

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-119-129

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕЗОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ.
МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СТРУКТУР
РАЗРУШЕННЫХ ОБРАЗЦОВ**

© 2022 г.

**Смаковский М.С.¹, Брагов А.М.²,
Константинов А.Ю.², Кузнецов А.В.¹,
Ломунов А.К.², Савенков Г.Г.¹**

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

²Научно-исследовательский институт механики

Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

sav-georgij@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022

Представлены результаты экспериментальных исследований динамических характеристик безоловянной бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1 двух типов (в холоднокатаном и отожженном состояниях) при различных скоростях деформации. Экспериментальное определение динамических характеристик бронзы проведено с применением модификации метода Кольского на динамическое растяжение с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Проведены испытания с разными скоростями деформации до разрыва образцов. Установлено, что для обоих состояний увеличение скорости деформации приводит к значительному изменению механических характеристик. Материал после отжига показал уменьшение прочностных свойств по сравнению с исходным состоянием на 20–22%. По сравнению со статическими стандартными характеристиками возросло динамическое относительное сужение для обоих типов состояния металла, причем динамическое относительное сужение в отожженном состоянии на 18–25% превосходит сужение в холоднокатаном состоянии, то есть в отожженном состоянии бронза более пластична, что укладывается в традиционную теорию термообработки. После динамических испытаний разрушенные образцы были разрезаны вдоль центральной 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. Проведены микроструктурный анализ разрушенных образцов и мультифрактальная параметризация их структур. На основе мультифрактального анализа по параметру скрытой упорядоченности установлено, что отожженное состояние менее устойчиво к структурному фазовому переходу, чем холоднокатаное состояние. В отожженных образцах возникает большее количество возбужденных локальных областей, в которых возможен гидродинамический характер течения, и, как следствие, такие образцы более пластичны.

Ключевые слова: бронза, скорость деформации, динамическая прочность, разрыв, мультифрактальный анализ, скрытая упорядоченность.

Введение

Проблема совершенствования конструкционных материалов в судовом машиностроении требует учета специфики условий их эксплуатации. Так, распространенная в судовом арматуростроении бронза безоловянная марки БрАЖНМц 9-4-4-1 ГОСТ 18175-78, поставляемая в прутках, в ряде случаев для изменения (увеличения) различных свойств (например, пластических) подвергается той или иной термообработке.

Изделия, получаемые из прутков указанной бронзы, достаточно часто испытывают одиночные ударные нагрузки в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^3 - 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. В связи с этим требуются исследования закономерностей поведения материала под действием динамических нагрузок и изучение влияния технологических режимов на механические свойства. При этом если стандартные механические характеристики определяются сравнительно просто по ГОСТ 1497, то определение динамических характеристик на предприятиях судового машиностроения вызывает определенные трудности.

В этом случае наиболее надежным и информативным методом является модификация метода Кольского, реализуемая в рамках методики разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [1]. Методика РСГ позволяет определять различные свойства материалов именно в указанном диапазоне скоростей деформации, который входит в более широкий диапазон скоростей деформации $10^3 - 10^5 \text{ с}^{-1}$ [2]. Максимальные скорости этого диапазона реализуются с использованием метода прямого удара, метода Тейлора, метода раздачи тонкого кольца, нагружаемого электромагнитным импульсом или другими короткими импульсами микросекундной длительности [3–5].

При изучении механизмов динамического поведения материалов возникают трудности интерпретации результатов эксперимента. Они связаны с тем, что динамические процессы чаще всего происходят на промежуточном (мезоскопическом) между макроскопическим и микроскопическим структурном уровне, отвечающем масштабу внутренней структуры материала [6]. Динамические процессы, протекающие на мезоскопическом масштабном уровне, как правило, являются неравновесными, нестабильными и хаотическими [7–9], а невозможность их изучения в режиме реального времени традиционными методами налагает ограничения на объяснение указанных процессов.

Часть информации о механизмах динамического поведения материалов может дать микроструктурный анализ разрушенных образцов методами оптической и электронной микроскопии.

