

УДК 539.219.2

ВЛИЯНИЕ ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ФРАКТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА *

© 2016 г.

Кузнецов А.В.¹, Савенков Г.Г.^{1,2},
Брагов А.М.³, Константинов А.Ю.³

¹Машиностроительный завод «Армалит»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

sav-georgij@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.02.2016

Представлены результаты экспериментальных исследований динамических характеристик титана 3М при различных скоростях деформации. Данный материал находит широкое применение в судостроении, в том числе в изделиях, которые подвергаются ударным нагрузкам. Характеристики разрушения исследуемого материала получены при ударном растяжении с использованием модификации метода Кольского. После динамических испытаний образцы с изломами разрезаны вдоль оси растяжения по диаметру и определены фрактальные размерности рельефов поверхности разрушения образцов. Проведен анализ влияния скорости деформации на свойства титана и величину фрактальной размерности. Анализ результатов позволяет сделать вывод о росте как прочностных, так и деформационных (пластических) характеристик титана по отношению к статическим механическим характеристикам. Показана связь между динамическими свойствами титана и фрактальной размерностью.

Ключевые слова: скорость деформации, фрактальная размерность, динамическая прочность, экспериментальное исследование, разрушение.

Введение

Известно, что практически любые физические объекты трехмерного евклидова пространства, в том числе поверхности разрушения конструкционных материалов, обладают дробной (фрактальной) размерностью [1]. Этот факт указывает на возможность проявления во внутреннем строении исследуемого твердого тела особен-

* Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект 14-19-01096). Теоретические исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-38-20759).

ной структурной организации – самоподобия в диапазоне пространственных масштабов, при котором возникает размерное соответствие элементов структуры материала и его сопротивляемости нагрузке.

Несмотря на то, что методы фрактальной геометрии являются эффективным инструментом для изучения внутренней организации статистически неупорядоченных систем, одной из которых может выступать и поверхность разрушения – излом, играющая важную роль в практическом материаловедении, в том числе при испытаниях материалов, их применение в задачах динамической прочности ограничено анализом поверхности откола [2]. Впервые о наличии фрактальных структур на поверхности разрушения мартенситной стали было написано в статье [3] и там же была определена фрактальная размерность поверхности разрушения. В широком диапазоне масштабов ($10-10^4$ мкм) она оказалась равной $D_f \approx 2,28$. Фрактальные свойства поверхностей разрушения в металлах и сплавах изучались многими исследователями (см., например, [4, 5]).

В то же время морфология изломов конструкционных материалов представляет собой сложную систему структурно обусловленных элементов, особенности которых характерны для конкретных типов разрушения, а размеры охватывают интервал микро-, мезо- и макроскопического структурных уровней. Характеристические размеры очагов повреждаемости взаимосвязаны с пространственным распределением ансамблей дефектов в интервале масштабов через удельные (критические) критерии локальных микромеханизмов разрушения. Несомненно, что морфология и вид излома и их характеристики определяют и механические свойства материалов [6, 7].

Количественной характеристикой поверхности разрушения является величина ее пространственной размерности D_f , которая в общем случае может быть не целой (дробной или фрактальной).

Математически величина D_f определяет алгоритм заполнения объемлющего (эвклидова) пространства с помощью теоретического или найденного экспериментально элементарного структурного элемента путем многократного самоподобного его воспроизводства.

В физическом толковании величина размерности содержит информацию о метрике и способе формирования изучаемой поверхности (объекта).

Для практического применения в качестве количественного параметра величина размерности D_f характеризуется высокой чувствительностью к контуру (рельефу) излома. При тщательном приготовлении образца и корректном проведении измерений (с точностью не хуже 5%) величина D_f может служить структурно обусловленной характеристикой изменения стандартных механических свойств материалов [6, 7].

Однако для корректного выбора материала, рационального проектирования и анализа работы динамически нагруженных конструкций необходимо знание механических свойств материалов, из которых они изготовлены, при высоких скоростях деформации [8]. Соответственно весьма полезным может быть и определение фрактальной размерности контура поверхности образцов, а также сопоставление значений D_f с получаемыми динамическими характеристиками исследуемых материалов.

Настоящая статья посвящена изучению динамических свойств титана 3М при различных скоростях деформации, определению фрактальной размерности конту-

ра поверхности разрушения и выявлению взаимосвязи получаемых динамических характеристик и D_f .

