



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.11

УДК 539.3

СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Г.Г. Савенков^{1,2}, А.В. Кузнецов², А.М. Брагов³,
А.Ю. Константинов³, А.К. Ломунов³

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, Россия

²Машиностроительный завод «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

³Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 3 июня 2016 г.

Принята: 10 сентября 2016 г.

Опубликована: 30 сентября 2016 г.

Ключевые слова:

динамическая прочность,
фрактальная размерность,
скорость деформации,
структура, разрезной
стержень Гопкинсона

АННОТАЦИЯ

Известно, что разрушению твёрдых тел, в том числе хрупких и квазихрупких, в поле внешних сил предшествует появление некоторой плотности дефектов кристаллического строения. Коллективные движения таких дефектов в кооперативном взаимодействии со структурой материала на разных масштабных структурных уровнях (от нано- до макро-) и определяют процесс разрушения. По сути, разрушение есть заключительная стадия пластической деформации твёрдых тел. За последние два-три десятилетия установлено, что профиль и поверхность динамически разрушаемых материалов являются фрактальными объектами. В работе были проведены исследования, направленные на возможное использование фрактальной размерности в качестве характеристики, позволяющей связать между собой различные параметры процессов разрушения и динамических свойств материалов.

Лабораторные образцы трёх сплавов, используемых для трубопроводной судовой арматуры, подвергались ударному растяжению, и проводились структурные исследования разрушенных образцов. Эксперименты выполнены по методу Кольского с применением разрезного стержня Гопкинсона при скоростях деформации от 10^3 до $3 \cdot 10^5$ с⁻¹. Исследованы свойства титана 3М, нержавеющей стали 08X18H10T и бронзы марки БрАЖНМц. Получены динамические диаграммы деформирования, определены прочностные свойства и предельные характеристики пластичности. Установлено, что разрушению образцов предшествовали акты микропластической деформации в пределах активационного объёма, не превосходящего объём зерна исследуемого материала. В условиях высокоскоростного нагружения повреждение материала реализуется последовательно с участием дефектов кристаллического строения путём накопления и смены их пространственной организации. В качестве параметра для поиска корреляций между скоростью деформации, типом излома и механизмом структурной аккомодации предлагается использовать фрактальную размерность контура поверхности разрушения образцов динамически нагруженного материала. В том числе продемонстрированы возможности применения фрактальной размерности при ранжировании свойств материалов.

© ПНИПУ

© Савенков Георгий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: sav-georgij@yandex.ru
Кузнецов Александр Викторович – кандидат технических наук, e-mail: avkuznecov@armalit1.ru
Брагов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, e-mail: bragov@mech.unn.ru
Константинов Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: constantinov.al@yandex.ru
Ломунов Андрей Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: lomunov@mech.unn.ru

Georgy G. Savenkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sav-georgij@yandex.ru
Alexander V. Kuznetsov – PhD in Technical Sciences, e-mail: avkuznecov@armalit1.ru
Anatoly M. Bragov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: bragov@mech.unn.ru
Alexander Yu. Konstantinov – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: constantinov.al@yandex.ru
Andrey K. Lomunov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: lomunov@mech.unn.ru

STRUCTURAL GEOMETRICAL TRANSITIONS UNDER DYNAMIC LOADING OF MATERIALS

G.G. Savenkov¹, A.V. Kuznetsov², A.M. Bragov³,
A.Yu. Konstantinov³, A.K. Lomunov³

¹St. Petersburg Technological Institute (technical university), St. Petersburg, Russian Federation

²Machine Building Plant “Armalit”, Saint-Petersburg, Russian Federation

³Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 3 June 2016

Accepted: 10 September 2016

Published: 30 September 2016

Keywords:

dynamic strength,
fractal dimension,
the strain rate,
the structure,
split Hopkinson bar

ABSTRACT

It is known that the destruction of solids, including brittle and quasi-brittle ones, in the field of external forces is preceded by the appearance of a certain density of crystal structure defects. Collective movements of such defects in the cooperative interaction with the structure of the material at different scale structural levels (from nano- to macro-) define the process of destruction. In fact, the destruction is the final stage of plastic deformation of solids. Over the past two or three decades, it was found that the profile and surface of dynamically destructible materials are fractal objects. In studies which had been carried out aimed at the possible use of the fractal dimension as a characteristic that allows linking the various parameters of the processes of destruction and the dynamic properties of the materials.