В условиях динамических экспериментов материальная среда каждого образца представляет собой неравновесную в термодинамическом смысле физическую многоуровневую систему с нелинейными свойствами, в которой возможные изменения структурно-механического состояния обуславливаются статистически термодинамической природой деформируемого материала, вариацией не только количественных параметров, но и симметричных свойств кристаллической структуры [10]. Поэтому важной составной частью микроструктурного анализа в последние годы стал мультифрактальный анализ [11, 12], который является эффективным инструментом для изучения и количественного описания широкого многообразия неоднород-

ных, хаотически сложных структур материалов, контуров трещин и поверхностей разрушения [7, 9, 13]. Наиболее оправданно использовать методы мультифрактального анализа для исследования структур с признаками масштабной (структурной) иерархии [14]. Мультифрактальный формализм имеет ряд преимуществ перед стандартным фрактальным формализмом, поскольку представляет информацию о локальных и о глобальных свойствах изучаемой системы [15].

Цель настоящей статьи – определение динамических характеристик бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1, мультифрактальная параметризация микроструктуры испытанных образцов в приконтактной к контуру разрушения области и исследование на ее основе роли термообработки в динамической прочности материала.

Материал и методики экспериментальных исследований

Материал

В качестве исходного полуфабриката для исследований был выбран холоднокатаный пруток диаметром 20 мм и длиной 400 мм из безоловянной алюминиевой бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1, широко применяющейся в судовом машиностроении. Стандартные механические характеристики такой бронзы в состоянии поставки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Стандартные механические характеристики бронзы БрАЖНМц 9-4-4-1

Состояние	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
Холоднокатаное	425	725	15	25
Отожженное	300	685	27	35

Пруток был разрезан на две части. Из первой части в состоянии поставки были изготовлены образцы для испытаний. Вторая часть прутка была подвергнута отжигу при температуре 800 °С в течение 3 часов. Стандартные механические характеристики отожженного прутка также представлены в таблице 1. Исходная микроструктура прутков показана на рис. 1. Микротвердость холоднокатаного прутка H_V составляла 3,3 ГПа, отожженного – 2,5 ГПа.

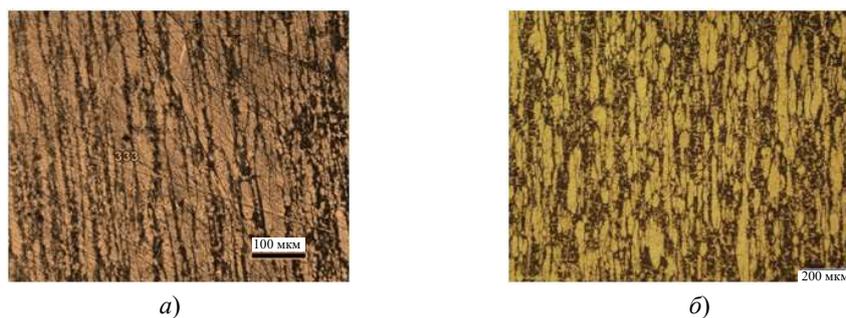


Рис. 1. Микроструктура прутков в исходном состоянии:
а) холоднокатаном; б) отожженном

Методика динамических испытаний

Экспериментальное определение динамических характеристик бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1 двух типов состояний проведено с применением модификации метода Кольского на динамическое растяжение (схема Николаса [1]) на разрезном стержне Гопкинсона диаметром 20 мм. Эскиз образца приведен на рис. 2.

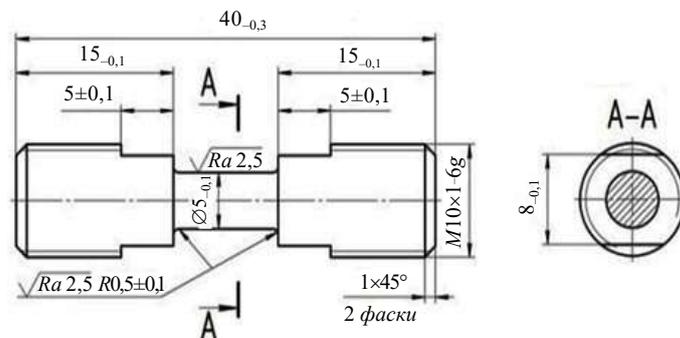


Рис. 2. Образец для испытаний

Металлография образцов

После динамических испытаний разрушенные образцы были разрезаны вдоль центральной 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. Для просмотра структур применялся световой микроскоп «Камскан» при увеличении 50–500.