Материал и методики экспериментальных исследований

В качестве материала для исследований был выбран титан марки 3М (ОСТ 1-92062-78), который находит широкое применение в судостроении, в том числе в изделиях, которые подвергаются ударным нагрузкам. Стандартные механические характеристики испытанного титана 3М следующие: $\sigma_{0,2} = 550$ МПа, $\sigma_B = 675$ МПа, $\delta_{10} = 12\%$, $\psi = 30\%$.

Экспериментальное изучение динамического поведения образцов титана 3М при разных скоростях деформации проведено с применением модификации метода Кольского на ударное растяжение (схема Николаса [9]). Чертеж образца, использованного при испытаниях, приведен рис. 1.

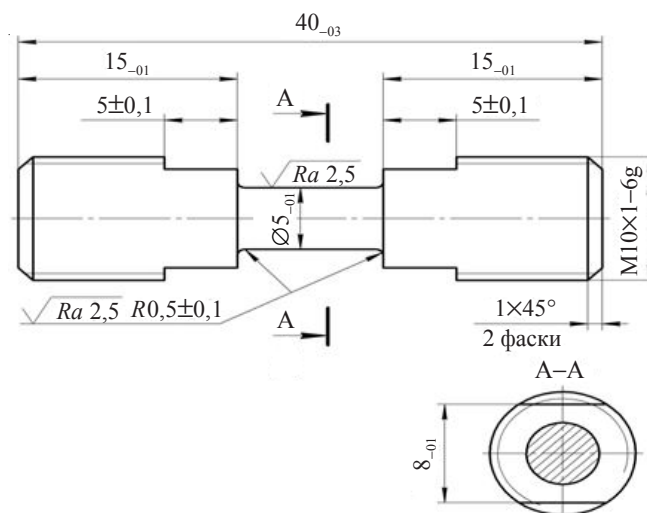


Рис. 1. Чертеж образца, использованного при испытаниях на динамическое растяжение

После динамических испытаний образцы с изломами были разрезаны вдоль оси растяжения по диаметру так, чтобы аналитические сечения (поверхности образцов, которые шлифуются, полируются и подвергаются химическому травлению для выявления структуры или дефектности образцов) были перпендикулярны изломам. В дальнейшем участки профилей поверхности разрушения рассматривались с помощью светового микроскопа «Аксиоверт» и электронного растрового микроскопа «Камскан» при увеличениях 50–500. Точность измерений зависела от выбранного масштаба и оценивалась как половина цены деления масштабной единицы измерения.

В итоге с использованием результатов измерений длины контура поверхности разрушения (фрактальной линии) L с вариацией масштаба измерений x не менее трех порядков были построены зависимости $\ln L$ от $\ln x$. Поскольку в массиве данных коэффициент корреляции составлял не менее 0,93, искомые зависимости были сглажены с помощью метода наименьших квадратов. Значения фрактальной размерности определялись с помощью метода вертикальных сечений [10] по соотношению $D_f = \ln L / \ln x$.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты испытаний на динамическое растяжение. Результаты механических испытаний образцов на одноосное растяжение по методике разрезного стержня Гопкинса (РСГ) представлены в таблице 1 ($\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, σ_{Sd} – динамический предел текучести, σ_{bd} – динамический предел прочности, δ_d – динамическое относительное удлинение, ψ_d – динамическое относительное сужение).

Таблица 1

$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	σ_{Sd} , МПа	σ_{bd} , МПа	δ_d , %	ψ_d , %
800	775±15	825±25	20±2,5	44±1
1100	725±25	830±10	26,5±0,5	42,5±0,5
1500	810±10	880±20	22,5±0,5	44±1

На рис. 2 приведены примеры полученных диаграмм деформирования образцов.

