивность тензора напряжений;  $\gamma$  – характерный объем;  $k$  – постоянная Больцмана. Формула (11) аналогична той, что была предложена в работах [30–31], в которой  $U(T)$  аппроксимировалась полиномом некоторой степени от температуры. В настоящем исследовании было принято следующее выражение:

$$U(T) = \frac{k}{T_c^n} T^{n+1}, \quad (12)$$

где  $T_c$  – характерная температура;  $n$  – константа, подлежащая определению. Слагаемое  $(-\gamma\sigma)$  играет существенную роль при описании ударно-волновых явлений, когда речь идет о больших амплитудах нагружения. В динамических задачах, когда напряжения невелики, а температуры существенны, им можно пренебречь.

В [32] приведены данные зависимости прочности сплава АМг6 от температуры. График изображен на рис. 2. Для аппроксимации использовалось следующее выражение:

$$\sigma_B = \sigma_B^0 \text{Exp} \left[ - \left( \frac{T}{T_c} \right)^n \right], \quad (13)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_B^0$  – начальный предел прочности.

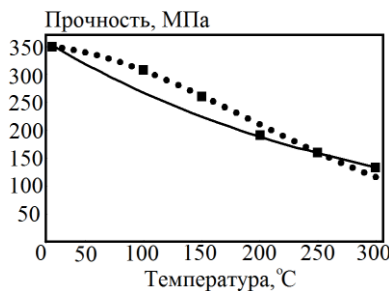


Рис. 2. Зависимость прочности сплава АМг6 от температуры: квадраты – экспериментальные данные [32], круги и сплошная линия – аппроксимация (13) при  $n = 1,9$  и  $n = 1,0$  соответственно

Fig. 2. The temperature dependence of the strength of AlMg6 alloy. Squares show the experimental data [32], circles and a solid line show the approximation (13) with  $n = 1.9$  and  $n = 1.0$ , respectively

Из рис. 2 следует, что (13) при  $n = 1,9$  дает лучшее приближение, чем при  $n = 1,0$ . Однако расчет показал, что значение  $n = 1,9$  приводит к сильной вычислитель-

ной неустойчивости. В связи с этим при превышении  $T$  значений 300 °C начинается резкое падение прочности, которое связывается с глобальной неустойчивостью численной процедуры. Поэтому было принято решение использовать  $n = 1,0$ , что приводит также к уменьшению числа констант модели.

Так как модель (1)–(10) напрямую не использует  $\sigma_B$ , то учитывать явно в уравнениях зависимость (13) нельзя. Для учета термического разупрочнения было предложено сделать зависимым от температуры один из кинетических коэффициентов (11). Для нахождения характерной температуры для аппроксимации энергии (12) была поставлена и решена задача оптимизации:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 (\tilde{\sigma}_B(\Gamma_1(T_c), T_i) - \sigma_B(T_i))^2 \rightarrow \min, \\ T_c > 0, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\tilde{\sigma}_B(\Gamma_1(T_c), T_i)$  – теоретический предел прочности при температуре  $T_i$  (которая принимает значения 20, 100, 150, 200, 250, 300 °C);  $\sigma_B(T_i)$  – экспериментальный предел прочности [32] при  $T_i$ .  $\tilde{\sigma}_B(\Gamma_1(T_c), T_i)$  в расчете определялся как напряжение, наблюдаемое при достижении интенсивности тензора плотности микросдвигов критического значения. Константа  $n$  в (12) была принята равной 1.

Результат решения задачи оптимизации (14) представлен в табл. 2. Из табл. 2 видно, что параметр  $T_c$ , идентифицированный при помощи данных о падении прочности, хорошо верифицируется при описании эффекта повышения пластичности с ростом температуры деформирования для сплава АМг6. В работе [21] было проведено экспериментальное исследование динамического предела текучести сплава АМг6 при различных скоростях деформации и температурах. Это исследование было использовано для верификации найденной характерной температуры. Сопоставление приведено в табл. 3. Можно заключить, что верификация успешно пройдена.