Мультифрактальная параметризация микроструктур разрушенных образцов

Мультифрактальная параметризация (МФП) – численная обработка изображений структур – выполнялась методами цифровой металлографии с применением программных пакетов «Эксперт Про» и «Фрактал» [16].

Из статистического набора МФП в настоящем исследовании использованы два: пространственная размерность объекта D_0 и скрытая упорядоченность Δ .

Первый параметр D_0 , чувствительный к рельефу границ зерен, характеризует извилистость (рельефность) контуров областей, выделенных для анализа. С точки зрения металлографии D_0 является характеристикой бинарной (черно-белой) картины (отображения) реальной структуры. Этот параметр является однородным фракталом из спектра размерностей Реньи D_q при $q = 0$. В математическом анализе аналогом этой величины является нулевой член разложения. Заметим, что поскольку фотография структуры представляет собой двумерную проекцию реального объекта, то в этом случае фрактальная размерность D_0 не может превышать 2.

Скрытая упорядоченность $\Delta = D_1 - D_q$ (D_1 – информационная размерность, характеризующая скорость роста информации; D_q – обобщенная энтропия (размерности) Реньи) определяет статистическую оценку симметрии бинарных объектов с учетом их взаимного расположения. Чем больше (по модулю) величина Δ , тем более упорядочена структура, то есть в ней становится больше периодической составляющей. Стремление Δ к нулю свидетельствует о нарастании хаоса в системе точек отображения и является признаком наступления структурного фазового перехода (СФП) в строении реального материала ($\Delta = 0$ означает, что СФП произошел).

Результаты динамических испытаний и их анализ

Результаты динамических испытаний образцов на растяжение по методике РСГ представлены в таблице 2, примеры диаграмм нагружения – на рис. 3.

Таблица 2

Динамические характеристики бронзы БрАЖНМц 9-4-4-1

Состояние	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	σ_{sd} , МПа	σ_{bd} , МПа	δ_d , %	ψ_d , %
Холоднокатаное	1150	525±5,0	850±50	31±1,0	31±1,0
	1500	575±15	900±10	31±1,0	33±2,0
	1800	530±5,0	950±10	31±0,5	32±0,5
Отожженное	915	480±5	665±15	30±1,0	39±2,5
	1475	610±10	710±20	29,5±0,5	39±1,0
	1620	590±20	800±10	31,5±0,5	37,5±0,5
	1750	505±15	695±55	31±1,0	40±3,0

В таблице обозначены: $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; σ_{sd} – динамический предел текучести; σ_{bd} – динамический предел прочности; δ_d – динамическое относительное удлинение; ψ_d – динамическое относительное сужение.

На рис. 3 сплошными линиями показаны характерные диаграммы деформирования в координатах истинное напряжение–истинная деформация, полученные для двух исходных состояний, а штриховыми линиями в нижней части графика – соответствующие зависимости изменения скорости деформации.

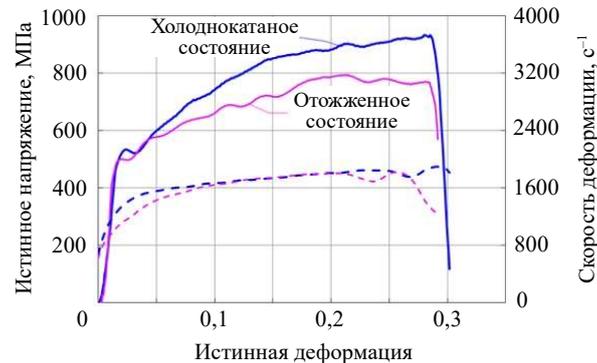


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов в двух исходных состояниях при скорости деформации ~ 1800 с⁻¹

Анализ представленных в таблицах 1 и 2 результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