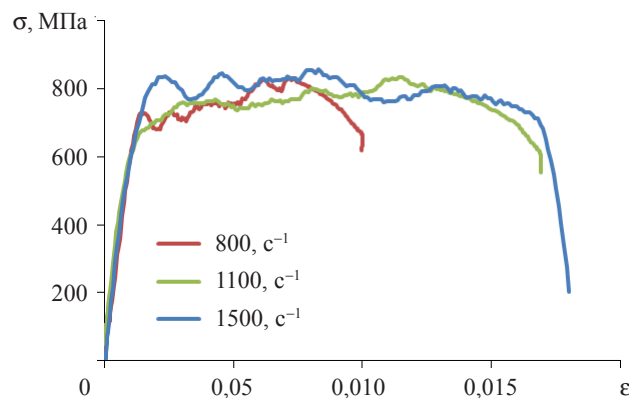


Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о росте как прочностных, так и деформационных (пластических) характеристик титана по отношению к стандартным механическим характеристикам. Если рост прочностных параметров (предела текучести и предела прочности) укладывается в традиционные представления о росте прочности с увеличением скорости деформации, то резкое повышение (приблизительно в 2 раза) характеристик деформационной способности (относительного удлинения) требует пояснений.

На наш взгляд, такое значительное изменение относительного удлинения, в первую очередь, связано с геометрическими параметрами образца, использованного в экспериментах на динамическое растяжение (см. рис. 1). Известно [11], что относительное удлинение δ при статических испытаниях зависит от начальной расчетной длины образца l_0 и начального поперечного сечения образца F_0 . Величина δ растет с увеличением значения $l_0/\sqrt{F_0}$. По действующим в нашей стране нормам при стандартных испытаниях основным соотношением для выбора размера десятикратных образцов является $l_0/\sqrt{F_0} = 11,3$. Следовательно, чтобы испытания были сопоставимы, такое же соотношение должно быть и для динамических испытаний, что невозможно в силу особенностей методики их проведения, так как это связано с распределением волновой картины в образце и в стержнях при ударе по последним. В рассматриваемом случае отношение равнялось 2,26, что, естественно, и привело

к столь высоким значениям относительного удлинения при динамических испытаниях. Отметим, что в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = (0,8 - 1,5) \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ механические свойства титана 3М оказались практически одинаковыми (см. табл. 1). Произведем ранжирование материала в указанном диапазоне скоростей деформации с помощью учета фрактальности поверхности разрушения испытанных образцов.

Определение фрактальной размерности рельефа поверхности разрушения.

В процессе исследований с помощью методов металлографии были получены при увеличениях 50–500 фотографии профилей поверхностей излома разрушенных образцов (рис. 3–5).

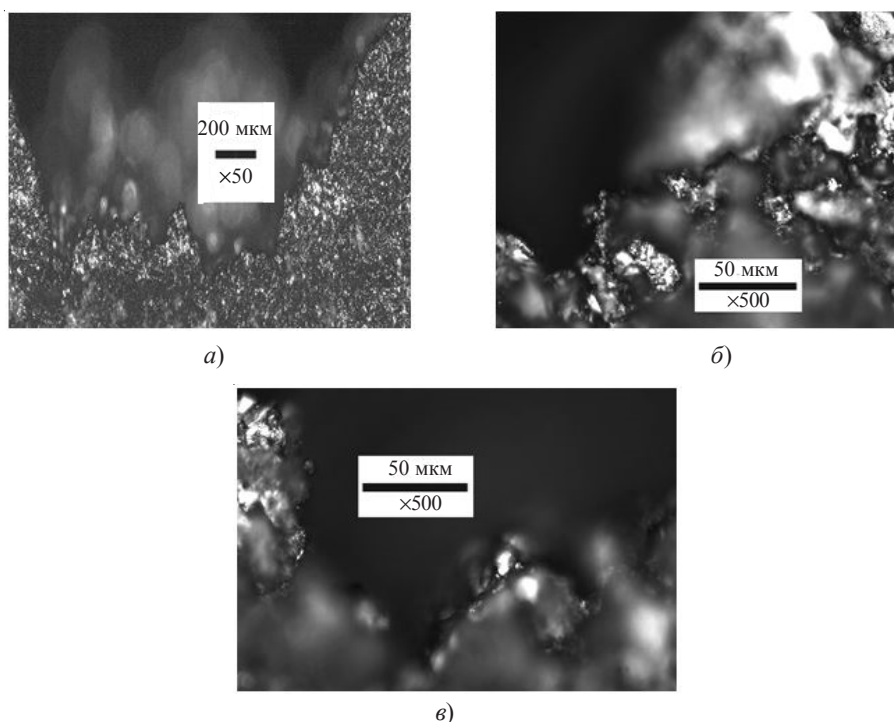


Рис. 3. Контур разрушенной поверхности образца, испытанного при $\dot{\epsilon} = 800 \text{ c}^{-1}$