Laboratory samples of the three alloys used for pipeline ship fittings were exposed to impact tensile; and then structural studies were carried out of the destroyed specimens. The experiments were performed according to the Kolsky method using a split Hopkinson bar (SHB) at strain rates from 10^3 to $3 \cdot 10^3$ s⁻¹. Properties were investigated of the 3M titanium, as well as of 08Kh18N10T stainless steel and BrAZhNMTs bronze. We obtained the dynamic stress-strain curves, strength properties and the limit characteristics of plasticity. It was found that the samples destruction was preceded by the acts of microplastic deformation within the activation volume not exceeding the volume of the material grain. Under high-speed loading the damage of material is implemented consistently with the participation of ensembles of the crystal structure defects due to accumulation and changing of their spatial organization. As a parameter for searching the correlations between the strain rate, the type of fracture and the mechanism of structural arrangement it is offered to use the fractal dimension of the contour in the fracture surface of the dynamically loaded material specimen. Also, the possibility of using the fractal dimension for the ranking of material properties was demonstrated.

© PNRPU

Введение

Разработка общей теории описания и моделирования пластического деформирования и разрушения твёрдых тел, а также развитие методологии построения определяющих уравнений механики сплошных сред в настоящее время неразрывно связаны с представлениями о нагружаемой среде как о многомасштабной нелинейной открытой динамической системе [1, 2]. В многочисленных работах (см., например, [3, 4]) установлено, что разрушению твёрдых тел, том числе хрупких и квазихрупких, в поле внешних сил предшествует появление некоторой плотности дефектов кристаллического строения (дислокаций, деформационных вакансий и др). Коллективные движения таких дефектов на разных структурных уровнях в диапазоне масштабов от нано- до макроуровней являются актами пластической деформации, и процесс разрушения, по сути, является заключительной стадией пластической деформации твёрдого тела.

Однако выявление кооперативных явлений в условиях разрушения и в большей степени динамического разрушения наталкивается на ряд трудностей экспериментального и теоретического характера. Например, непонятно, какой параметр необходимо взять за основу при поиске корреляций между скоростью деформации, типом излома и доминантным механизмом структурной аккомодации. В то же время за последние два – три десяти-

тителетия установлено, что профиль и поверхность динамически разрушаемых материалов являются фрактальными объектами [5–7]. В этом случае характеристикой поверхности излома является фрактальная размерность D_f либо его контура, либо его поверхности. В первом случае $1 < D_f < 2$, во втором – $2 < D_f < 3$.

Поэтому в настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на возможное использование фрактальной размерности в качестве характеристики, позволяющей связать между собой различные параметры процесса разрушения и динамические свойства материала. Естественно, одна характеристика поверхности излома не может дать исчерпывающего описания такого сложного процесса, как динамическое разрушение. Поверхность разрушения, сформированная ансамблем из микро-, мезо- и макродефектов при механизме разрушения даже одной физической природы, будет представлена бесконечным числом фрактальных размерностей (так называемый мультифрактальный подход [8]). Однако применение даже одной фрактальной размерности может быть, как будет показано (и неоднократно было показано одним из авторов настоящей работы (см., например, [7, 9, 10]) ниже, весьма эффективным инструментом в исследованиях материалов.

1. Материалы и методика эксперимента

Для изучения динамических свойств титанового сплава 3М, нержавеющей стали 08Х18Н10Т и бронзы БрАЖНМц 9-4-4-1 (типичные сплавы для трубопроводной судовой арматуры) применялся метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [11, 12]. Исследуемые сплавы имели следующие стандартные механические характеристики: титан 3М – $\sigma_{0,2} = 660$ МПа, $\sigma_B = 710$ МПа, $\delta_5 = 22$ %, $\psi = 36$ %; сталь 08Х18Н10Т – $\sigma_{0,2} = 270$ МПа, $\sigma_B = 595$ МПа, $\delta_5 = 59$ %, $\psi = 70$ %; бронза – $\sigma_{0,2} = 390$ МПа, $\sigma_B = 725$ МПа, $\delta_5 = 35$ %, $\psi = 18$ %; Установка и схема проведения испытаний приведены на рис. 1.