Таблица 2

Зависимость прочности и деформации разрушения от температуры в расчете и эксперименте для сплава АМг6

Table 2

Dependence of strength and fracture strain on temperature in the calculation and experiment for AlMg6 alloy

Температура испытания, °C	Прочность [32], МПа	Прочность в расчете, МПа	Деформация разрушения [32]	Деформация разрушения в расчете
20	350	357	0,20	0,21
100	310	306	0,25	0,28
150	260	268	0,35	0,38
200	190	211	0,45	0,44
250	160	172	0,55	0,55
300	130	136	0,60	0,60

Таблица 3

Зависимость предела текучести от температуры и скорости деформации в расчете и эксперименте для сплава АМг6

Table 3

Dependence of yield strength on temperature and strain rate in the calculations and experiment for АМg6 alloy

Температура испытания, °С	Скорость деформации, с <sup>-1</sup>	Предел текучести, МПа (эксперимент, [21])	Предел текучести, МПа (расчет)
25	520	175	176
25	1210	210	213
150	590	170	156
150	1300	195	199
250	240	153	123
250	1400	180	185

Проведена оценка зависимости других констант материала от температуры ( $\rho$ ,  $E$  (модуль Юнга),  $C_p$ ). Рассматривалось изменение указанных параметров при нагреве до 400 °С. Такой разогрев был выбран как оценка сверху для максимальных температур, реализуемых в постановках, рассматриваемых в данной работе. В результате согласно справочным данным [32] было установлено следующее изменение констант:  $\rho$  – от 2640 до 2543 кг/м<sup>3</sup> (3,7 %),  $E$  – от 71 до 66 ГПа (7 %),  $C_p$  – от 922 до 1090 Дж/(кг·К) (18 %). При этом изменение предела прочности  $\sigma_B$  – от 350 до 130 МПа (270 %) при нагреве на 300 °С. Исходя из этого была принята гипотеза о несущественном изменении плотности, модуля упругости и теплоемкости для исследуемого материала в указанном диапазоне температур, поэтому в расчетах они считались постоянными величинами.

### 3. Численное моделирование

Система полевых уравнений (1)–(10) решалась численно методом конечных элементов. Проведен вычислительный эксперимент, соответствующий экспериментально реализованной постановке. Граничные условия выбирались следующим образом: на боковой поверхности преграды были заданы нулевые перемещения по всем осям, что соответствует закреплению мишени по периметру в эксперименте. На передней и тыльной частях преграды были заданы условия свободной поверхности. В начальный момент расчета ударник прилегал к образцу, и вдоль всего его объема была задана скорость соударения, известная из эксперимента. На границе поверхностей ударника и мишени были заданы условия идеального контакта без трения.

Перед моделированием экспериментальной постановки, была проведена дополнительная верификация для критического значения интенсивности тензора плотности микросдвигов. В работе [33] проводилось экспериментальное исследование по внедрению металлического ударника в преграду в условиях «нормально-

го» соударения. При этом замерялась глубина внедрения при разных скоростях соударения. Данная постановка близка к исследуемой, поэтому она была использована для апробации модели. Результаты численного моделирования представлены в табл. 4. Погрешность находится в пределах 6 %. Таким образом, можно сделать вывод, что параметр  $p_c$  успешно верифицирован.

Таблица 4

Сравнение расчетной и экспериментальной глубины внедрения ударника в преграду

Table 4

Comparison of the calculated and experimental depth of penetration of the projectile into the target

Скорость соударения, м/с	Глубина внедрения, мм [33]	Глубина внедрения, мм (расчет)
138	3,2	3,0
234	7,0	7,2

Примеры численных расчетов процесса выбивания пробки представлены на рис. 3–5. Качественно об адекватности моделирования можно судить по форме выбиваемой пробки, которая аналогична наблюдаемой в эксперименте.

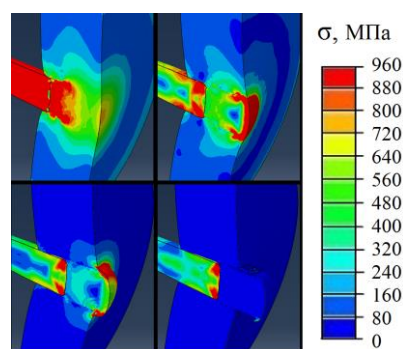


Рис. 3. Эволюция поля интенсивности тензора напряжений в процессе выноса пробки

Fig. 3. The evolution of the intensity field of the stress tensor in the process of the tube removal

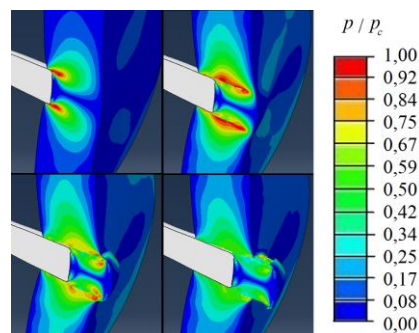


Рис. 4. Эволюция поля интенсивности тензора плотности микродефектов, отнесенная к его критическому значению в процессе выноса пробки

Fig.4. The evolution of the intensity field of the microdefect density tensor, referred to its critical value in the process of removing the plug