1. По сравнению со статическими стандартными характеристиками увеличились характеристики прочности (предел текучести вырос практически в два раза; предел прочности – на 15–30% для холоднокатаного состояния и до 15% для отожженного состояния). Также возросло динамическое относительное сужение для обоих типов состояния металла (относительное удлинение не подлежит сравнению ввиду разной рабочей длины образцов), что указывает на рост пластичности при динамическом нагружении. Однако такой результат не совсем укладывается в традиционные представления о том, что рост скорости деформации приводит к охрупчиванию материалов. Но можно отметить, что существуют металлические сплавы, которые не отвечают таким представлениям [17]. По мнению авторов статьи [17], это зависит от ос-

новы сплава, его химического и фазового состава, а также от структурного состояния.

2. Динамический предел прочности в холоднокатаном состоянии на ~20% превосходит динамический предел прочности в отожженном состоянии, а пределы текучести приблизительно равны, так же как и относительные удлинения. Однако динамическое относительное сужение в отожженном состоянии на 18–25% превосходит сужение в холоднокатаном состоянии, то есть в отожженном состоянии бронза более пластична, что укладывается в традиционную теорию термообработки.

Мультифрактальная параметризация структур разрушенных образцов

Холоднокатаное состояние

Результаты мультифрактальной обработки изображения исходной микроструктуры, представленной на рис. 1а, показали, что на продольном шлифе микроструктура образца характеризуется каноническим видом спектра размерностей Реньи (рис. 4). Фрактальная размерность аналитического участка образца $D_0 = 1,9681$, мера упорядоченности микроструктуры $\Delta = 0,1903$.

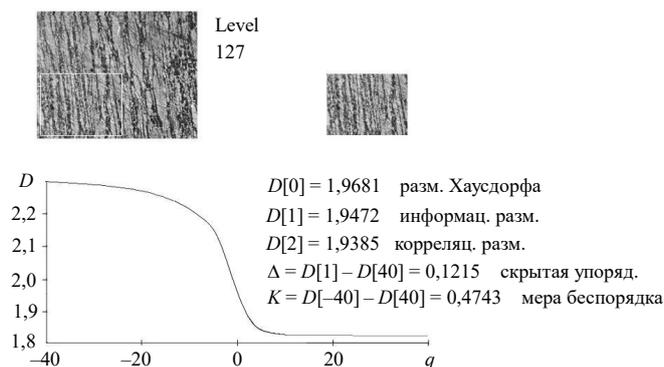


Рис. 4. Спектр размерностей Реньи для исходной микроструктуры

Внутреннее строение образцов после высокоскоростного деформирования (разрыва) на РСГ, выявленное на шлифах продольного сечения вблизи поверхности разрушения, изменилось в целом незначительно. На это указывают, в том числе, результаты численной обработки изображений структур (рис. 5).

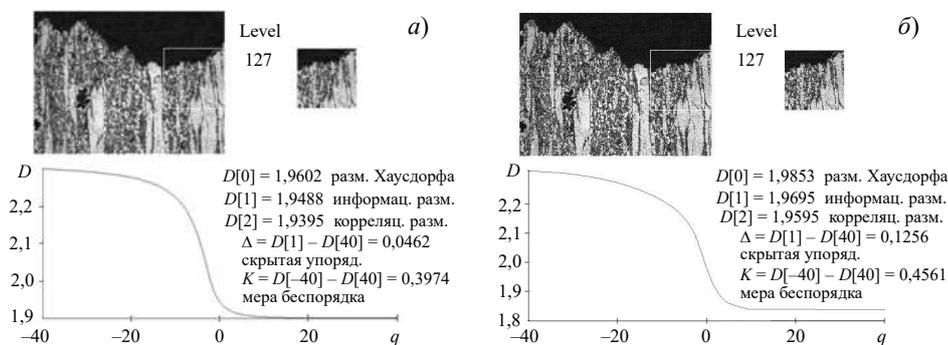


Рис. 5. Спектр размерностей Реньи структуры образцов из холоднокатаной бронзы:
а) $\dot{\epsilon} = 1800 \text{ c}^{-1}$; б) $\dot{\epsilon} = 1150 \text{ c}^{-1}$

Однако с увеличением скорости деформации от 1150 до 1800 с^{-1} параметр упорядоченности структуры Δ уменьшается и приближается к нулю (таблица 3 на с. 126). Фрактальная размерность D_0 так же, как Δ , с увеличением скорости деформации уменьшается.