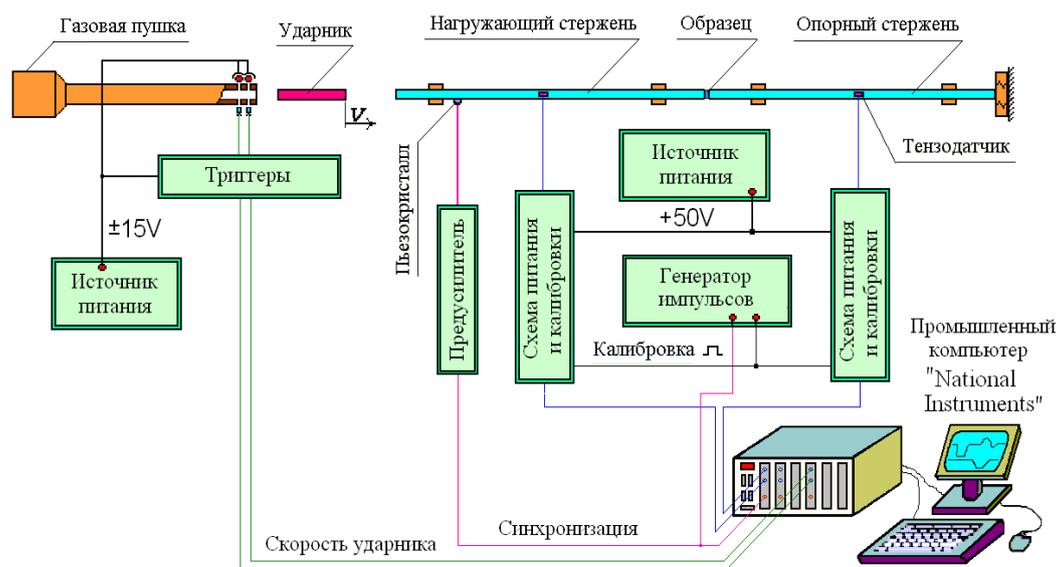


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с РСГ

Fig. 1. Scheme of an experimental setting with SHB

Вид образца для испытаний представлен на рис. 2. Диаметр рабочей части образца $d_0 = 5$ мм, длина – 10 мм, общая длина образца $l_0 = 40$ мм.

Микроструктурные исследования металлических образцов проводились с помощью световых микроскопов «Аффри» и «Аксиоверт». Размер зёрен в исследованных сплавах в исходном состоянии находился в диапазоне 20–50 мкм.

Фрактальная размерность определялась методом вертикальных сечений по длине контура разрушения образцов при разных увеличениях [13].



Рис. 2. Вид образца для испытаний с помощью РСГ

Fig. 2. Sample for testing using SHB

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты динамических испытаний, полученные с помощью РСГ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний материалов на динамическое растяжение

Table 1

Results of dynamic strain testing of materials

Материал	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	Предел текучести σ_{sd} , МПа	Предел прочности σ_{bd} , МПа	Относительное удлинение δ_d , %	Относительное сужение ψ_d , %
Титан 3М	800	775 ± 15	825 ± 25	20 ± 2,5	44 ± 1,0
	1100	725 ± 25	830 ± 10	26,5 ± 0,5	42,5 ± 0,5
	1500	810 ± 10	880 ± 20	22,5 ± 0,5	44 ± 1,0
Сталь 08X18H10T	1300	450 ± 5	925 ± 25	53 ± 0,5	65 ± 0,5
	1600	550 ± 5	975 ± 25	55 ± 0,5	64,5 ± 1,5
	2000	570 ± 5	950 ± 10	55 ± 1,5	66,5 ± 0,5
Бронза БрАЖНМц	1150	525 ± 5,0	850 ± 50	31 ± 1,0	31 ± 1,0
	1500	575 ± 15	900 ± 10	31 ± 1,0	33 ± 2,0
	1800	600 ± 5,0	950 ± 10	31 ± 0,5	32 ± 0,5

Полученные результаты динамических испытаний показали, что в исследованных диапазонах скоростей деформации ($\dot{\epsilon}$) прочностные характеристики (σ_{sd} и σ_{bd}) титанового сплава 3М, нержавеющей стали 08X18H10T и бронзы БрАЖНМц различаются **незначительно**, но отличаются (и достаточно сильно) от аналогичных значений при статических испытаниях.

Практически не отличаются с ростом скорости деформации параметры пластичности (δ_d и ψ_d) исследованных материалов. Отмеченные особенности давали основание полагать, что с ростом скорости деформации релаксационные свойства структуры не успевали аккомодировать структурные искажения, локализуя область критической повреждаемости материалов накануне акта разделения образцов на части.

Последующие фрактографические и металлографические исследования подтвердили высказанное предположение. Например, на поверхностях разрушения были зафиксированы признаки квазихрупкого разрушения в виде микротрещин расслоения и ямок – эле-

ментов поверхности разрушения чашеобразной формы, образующихся в процессе пластического течения металла (рис. 3) [14].