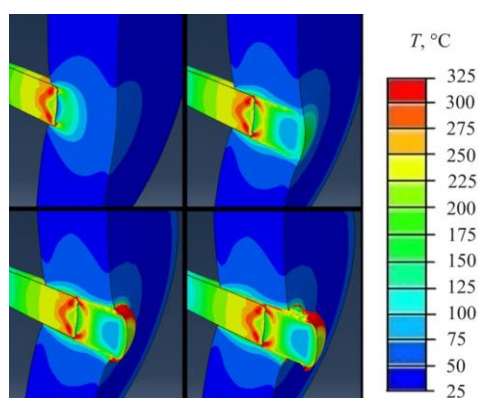


Рис. 5. Эволюция поля температуры в процессе выноса пробки

Fig. 5. The evolution of the temperature field in the process of the tube removal

Для количественной оценки адекватности модели сравнивалась температура, измеренная на тыльной поверхности преграды в эксперименте и полученная в расчете. Данные приведены в табл. 1. Моделирование проводилось в трехмерной (3D) и осесимметричной (2D) постановках. Трехмерная постановка является более приближенной к реальному эксперименту и позволяет учесть больше различных факторов (несимметричное положение ударника, угол удара и т.д.). Однако при этом двумерные расчеты занимают на порядок меньше времени и есть возможность проводить моделирование при более детальной дискретизации по пространству.

Символом « $\leftarrow$ » (напротив скорости ударника) обозначены эксперименты, в которых не произошло пробивание преграды. В расчете в этих случаях пробивание также не наблюдалось. В эксперименте № 13 наблюдалось пробивание мишени, что не подтверждалось численным расчетом. Скорость пробивания в численном расчете примерно равна 150 м/с. В эксперименте ее значение получалось ниже, однако это лишь единичный случай, по которому нельзя однозначно судить о характерной скорости пробивания при данной геометрии для данного материала. Тем не менее погрешность в ее определении составляет 8 %, что можно считать хорошим результатом, подтверждающим адекватность определения параметра  $p_c$ . Данные моделирования хорошо согласуются с данными эксперимента по полям температуры, зарегистрированным в эксперименте и тем, что были получены в расчете. Видно, что в трехмерном расчете температура получается выше. Это связано с тем, что в осесимметричной постановке присутствуют не все компоненты тензоров напряжений и скоростей деформации, определяющие интенсивность источника и, соответственно, рост температуры. Однако результаты 3D- и 2D-расчетов хорошо коррелируют между собой.

Для всех экспериментальных данных табл. 1 была проведена оценка скорости деформации и вклада температурного разупрочнения. Был проведен теоретический анализ влияния скорости деформации на величину термического разупрочнения. В ходе численных расче-

тов моделировалось деформирование образцов с различными скоростями, при этом рассчитывалась температура в процессе нагружения, и учитывалось падение прочности с ростом температуры. Вычислительный процесс проводился до наступления разрушения, согласно критерию (10). При этом фиксировалась максимальная температура и, согласно [32], соответствующее термическое разупрочнение. Результаты представлены на рис. 6. Там же для сопоставления приведены данные из табл. 1 с учетом оценки скорости деформации и вклада термического разупрочнения в сравнении со статическим пределом прочности. Разумеется, величина  $\sigma_B$  зависит от скорости деформации, но данная зависимость неизвестна.

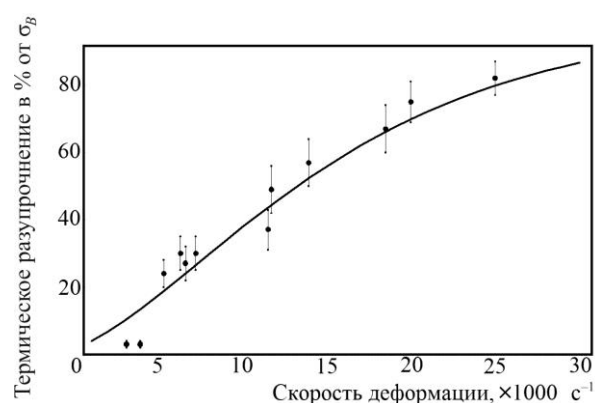


Рис. 6. Зависимость термического разупрочнения от скорости деформации: линия – теоретические данные; точки – эксперимент

Fig. 6. Dependence of thermal softening on strain rate. The line shows the theoretical data, the points show the experiment

Несоответствие первых трех точек на кривой (см. рис. 6) связано с тем, что в эксперименте в этих случаях разрушение не происходило. В остальном же видно хорошее соответствие. Проведенное исследование подтверждает результат, полученный в работе [20], согласно которому термическое разупрочнение начинает играть существенную роль в процессе локализации пластической деформации, начиная со скоростей деформации  $10^4 \text{ c}^{-1}$  (для сплава АМг6). В данном случае это утверждение подтверждается и экспериментально.