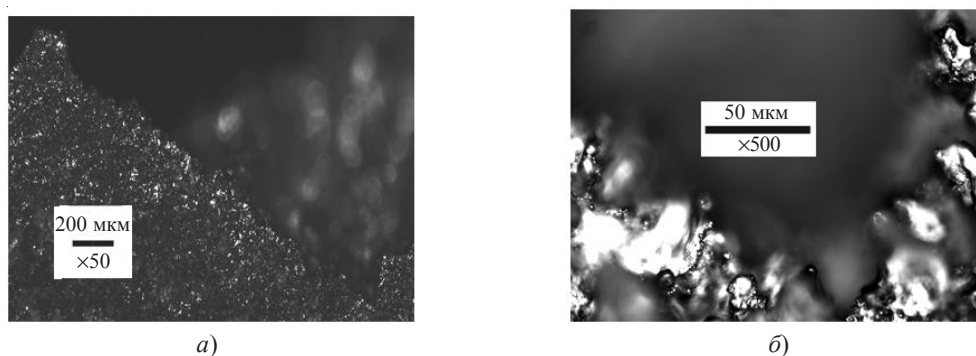


Рис. 4. Контур разрушенной поверхности образца, испытанного при $\dot{\epsilon} = 1100 \text{ c}^{-1}$

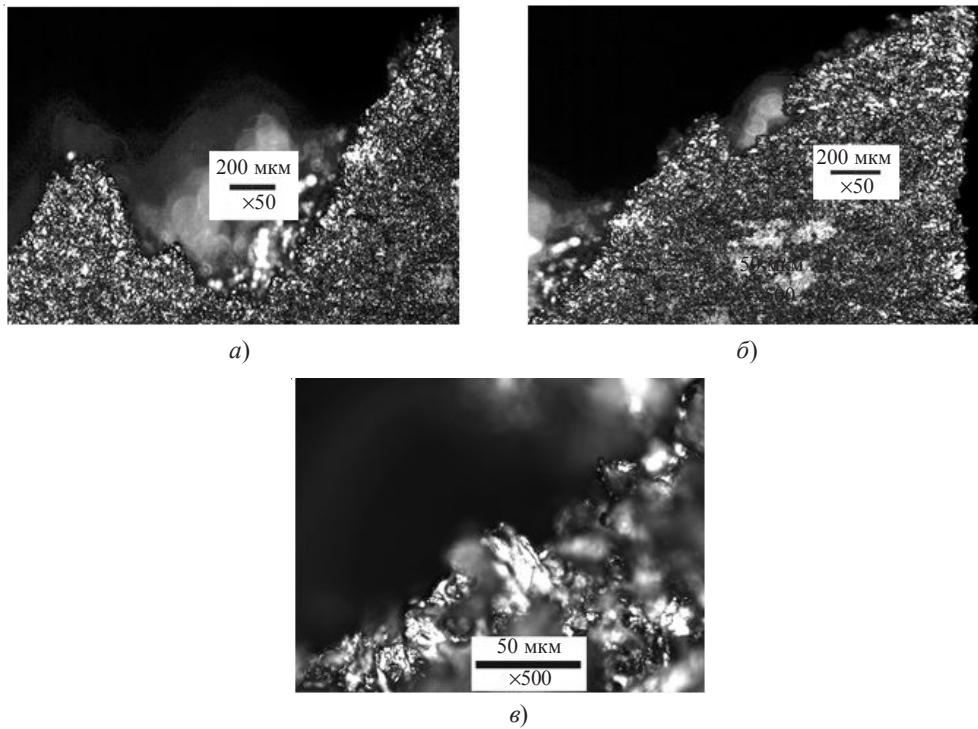


Рис. 5. Контур разрушенной поверхности образца, испытанного при $\dot{\epsilon} = 1500 \text{ c}^{-1}$

Определенные по приведенным на рисунках длинам контуров поверхностей разрушения фрактальные размерности D_f приведены в таблице 2. Можно отметить, что с ростом скорости деформации фрактальная размерность незначительно монотонно уменьшается, при этом ее абсолютные значения незначительно превосходят единицу (размерность линии).