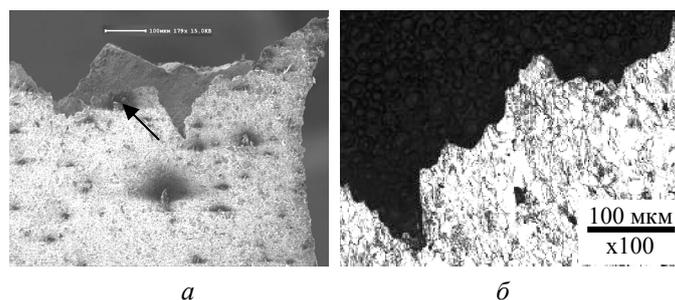


Рис. 3. Микротрещины расслоения (указаны стрелкой) в стали 08X18N10T (а);
ямки в титане 3М (б)
Fig. 3. Microcracks of delamination (arrow) in 08Kh18N10T (a) stainless steel,
holes in 3M titanium (б)

С повышением скорости деформации от 1300 до 2000 с^{-1} в зоне разрушения образцов стали 08X18N10T в структурных изменениях зафиксирована последовательность структур от неравноосных (50×10) мкм фрагментов до каналов деформации в форме полос шириной (15 ± 5) мкм и менее 5 мкм (рис. 4). То есть при увеличении скорости деформации характерный размер представительного (активационного) объема, в пределах которого происходят процессы микропластической деформации, уменьшается.

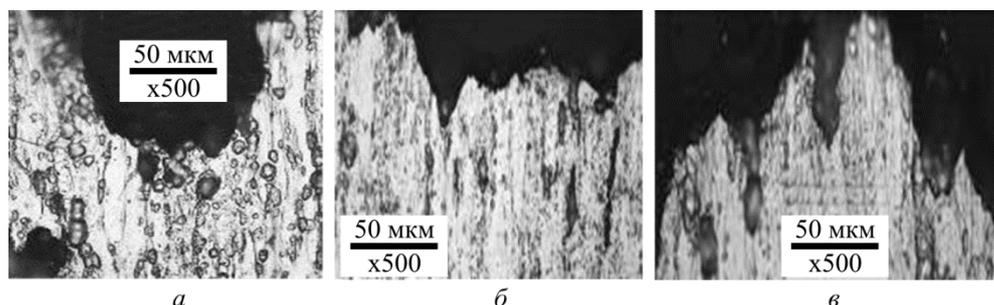


Рис. 4. Структуры стали 08X18N10T в зоне разрушения образцов:
а – 1300 с^{-1} ; б – 1600 с^{-1} ; в – 2000 с^{-1}
Fig. 4. Structures of steel 08X18N10T in the samples destruction areas:
а – 1300 с^{-1} , б – 1600 с^{-1} , в – 2000 с^{-1}

В титановом сплаве 3М с повышением скорости деформации от 800 до 1500 с^{-1} также выявлены цепочки полигонов в форме параллелепипедов размерами 30×50 мкм, структурные объекты полосового вида шириной (20 ± 5) мкм и каналы деформации шириной до ~ 13 – 15 мкм (рис. 5). Налицо тот же эффект: уменьшение размеров активационного объема с ростом скорости деформации.

Можно предположить, что в бронзе пластическая деформация осуществлялась в виде движения зеренных потоков (рис. 6). Такой механизм пластической деформации характерен для высокоскоростного нагружения и подтверждается непосредственными измерениями при помощи дифференциальной лазерной интерферометрии [15]. Данный механизм приводит к образованию каналов микромезопластической деформации, которые на микрофотографиях образцов выглядят в виде полос. Как известно, полосовая структура

характерна для мезоскопического масштабного уровня пластической деформации [16]. Можно также отметить, что поверхность разрушения для бронзы в некоторых случаях напоминала регулярные фрактальные структуры, так называемые фигуры (звёздочки) Коха [13] (рис. 7), что указывало на несомненную фрактальную геометрию поверхности. По мере увеличения скорости деформации от 1150 с^{-1} до 1800 с^{-1} ширина каналов микромезопластической деформации уменьшалась от $80\text{--}200$ до $20\text{--}30$ мкм. Между каналами микромезопластической деформации были видны микротрещины различной длины. Такие микродефекты свидетельствуют о скоростной неоднородности движения частиц среды в зоне пластического течения материала образца.

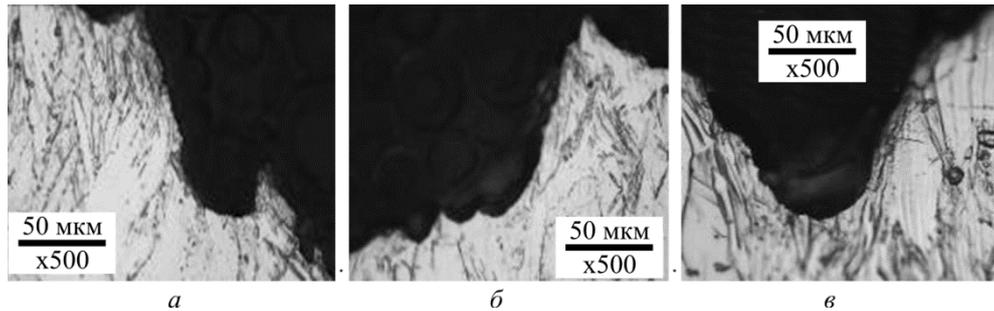


Рис. 5. Структуры титанового сплава в зоне разрушения образцов:
a – 800 с^{-1} ; *б* – 1100 с^{-1} ; *в* – 1500 с^{-1}