#### 4. Структурные исследования

Для исследования закономерностей формирования рельефа поверхность разрушения сканировалась на интерферометре «New View 5010», в результате чего были получены данные о рельефе от начала шероховатой зоны до тыльной поверхности образца. Примеры поверхностей разрушения изображены на рис. 7, а, 8, а, 9, а.

На поверхности разрушения всех образцов наблюдаются два типа характерных зон: зеркальная область (пример обозначен светлой прямой стрелкой на рис. 7, а), возникающая вследствие трения боковой поверхности ударника о материал образца, и шероховатая

(пример обозначен темной наклонной стрелкой на рис. 7, а), соответствующая формированию и выносу пробки. Структура шероховатой зоны не является однородной и отражает процессы эволюции дефектной структуры материала при динамическом нагружении.

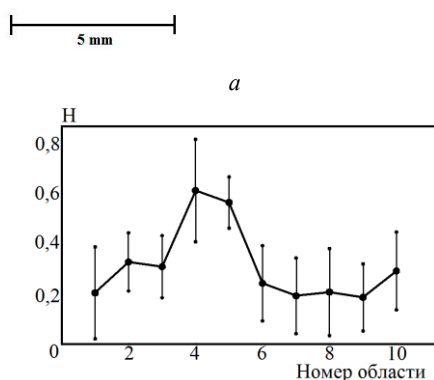
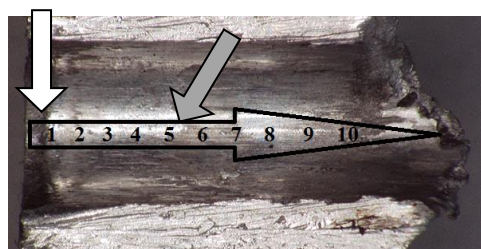


Рис. 7. Поверхность разрушения преграды толщиной 10 мм (а) и показатель Херста в различных областях (б)

Fig. 7. The fracture surface of the target with a thickness of 10 mm (a) and the Hirst exponent in various areas (b)

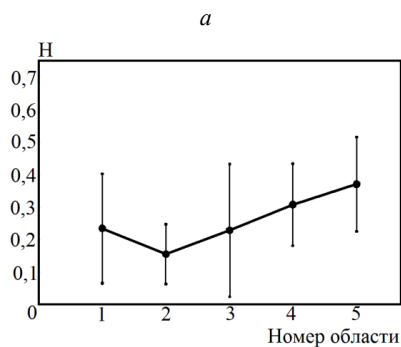
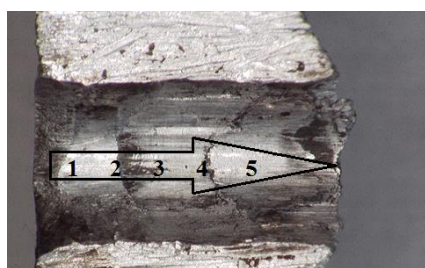


Рис. 8. Поверхность разрушения преграды толщиной 7,5 мм (а) и показатель Херста в различных областях (б)

Fig. 8. The fracture surface of the target with a thickness of 7.5 mm (a) and the Hirst exponent in various areas (b)

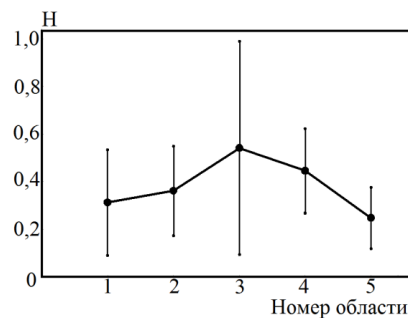
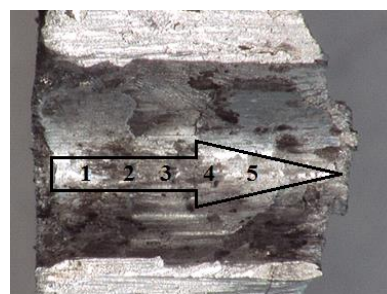


Рис. 9. Поверхность разрушения преграды толщиной 5 мм (а) и показатель Херста в различных областях (б)

Fig. 9. The fracture surface of the target with a thickness of 5 mm (a) and the Hirst exponent in various areas (b)

В каждой из отсканированных зон снималось по 10 одномерных профилей в направлении движения ударника. По одномерным профилям рельефа поверхности разрушения вычислялась функция  $K(r)$  по формуле [34, 35]

$$K(r) = \left\langle (z(x+r) - z(x))^2 \right\rangle_x^{1/2} \propto r^H, \quad (15)$$

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

Представление функции  $K(r)$  в логарифмических координатах позволяет вычислить показатель структурного скейлинга  $H$  (показатель Херста), как пространственного инварианта, определяемого постоянством наклона зависимости  $\log_2 K(r)$  от  $\log_2(r)$ .