Таблица 2

$\dot{\epsilon}, \text{c}^{-1}$	D_f	ϵ_s	$\Psi_d^f, \%$	$\sigma_{bd}^f, \text{МПа}$
800	1,11	0,10	64	1845
1100	1,09	0,12	56	1480
1500	1,06	0,09	42	1290

Для того чтобы ранжировать механические свойства титана 3М 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:

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

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.

Длина фрактальной линии определяется из соотношения [6]

$$L = x \left(\frac{L_0}{x} \right)^{D_f}, \quad (3)$$

где x – величина используемого масштаба (в нашем случае 50 мкм); L_0 – расстояние между двумя рассматриваемыми точками по прямой.

Из (2) и (3) следует, что в большинстве случаев относительное сужение будет отрицательной величиной, что конечно же, нелогично и не отражает физику процесса. Понятно, что с увеличением значения фрактальной размерности более вязким становится характер разрушения образца. Поэтому в случае фрактальности контура поверхности разрушения формула (2) для относительного сужения должна иметь следующий вид:

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

Отметим, что формула (4) справедлива как для (квази)статического, так и для динамического нагружения.

Подставим (3) в (4), в результате получим (с учетом 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 σ_s^H связаны с текущей площадью поперечного сечения образца соотношением (записанным применительно к растяжению):

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

где ε_s – средняя относительная деформация образца.

Соотношение (6) является формальной зависимостью, учитывающей изменение начальной площади образца за счет образования шейки. Однако на самом деле средняя сила P , разрывающая образец, действует на истинную площадь, которая за счет фрактальности имеет совершенно другое значение.

Исходя из этого, истинное значение динамического предела прочности будет равно

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

где

$$d_1 = x \left(\frac{d_0}{1 + \varepsilon_s(t)} \right)^{D_f}$$

– истинное значение диаметра в момент времени, при котором определяется предел прочности.

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

Анализ представленных в таблице 2 значений характеристик титана 3М показал, что получены парадоксальные результаты. А именно: пределы прочности для всех скоростей деформации выросли по сравнению с данными, приведенными в таблице 1, хотя и не в одинаковой степени (наибольшим значением предела прочности обладают образцы, испытанные при меньшей скорости деформации); для двух скоростей деформации (800 и 1100 с⁻¹) выросли и значения характеристики пластичности ψ , для $\dot{\epsilon} = 1500$ с⁻¹ значение ψ незначительно уменьшилось. Можно также отметить, что свойства металла при разных скоростях деформации (в относительно небольшом диапазоне их изменения) стали более дифференцированы.

Обстоятельства, которые привели к таким результатам, не вполне ясны. В качестве вероятных причин можно назвать небольшое количество испытаний и неоднозначность поведения титана при динамических испытаниях [12].

Выводы

1. Исследованы свойства титана 3М в диапазоне скоростей деформации от 800 до 1500 с⁻¹.
2. Все характеристики металла, определяющие его прочность и пластичность, выросли по сравнению со стандартными, однако в исследованном диапазоне скоростей деформации все они имеют приблизительно одинаковое значение.
3. Учет фрактальных свойств поверхности разрушения испытанных образцов позволил более четко разграничить свойства металла в исследованном диапазоне скоростей деформации.
4. Для проверки полученных результатов необходимы дополнительные испытания в более широком диапазоне скоростей деформации и с большим набором статистических данных.

Список литературы

1. Мандельброт Б.Б. *Фрактальная геометрия природы*. М.–Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 656 с.
2. Барахтин Б.К., Савенков Г.Г. Связь характеристик откола с размерностью фрактальной структуры разрушения. *ПМТФ*. 2009. Т. 50, № 6. С. 61–69.
3. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*. 1984. V. 48. P. 721–722.
4. Tanaka M. The fractal dimension of grain-boundary fracture in high-temperature creep of heat-resistant alloys. *J. Mater. Science*. 1993. V. 28. P. 5753–5758.
5. Milman V.Y., Stelmashenko N.A., Blumenfeld R. Fracture surfaces: a critical review of fractal studies and a novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements. *Progress in Material Science*. 1994. V. 38. P. 425–474.
6. Колмаков А.Г. Взаимосвязь мультифрактальных характеристик структур поверхности разрушения молибдена с его механическими характеристиками. *Металлы*. 1996. №6. С. 37–43.
7. 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.
8. Абрамов А.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Сергеевичев И.В.