Fig. 5. Structures of titanium alloy in the sample destruction area:
a – 800 с^{-1} , *b* – 1100 с^{-1} , *c* – 1500 с^{-1}

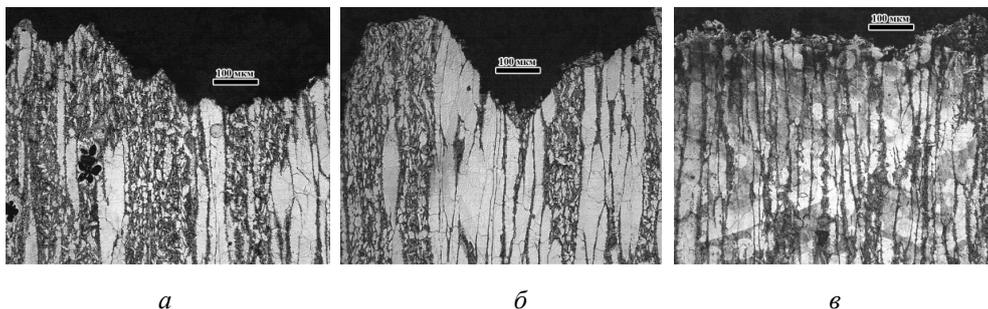


Рис. 6. Структура бронзы в зоне разрушения образцов:
a – 1150 с^{-1} , *б* – 1500 с^{-1} , *в* – 1800 с^{-1}

Fig. 6. Structure of bronze in the sample destruction area:
a – 1150 с^{-1} , *b* – 1500 с^{-1} , *c* – 1800 с^{-1}

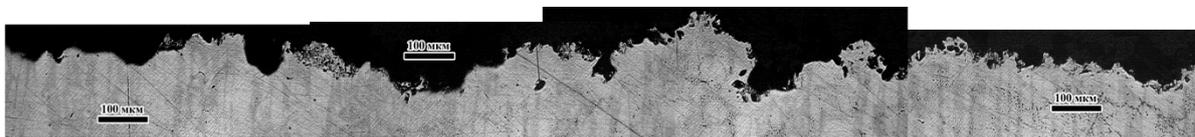


Рис. 7. Часть поверхности разрушения образца из бронзы БрАЖНМц ($\dot{\epsilon} = 1500 \text{ с}^{-1}$)

Fig. 7. Part of destruction surface made of BrAZhNMts bronze ($\dot{\epsilon} = 1500 \text{ с}^{-1}$)

Полученные результаты косвенно подтверждают концепцию Ю.И. Мещеряковым с сотрудниками о том, что в процессе динамического нагружения кроме средней скорости частиц существует и дисперсия распределения по скоростям, которая возникает в случае движения соседних участков материала с разными скоростями [17, 18]. Скоростная неод-

нородность среды может быть ответом на вопрос, который был поставлен в [19]: почему собственно фрактальны поверхности разрушения (или в чём заключается природа фрактальности поверхности разрушения)?

На основании предполагаемых структурно-геометрических переходов профили поверхностей разрушения представлены в форме самоаффинных фрактальных кривых [20]. По полученным с помощью фотографий длинам контуров поверхностей при каждом увеличении были определены фрактальные размерности D_f , значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Фрактальные динамические характеристики

Table 2

Fractal dynamic characteristics

Материал	Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, c^{-1}	Деформация образца ε_s	Предел прочности σ_{bd}^f , МПа	D_f	Относительное сужение ψ_d^f , %
Титан 3М	800	0,1	1845	1,11	64
	1100	0,12	1480	1,09	56
	1500	0,09	1290	1,06	42
Сталь 08X18H10T	1300	0,18	2175	1,23	88
	1600	0,24	1885	1,13	70
	2000	0,29	1145	1,08	52
Бронза БрАЖНМц	1150	0,17	2250	1,34	64
	1500	0,22	1850	1,23	56
	1800	0,24	1790	1,18	49

Примечания: величина используемого масштаба $x = 50$ мкм.

Отметим, что с ростом скорости деформации фрактальная размерность **незначительно** монотонно уменьшается, при этом её абсолютные значения превосходят 1 (размерность линии).