Было обнаружено локальное понижение показателя Херста для образцов на рис. 7, б и 9, б на поверхности разрушения вблизи начала и конца формирования шероховатой зоны. Здесь параметр Херста примерно постоянен и лежит в пределах 0,3–0,4 в диапазоне масштабов от 6 до 70 мкм. Визуально шероховатая зона выглядит более матовой. При переходе ко второй области, в центре образца, на поверхности разрушения наблюдается увеличение показателя Херста: в этой области он изменяется в пределах от 0,5 до 0,6, что отражает более коррелированное поведение в более широком диапазоне масштабов от 5,5 до 144 мкм. Для образца на рис. 8 было обнаружено повышение показателя Херста до 0,48 вблизи конца пробитой зоны на масшта-

бах 46–180 мкм. Таким образом, переход от зоны локализации пластической деформации к зоне разрушения характеризуется резким увеличением показателя Херста.

## Выводы

Построенная математическая модель была успешно применена для описания процесса локализации пластической деформации и разрушения металлов при динамическом нагружении. Введенная зависимость в кинетический коэффициент (имеющий смысл обратной эффективной вязкости) позволила адекватно учесть изменение прочностных характеристик материала от температуры и термическое разупрочнение в процессе нагружения в адиабатических условиях. Предложена и апробирована методика идентификации и верификации параметра критической температуры. Теоретическое исследование вклада термического разупрочнения, подкрепленное экспериментально, позволило сделать вывод, что тепловой эффект начинает вносить существенный вклад в релаксацию напряжений лишь при скоростях деформации  $10^4 \text{ с}^{-1}$  и выше для сплава АМг6. При меньших скоростях деформации большую роль играет структурная релаксация. Построенная модель учитывает оба механизма разупрочнения и адекватно описывает

ситуации, в которых преобладает тот или иной механизм, а также характерную скорость деформации, при которой имеет место комбинированное влияние обоих факторов в процессе локализации пластической деформации. Структурные исследования шероховатости характерных зон поверхности разрушения установили резкое увеличение масштабного инварианта (показателя Херста), что соответствует более коррелированному поведению дефектов при переходе от зоны «вязкого» разрушения к зоне «квазихрупкого» разрушения.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-08-01186 а, 17-41-590149 p\_a, 17-08-00905 а) и Программы фундаментальных научных исследований УрО РАН (проект № 18-11-1-7).

## Acknowledgment

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Projects No. 18-08-01186 a, No. 17-41-590149 p\_a, No. 17-08-00905 a) and the Program of Fundamental Studies of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences (Project No. 18-11-1-7).

## Библиографический список

1. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading // *Mechanics of Materials*. – 1988. – No 7. – P. 59–71. DOI: 10.1016/0167-6636(88)90006-3
2. 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:10.1016/0022-5096(88)90012-9
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. – Vol. 17. – No. 2–3. – P. 111–134. DOI:10.1016/0167-6636(94)90053-1
4. Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy / Y. Bai, Q. Xuc, Y. Xu, L. Shen // *Mech. Mater.* – 1994. – Vol. 17. – No. 2–3. – P. 155–164. DOI:10.1016/0167-6636(94)90056-6
5. Scudino S. Mechanism of shear banding during cold rolling of a bulk metallic glass // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 773. – P. 883–889. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.302
6. Shear band formation and wear mechanisms of Ti-6Al-4V powder metallurgy materials with different densities / F.J. Sun, S.G. Qu, F. Su, Z.H. Deng, X.Q. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93. – No. 9–12. – P. 4429–4437. DOI: 10.1007/s00170-017-0939-0
7. Dorothy H.L., Longere P. Modelling of high strain rate adiabatic shear banding induced failure: A comparison of two approaches // *International Journal of Impact Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 219–227. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.024
8. Arriaga M., Waisman H. Combined stability analysis of phase-field dynamic fracture and shear band localization // *International Journal of Plasticity*. – 2017. – Vol. 96. – P. 81–119. DOI: 10.1016/j.jiplas.2017.04.018
9. Strain gradient drives shear banding in metallic glasses / Z.L. Tian, Y.J. Wang, Y. Chen, L.H. Dai // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 97. – No. 9. – P. 094103. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.094103
10. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands / M. Sokovikov, D. Bilalov, V. Oborin, V. Chudinov, S. Uvarov, Y. Bayandin, O. Naimark // *Fracture and Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 10. – No. 38. – P. 296–304. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.38.40
11. Karp B., Shapira G., Rittel D. Experimental investigation of fracture under controlled stress triaxiality using shear-compression disk specimen // *International Journal of Fracture*. – 2018. – Vol. 209. – No. 1–2. – P. 171–185. DOI: 10.1007/s10704-017-0254-7
12. Wright T.W., Ravichandran G. Canonical aspects of adiabatic shear bands // *International Journal of Plasticity*. – 1997. – Vol. 13. – No. 4. – P. 309–325.
13. Molinari A., Clifton R.J. Analytical characterization of shear localization in thermoviscoplastic materials // *J. Appl. Mech.* – 1987. – Vol. 54. – P. 806–812.
14. Temperature Rise Associated with Adiabatic Shear Band: Causality Clarified / Y.Z. Guo, Q.C. Ruan, S.X. Zhu, Q. Wei, H.S. Chen, J.A. Lu, B. Hu, X.H. Wu, Y.L. Li, D.N. Fang // *Physical Review Letters*. – 2019. – Vol. 122. – No. 1. – P. 015503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.015503
15. Rittel D, Landau P., Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – No. 101. – P. 165501.
16. Zhang L.H., Rittel D., Osovski S. Thermo-mechanical characterization and dynamic failure of near alpha and near beta titanium alloys // *Materials Science and Engineering A-Structural*