Экспериментально-расчетный анализ высокоскоростного деформирования алюминиевого сплава АМг6. *Проблемы прочности и пластичности*. 2004. Вып. 66. С. 93–100.

9. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact. Engng.* 1995. Vol. 16, No. 2. P. 321–330.

10. Иванова В.С. *Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов*. М.: Наука, 1992. 160 с.

11. Шапошников Н.А. *Механические испытания металлов*. М.–Л.: Машгиз, 1951. 384 с.

12. Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Жегина И.Л. и др. Влияние скорости деформирования и понижения температуры на трещиностойкость металлических материалов. *ФХММ*. 1985. №6. С. 26–31.

References

1. Mandelbrot B.B. *Fraktal'naya geometriya prirody*. M.–Izhevsk: Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy, NITs “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2010. 656 s.

2. Barakhtin B.K., Savenkov G.G. Svyaz' kharakteristik otkola s razmernost'yu fraktal'noy struktury razrusheniya. *PMTF*. 2009. T. 50, №6. S. 61–69.

3. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*. 1984. V. 48. P. 721–722.

4. Tanaka M. The fractal dimension of grain-boundary fracture in high-temperature creep of heat-resistant alloys. *J. Mater. Science*. 1993. V. 28. P. 5753–5758.

5. Milman V.Y., Stelmashenko N.A., Blumenfeld R. Fracture surfaces: a critical review of fractal studies and a novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements. *Progress in Material Science*. 1994. V. 38. P. 425–474.

6. Kolmakov A.G. Vzaimosvyaz' mul'tifraktal'nykh kharakteristik struktur poverkhnosti razrusheniya molibdena s ego mekhanicheskimi kharakteristikami. *Metally*. 1996. №6. S. 37–43.

7. Savenkov G.G., Barakhtin B.K. Svyaz' fraktal'noy razmernosti poverkhnosti razrusheniya s kompleksom standartnykh kharakteristik materiala na rastyazhenie. *PMTF*. 2011. T. 52, №6. S. 177–184.

8. Abramov A.V., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Eksperimental'no-raschetnyy analiz vysokoskorostnogo deformirovaniya alyuminievogo splava АМг6. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2004. Vyp. 66. S. 93–100.

9. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact. Engng.* 1995. Vol. 16, No. 2. P. 321–330.

10. Ivanova V.S. *Sinergetika: Prochnost' i razrushenie metallicheskih materialov*. М.: Nauka, 1992. 160 s.

11. Shaposhnikov N.A. *Mekhanicheskie ispytaniya metallov*. М.–Л.: Mashgiz, 1951. 384 s.

12. Drozdovskiy B.A., Prokhodtseva L.V., Zhegina I.L. i dr. Vliyanie skorosti deformirovaniya i ponizheniya temperatury na treshchinostoykost' metallicheskih materialov. *FKhMM*. 1985. №6. S. 26–31.

THE EFFECT OF A FORMING FRACTAL FAILURE SURFACE ON THE DYNAMIC PROPERTIES OF TITANIUM

Kuznetsov A.V.¹, Savenkov G.G.^{1,2}, Bragov A.M.³, Konstantinov A.Yu.³

¹Engineering Plant ARMALIT, St. Petersburg, Russian Federation

²St. Petersburg State Technological Institute (technical university),
St. Petersburg, Russian Federation

³Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation

The results of experimentally studying the dynamic properties of 3M titanium at various strain rates are presented. This material is widely used in shipbuilding, including items subject to impact loading. Failure characteristics of the researched studied are obtained for impact tension using a

modification of Kolsky method. After dynamic tests, fractured specimens are cut along the tension axis along the diameter, and fractal dimensions of the failure surface relief are determined. Strain rate effect on the properties of titanium and on the value of fractal dimension is analyzed. The analysis of the results testifies to the increase of both strength and deformational (plastic) characteristics of titanium as compared with the static mechanic characteristics. A relation between the dynamic properties of titanium an fractal dimension is demonstrated.

Keywords: strain rate, fractal dimension, dynamic strength, experimental study, failure.