Для того чтобы проранжировать механические свойства исследуемых материалов в исследованном диапазоне скоростей при помощи найденных значений скоростей деформации, найдем связь между некоторыми характеристиками металла и D_f . Прежде определим связь между ψ_d и D_f . С этой целью запишем формальное определение относительного сужения:

$$\psi = \frac{F_0 - F_{cr}}{F_0}, \quad (1)$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения цилиндрического образца; F_{cr} – конечная площадь поперечного сечения образца после его разрыва. Подставляя в (1) значения площадей, выраженные через их диаметры, получим

$$\psi = \frac{d_0^2 - d_{cr}^2}{d_0^2}. \quad (2)$$

Здесь d_0 , d_{cr} – соответствующие диаметры образцов. Отметим, что соотношения (1) и (2) справедливы как для квазистатического нагружения, так и для динамического.

Длина (L) фрактальной линии определяется из соотношения [13]

$$L = x(L_0/x)^{D_f}, \quad (3)$$

где x – величина используемого масштаба; L_0 – расстояние между двумя рассматриваемыми точками по прямой.

Из (2) и (3) следует, что в некоторых (если не в большинстве) случаях относительное сужение будет отрицательной величиной. Такое положение является, конечно же, нелогичным и не отражает физику процесса. Понятно, что чем выше значение фрактальной размерности, тем более вязким становится характер разрушения образца. Поэтому в случае фрактальности контура поверхности разрушения формула (2) для относительного сужения должна иметь следующий вид:

$$\Psi^f = \frac{d_{cr}^2 - d_0^2}{d_{cr}^2}. \quad (4)$$

Подставим (3) в (4), в результате получим (с учётом обозначений (4))

$$\Psi^f = \frac{x^2 (d_0 / x)^{2D_f} - d_0^2}{x^2 (d_0 / x)^{2D_f}}. \quad (5)$$

В соответствии с теорией метода РСГ истинные значения напряжений связаны с текущей площадью поперечного сечения образца соотношением (записанное применительно к растяжению)

$$\sigma_s^H(t) = \sigma_s(t) \cdot (1 + \varepsilon_s(t)), \quad (6)$$

где ε_s – средняя относительная деформация образца.

Соотношение (6) является формальной зависимостью, учитывающей изменение начальной площади образца за счёт образования шейки. Однако на самом деле средняя сила P , разрывающая образец, действует на истинную площадь, которая за счёт шероховатости (изрезанности) поверхности разрушения имеет совершенно другое (большее) значение. Это увеличение площади поверхности математически можно учесть при помощи фрактальной размерности контура разрушения. Тогда истинное значение динамического предела прочности

$$\sigma_{bd}^f = \sigma_s(t) \cdot (1 + \varepsilon_s(t)) \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2, \quad (7)$$

где $d_1 = x \left(\frac{d_0}{(1 + \varepsilon_s(t))x} \right)^{D_f}$ – истинное значение диаметра в момент времени t , при котором определяется предел прочности.

Рассчитанные по зависимостям (5) и (7) значения (с учётом фрактальности площади поверхности разорванных образцов) динамического относительного сужения и динамического предела прочности σ_{bd}^f представлены в табл. 2 (значения $\varepsilon_s(t)$ взяты из диаграмм динамического деформирования образцов).

Анализ представленных в табл. 2 значений вышеуказанных характеристик для испытанных материалов показал, что получены достаточно парадоксальные результаты. А именно: пределы прочности для всех скоростей деформации выросли, хотя и не в одинаковой степени (как результат, наибольшим значением предела прочности обладают образцы, испытанные при меньшей скорости деформации), для двух скоростей деформации выросли и значения характеристики пластичности ψ .

Также необходимо отметить, что характеристики металла при разных скоростях деформации (в достаточно небольшом диапазоне их изменения) стали существенно более отличимы друг от друга. Таким образом, **незначительные** изменения двух параметров (механических характеристик и фрактальной размерности) приводят к **значительным** изменениям окончательных значений механических характеристик (предела прочности и относительного сужения).

В целом по результатам исследования установлено следующее:

1) по мере приближения к акту окончательного разрушения структурные аккомодационные процессы микропластической деформации аккумулируются в пределах активационного объема, размер которого уменьшается с ростом скорости нагружения;

2) величина активационного объёма не превосходит размеров зерна;

3) в последовательности выявленных структурных изменений пространственные размеры характерных объектов меняются пропорционально. Например, в стали как 50:15:5 ~ 3, а в титане как 30:20:13 ~ 1,5, в бронзе 100:50:25 = 2. Отмеченные особенности интерпретированы как **структурно-геометрические переходы**;

4) профили разрушенных поверхностей можно представить в виде самоаффинных фрактальных кривых. Учёт фрактальности профиля позволяет с помощью его фрактальной размерности определить истинную (эффективную) площадь поверхности разрушения и получить истинные (эффективные) значения предела прочности и относительного сужения. Получаемые значения позволяют более чётко проранжировать свойства материалов в узком диапазоне изменения скорости деформации.