Materials Properties Microstructure and Processing. – 2018. – Vol. 729. – P. 94–101. DOI: 10.1016/j.msea.2018.05.007

17. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? // *Mech. Mater.* – 1994. – Vol. 17. – No. 2–3. – P. 261–271.

18. Многомасштабные механизмы структурной релаксации и разрушения в условиях адиабатического сдвига / С. Froustey, О.Б. Наймарк, И.А. Пантелеев, Д.А. Билалов, А.Н. Петрова, Е.А. Ляпунова // *Физическая мезомеханика.* – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 33–44.

19. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации / М.А. Соковиков, Д.А. Билалов, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.А. Плехов, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк // *Письма в Журнал технической физики.* – 2014. – Т. 40, № 23. – С. 82–88.

20. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу / Д.А. Билалов, М.А. Соковиков, 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

21. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг-6 при нормальной и повышенной температурах / Б.Л. Глушак, О.Н. Игнатова, В.А. Пушков, С.А. Новиков, А.С. Гирин, В.А. Синицын // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2000. – Т. 41, № 6. – С. 139–143.

22. Релаксационная модель сдвиговой прочности пяти металлов (алюминий, бериллий, медь, тантал, уран) / Б.Л. Глушак, О.Н. Игнатова, С.С. Надежин, В.А. Раевский // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов.* – 2012. – № 2. – С. 25–36.

23. Скрипняк Н.В. Особенности разрушения алюминий-магниевого сплава амгб при высокоскоростной деформации // *Изв. высш. учеб. заведений. Физика.* – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 96–101.

24. Мерзиевский Л.А. Модели деформирования при интенсивных динамических нагрузках (обзор) // *Физика горения и взрыва.* – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 144–160.

25. Jin T., Mourad H.M., Bronkhorst C.A. A comparative study of shear band tracking strategies in three-dimensional finite elements with embedded weak discontinuities // *Finite Elements in Analysis and Design.* – 2019. – Vol. 155. – P. 11–31. DOI: 10.1016/j.finel.2018.11.001

## References

1. Giovanola H. Adiabatic shear banding under pure shear loading. *Mechanics of Materials*, 1988, no 7, pp. 59–71. DOI:10.1016/0167-6636(88)90006-3

2. A. Marchand, J. Duffy 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

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, vol. 17, no 2-3, pp. 111–134. DOI:10.1016/0167-6636(94)90053-1

4. 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, vol. 17, no 2-3, pp. 155–164. DOI:10.1016/0167-6636(94)90056-6

5. Scudino S. Mechanism of shear banding during cold rolling of a bulk metallic glass. *Journal of Alloys and Compounds.*, 2019, vol. 773, pp. 883–889. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.302

26. Nieto-Fuentes J.C., Rittel D., Osovski S. On a dislocation-based constitutive model and dynamic thermomechanical considerations // *International Journal of Plasticity.* – 2018. – Vol. 108. – P. 55–69. DOI: 10.1016/j.ijplas.2018.04.012

27. Lovinger Z., Rittel D., Rosenberg Z. Modeling spontaneous adiabatic shear band formation in electro-magnetically collapsing thick-walled cylinders // *Mechanics of Materials.* – 2018. – Vol. 116. – P. 130–145. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.01.010

28. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении / Д.А. Билалов, М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, В.А. Оборин, Ю.В. Баяндин, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 319–328. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.3.27

29. Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // *Вычислительная механика сплошных сред.* – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323–334. DOI: 10.7242/1999-6691/2018.11.3.24

30. Интерполяционные формулы зависимости максвелловской вязкости некоторых металлов от интенсивности касательных напряжений и температур / С.К. Годунов, А.Ф. Демчук, Н.С. Козин, В.И. Мали // *ПМТФ.* – 1974. – № 4. – С. 114–118.