И, наконец, можно предполагать, что в условиях высокоскоростного нагружения повреждение материала реализуется последовательно с участием ансамблей дефектов кристаллического строения путем накопления и смены их пространственной организации. Вероятная последовательность структурных переходов представлена на рис. 8. Вначале – у границ зёрен (рис. 8, *a*), где происходит накопление дислокаций. На втором этапе (рис. 8, *б*) образуются мультипольные структуры внутри зерна, а на третьем происходят зернограницные расслоения и/или образование каналов деформации (рис. 8, *в*). Приведенная последовательность структурных изменений характеризует релаксационные свойства деформируемой среды. При исчерпании запаса пластичности инициируется отрыв материала с образованием поверхности разрушения.

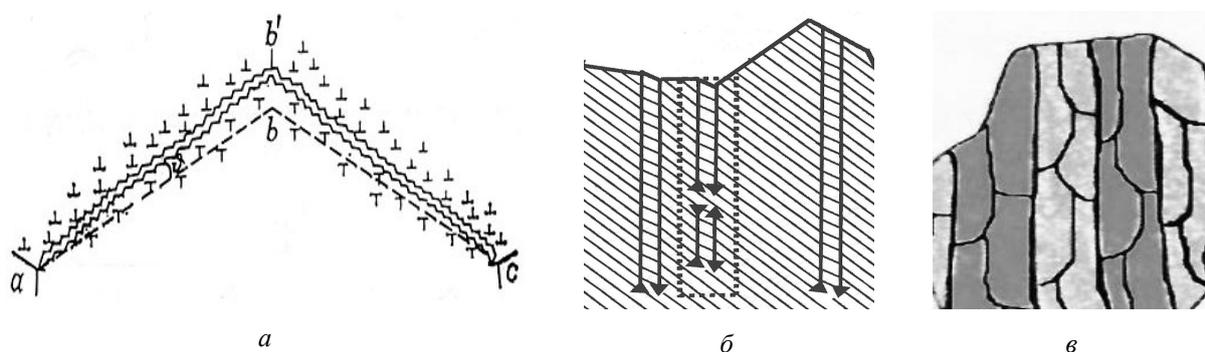


Рис. 8. Схема структурно-геометрических переходов накануне акта разрушения в последовательности: *a* – приграничные дислокационные сплетения; *б* – мультипольные образования; *в* – каналы деформации

Fig. 8. Scheme of structurally geometrical transitions before destruction in the following consequence: *a* – contour dislocation networks; *b* – multipole formations; *c* – deformation channels

Экспериментальные исследования титана и стали выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант 14-19-01096), анализ механических свойств и структурного состояния бронзы выполнен при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-38-20759).

Библиографический список

1. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов / под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с.; Т. 2. – 320 с.
2. Макаров П.В., Ерёмин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 5–26.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
4. Щербаков И.П., Куксенко В.С., Чмель А.Е. Кооперативные эффекты на микро- и наноструктурном уровнях при динамическом разрушении твёрдых тел // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 51–58.
5. Савенков Г.Г. Фрактально-кластерная модель откольного разрушения // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, вып. 12. – С. 44–48.
6. Mandelbrot B.B. fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder // Int. Journal of Fracture. – 2006. – Vol. 138. – P. 13–17.
7. Барахтин Б.К., Савенков Г.Г. Связь характеристик откола с размерностью фрактальной структуры разрушения // ПМТФ. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 61–69.
8. Колмаков А.Г. Использование положений системного подхода при изучении структуры, особенностей пластической деформации и разрушения металлов // Металлы. – 2004. – № 4. – С. 98–107.
9. Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения // ЖТФ. – 1998. – Т. 68, вып. 10. – С. 43–52.
10. Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // ПМТФ. – 2011. – Т. 52, № 6. – С. 177–184.
11. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Int. Journal of Impact Engineering. – Vol. 16. – No. 2. – P. 321–330.
12. Savenkov G.G. Mechanical Properties of Copper under Dynamic Load // Copper Alloys: Preparation, Properties and Applications / Eds. M. Naboka and J. Giordano. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 107–126.
13. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
14. РД 50-672-88. Расчёты и испытания на прочность. Классификация видов излома.
15. Лазерный дифференциальный интерферометр / Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачёв, А.М. Брагов // ЖТФ. – 1973. – Т. 49, вып. 9. – С. 194–205.
16. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
17. Мещеряков Ю.И., Диваков А.К. Интерференционный метод регистрации скоростной неоднородности частиц в упруго-пластических волнах нагрузки в твёрдых телах: препринт № 25. – Л.: ЛФИМаш, 1989. – 36 с.
18. Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Двухуровневая модель динамического деформирования металлов // ПМТФ. – 1992. – № 4. – С. 141–145.
19. Milman V.Y., Stelmashenko N.A., Blumenfeld R. Fracture surfaces: A critical review of fractal studies and novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements // Progress Material Sciences. – 1994. – Vol. 38. – P. 425–474.
20. Барахтин Б.К., Обуховский В.В. Фракталы, структура и свойства материалов // Вопросы материаловедения. – 1995. – № 1. – С. 7–17.

References

1. Fizicheskaya mezomechanika i komputernoe modelirovanie materialov [Physical mesomechanics and computer modeling of materials]. Pod.red. V.E Panina. Novosibirsk, Nauka, 1995, vol. 1, 298 p, vol. 2, 320 p.
2. Makarov P.V., Eryomin M.O. Model razrusheniya khрупkih i kvazikhрупkih materialov [Model of fracture of brittle and quasi-brittle materials]. Fizicheskaya mezomechanika (Physical Mesomechanics), 2013, vol. 16, no. 1, pp. 5-26.
3. Vladimirov V.I. Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov [The physical nature of metals fracture]. Moscow, Metallurgiya, 1984, 280 p.
4. Scherbakov I.P., Kuksenko V.S., Chmel' A.E. Cooperative effects at the micro and nano structural levels in dynamic fracture of solids. Fizicheskaya mezomechanika (Physical Mesomechanics), 2013, vol. 16, no. 1, pp. 51-58.
5. Savenkov G.G. Fractal cluster model of spalling. Technical Physics, 2002, vol. 47, is. 12, pp. 1529-1532.
6. Mandelbrot B.B. Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder. Int. Journal of Fracture, 2006, vol. 138, pp. 13-17.
7. Barakhtin B.K., Savenkov G.G. Relationship between spall characteristics and the dimension of fractal fracture structures. J. Appl.Mech.Techn.Phys, 2009, no. 6, pp. 965-971.
8. Kolmakov A.G. Using the provisions of a systematic approach in the study of the structure, the characteristics of plastic deformation and fracture of metals. Metally, 2004, no. 4, pp. 98-107.
9. Barakhtin B.K., Meshcheryakov Yu.I., Savenkov G.G. Dynamic and fractal properties of SP-28 steel under high-speed loading conditions, Technical Physics, 1998, vol. 43, is. 10, pp. 1175-1180.
10. Savenkov G.G., Barakhtin B.K. Relation of the fractal dimension of the fracture surface with a set of standard tension characteristics of the material, J. Appl.Mech.Techn.Phys. 2011, vol. 52, is. 6, pp. 997-1003.
11. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. Int. Journal of Impact Engineering, vol. 16, no. 2, pp. 321-330.
12. Savenkov G.G. Mechanical Properties of Copper under Dynamic Load. By Ed. M. Naboka and J. Giordano – Copper Alloys: Preparation, Properties and Applications, New York: Nova Science Publishers Inc., 2011, pp. 107-126.
13. Ivanova V.S. Synergetics: Strength and destruction of metallic materials. Moscow, Nauka, 1992, 160 p.
14. RD 50–672–88. Calculations and tests of strength. Classification of fracture.
15. Zlatin N.A., Mochalov S.M., Pugachev G.S., Bragov A.M. Laser differential interferometer. Soviet Physics. Technical Physics, 1974, vol. 18, is. 9, pp. 1235-1237.
16. Rybin V.V. Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov [Large plastic deformation and fracture of metals]. Moscow, Metallurgiya, 1986, 224 p.
17. Meshcheryakov Yu.I., Divakov A.K. An interference method for detecting particle velocity heterogeneity in the elastic-plastic stress waves in solids. Preprint No 25. L., LFIMash, 1989, 36 p.
18. Meshcheryakov Yu.I., Savenkov G.G. Two-level model of the dynamic deformation of metals. J. Appl. Mech. Techn. Phys, 1992, no. 4, pp. 603-606.
19. Milman V.Y., Stelmashenko N.A., Blumenfeld R. Fracture surfaces: A critical review of fractal studies and novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements. Progress Material Sciences, 1994. vol. 38, pp. 425-474.
20. Barakhtin B.K., Obukhovskiy V.V. Fractaly, struktura i svoistva materialov [Fractals, structure and properties of materials]. Voprosy materialovedeniya (Materials Questions), 1995, no. 1, pp.7–17.