31. Мерзиевский Л.А. Моделирование релаксационных эффектов в ударно-волновых процессах в конденсированных средах // *Омский научный вестник.* – 2015. – № 3 (143). – С. 325–328.

32. Машиностроение. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под общ. ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.

33. Астанин В.В., Галиев Ш.У., Иващенко К.Б. Численно-экспериментальное исследование упругопластического взаимодействия ударника с преградой // *Проблемы прочности.* – 1987. – № 11. – С. 97–100.

34. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // *J. Phys. Condens. Matter.* – 1997. – Vol. 9. – P. 4319–4344.

35. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМгб при усталостном и динамическом нагружении / В.А. Оборин, М.В. Банников, Ю.В. Баяндин, М.А. Соковиков, Д.А. Билалов, О.Б. Наймарк // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* – 2015. – № 2. – С. 116–126. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.07

6. Sun F.J., Qu S.G., Su F., Deng Z.H., Li X.Q. Shear band formation and wear mechanisms of Ti-6Al-4V powder metallurgy materials with different densities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, 2017, vol. 93, no. 9–12, pp. 4429–4437. DOI: 10.1007/s00170-017-0939-0

7. Dorothy H.L., Longere P. Modelling of high strain rate adiabatic shear banding induced failure: A comparison of two approaches. *International Journal of Impact Engineering.*, 2017, vol. 110, pp. 219–227. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.024

8. Arriaga M., Waisman H. Combined stability analysis of phase-field dynamic fracture and shear band localization. *International Journal of Plasticity.*, 2017, vol. 96, pp. 81–119. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.04.018

9. Tian Z.L., Wang Y.J., Chen Y., Dai L.H. Strain gradient drives shear banding in metallic glasses. *Physical Review B.*, 2017, vol. 97, no. 9, pp. 094103. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.094103

10. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Y., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands. *Fracture and structural integrity.*, 2016, vol. 10, no. 38, pp. 296-304. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.38.40
11. Karp B., Shapira G., Rittel D. Experimental investigation of fracture under controlled stress triaxiality using shear-compression disk specimen. *International Journal of Fracture.*, 2018, vol. 209, no. 1-2, pp. 171-185. DOI: 10.1007/s10704-017-0254-7
12. Wright T. W., Ravichandran G. Canonical aspects of adiabatic shear bands. *International Journal of Plasticity.*, 1997, vol. 13, no 4, pp. 309-325.
13. Molinari, A., Clifton, R. J. Analytical characterization of shear localization in thermoviscoplastic materials. *J. Appl. Mech.*, 1987, vol. 54, pp. 806-812.
14. Guo Y.Z., Ruan Q.C., Zhu S.X., Wei Q., Chen H.S., Lu J.A., Hu B., Wu X.H., Li Y.L., Fang D.N. Temperature Rise Associated with Adiabatic Shear Band: Causality Clarified. *Physical Review Letters.*, 2019, vol. 122, no. 1, pp. 015503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.015503
15. Rittel D, Landau P., and Venkert A. Dynamic recrystallization as a potential cause for adiabatic shear failure. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, no. 101, pp. 165501.
16. Zhang L. H., Rittel D., Osovski S. Thermo-mechanical characterization and dynamic failure of near alpha and near beta titanium alloys. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing.*, 2018, vol. 729, pp. 94-101. DOI: 10.1016/j.msea.2018.05.007
17. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion? *Mech. Mater.*, 1994, vol. 17, no 2-3, pp. 261-271.
18. Froustey C., Naimark O.B., Pantelev I.A., Bilalov D.A., Petrova A.N., Lyapunova E.A. Multiscale structural relaxation and adiabatic shear failure mechanisms. *Physical Mesomechanics.*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 31-42. DOI: 10.1134/S1029959917010039
19. Sokovikov M.A., Bilalov D.A., Chudinov V.V., Uvarov S.V., Plekhov O.A., Terekhina A.I., Naimark O.B. nonequilibrium transitions in ensembles of defects attributed to dynamic localization of plastic deformation. *Technical Physics Letters.*, 2014, vol. 40, no. 12, pp. 1075-1077. DOI: 10.1134/S1063785014120128
20. 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 dynamic loading of specimens in condition close to a pure shear. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.*, 2018, vol. 59, no 7, pp. 1179-1188. DOI: 10.1134/S0021894418070027
21. Glushak B.L., Ignatova O.N., Pushkov V.A., Novikov S.A., Girin A.S., Sinitsyn V.A. Dynamic Deformation of Aluminum Alloy AMg-6 at normal and Higher Temperatures. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.*, 2000, vol. 41, no. 6, pp. 1083-1086.
22. Glushak B.L., Ignatova O.N., Nadyozhin S.S., Raevskij V.A. Relaksacionnaya model' sdvigovoj prochnosti pyati metallov (aluminij, berillij, med', tantal, uran) [Relaxation model of shear strength of five metals (aluminum, beryllium, copper, tantalum, uranium)]. *Problems of atomic science and technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes.*, 2012, no. 2, pp. 25-36.
23. Skripnyak N.V. The features of fracture behavior of an aluminum-magnesium alloy AMg6 under high-rate straining. *Russian Physics Journal.*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 691-697. DOI: 10.1007/s11182-015-0552-3
24. Merzhievskii L.A. Deformation models under intense dynamic loading (Review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves.*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 269-283. DOI: 10.1134/S0010508215020100
25. Jin T., Mourad H.M., Bronkhorst C.A. A comparative study of shear band tracking strategies in three-dimensional finite elements with embedded weak discontinuities. *Finite Elements in Analysis and Design.*, 2019. vol. 155, pp. 11-31. DOI: 10.1016/j.finel.2018.11.001
26. Nieto-Fuentes J. C., Rittel D., Osovski S. On a dislocation-based constitutive model and dynamic thermomechanical considerations. *International Journal of Plasticity.*, 2018, vol. 108, pp. 55-69. DOI: 10.1016/j.ijplas.2018.04.012
27. Lovinger Z., Rittel D., Rosenberg Z. Modeling spontaneous adiabatic shear band formation in electro-magnetically collapsing thick-walled cylinders. *Mechanics of Materials.*, 2018, vol. 116, pp. 130-145. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.01.010
28. Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Oborin V.A., Bayandin Y.V., Terekhina A.I., Naimark O.B Studying plastic shear localization in aluminum alloys under dynamic loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.*, 2016, vol. 57, no 7, pp. 1217-1225. DOI: 10.1134/S0021894416070038
29. Bilalov D.A., Bayandin YU.V., Najmark O.B. Matematicheskoe modelirovanie processa razrusheniya splava AMg2.5 v rezhime mnogo- i gigaciklovoj ustalosti [Mathematical modeling of failure process of AlMg2.5 alloy during high- and very high cycle fatigue]. *Computational continuum mechanics.*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 323-334. DOI: 10.7242/1999-6691/2018.11.3.24
30. Godunov S.K., Demchuk A.F., Kozin N.S., Mali V.I. Interpolation formulas for maxwell viscosity of certain metals as a function of shear-strain intensity and temperature. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1974, vol. 15, no. 4, pp. 526-529. DOI: 10.1007/2FBF00864733
31. Merzhievskij L.A. Modelirovanie relaksacionnyh ehffektov v udarno-volnovykh processah v kondensirovannyh sredah [Simulation of relaxation effects in shock-wave processes in condensed media]. *Omsk Scientific Bulletin.*, 2015, no. 3 (143), pp. 325-328.
32. Mashinostroenie. Entsiklopediya. Tsvetnye metally i splavy. Kompozitsionnye metallicheskie materialy [Mechanical Engineering. Encyclopedia. volume II-3: non-ferrous metals and alloys. Composite metallic materials]. Moscow: Mashinostroenie, 2001. 880 p.
33. Astanin V.V., Galiev SH.U., Ivashchenko K.B. CHislenno-ehksperimental'noe issledovanie uprugoplasticheskogo vzaimodejstviya udarnika s pregradoj [Numerical-experimental study of elastoplastic interaction of a projectile with a target]. *Problems of plasticity.*, 1987, no. 11, pp. 97-100.
34. Bouchaud E. Scaling properties of cracks. *J. Phys. Condens. Matter.*, 1997, vol. 9, pp. 4319-4344.
35. Oborin V.A., Bannikov M.V., Bayandin Yu.V., Sokovikov M.A., Bilalov D.A., Najmark O.B. Fractal analysis of fracture surface of aluminum alloy AMg6 under fatigue and dynamic loading. *PNRPU Mechanics Bulletin.*, 2015, no. 2, pp. 116-126. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.07