Отожженное состояние

Результаты мультифрактальной обработки изображения исходной микроструктуры, представленной на рис. 1б, показали, что на продольном шлифе микроструктура образца характеризуется каноническим видом спектра размерностей Реньи (рис. 6).

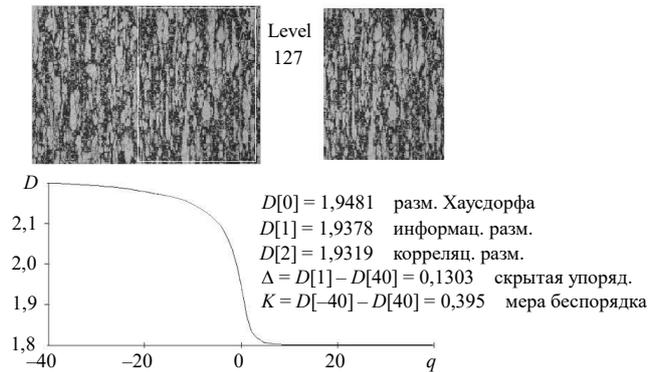


Рис. 6. Спектр размерностей Реньи для исходной микроструктуры в отожженном состоянии

Фрактальная размерность аналитического участка образца на рис. 6 равна $1,9481$, мера упорядоченности микроструктуры – $\Delta = 0,1303$. Обращает на себя внимание низкое значение фрактальной размерности D_0 по сравнению $D_0 = 1,9681$ для исходной структуры холоднокатаных образцов, указывающее на то, что в отожженном состоянии структура находится в более равновесном состоянии по сравнению со структурой холоднокатаного состояния [18]. Однако внутреннее строение образцов после отжига и высокоскоростного деформирования (разрыва) на РСГ, выявленное на шлифах продольного сечения вблизи поверхности разрушения, обнаруживает признаки структурно-фазового перехода. Так, на рис. 7 представлены спектры Реньи для образцов, разорванных при скоростях деформации $\dot{\epsilon}$, равных 915 и 1750 с^{-1} , из которых видно, что $\Delta \rightarrow 0$ (при $\dot{\epsilon} = 1750 \text{ с}^{-1}$ параметр упорядоченности Δ практически равен нулю), что свидетельствует о близости наступления структурно-фазового перехода. Все значения D_0 и Δ представлены в таблице 3.

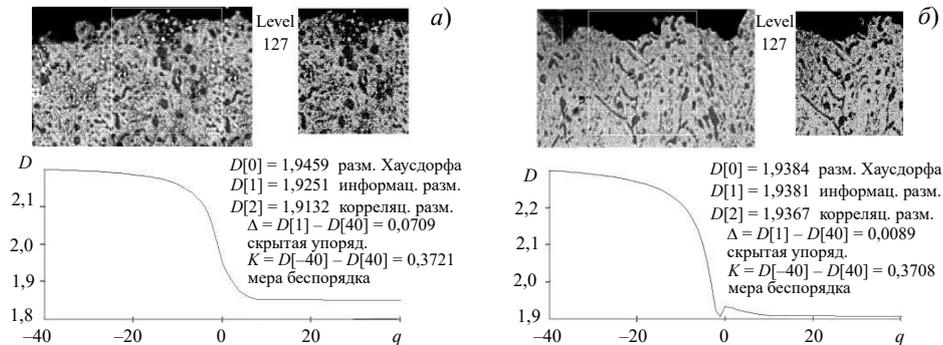


Рис. 7. Структура и контур излома в зоне старта разрушения: а) $\dot{\epsilon} = 915 \text{ с}^{-1}$; б) $\dot{\epsilon} = 1750 \text{ с}^{-1}$

Таблица 3

Значения фрактальной размерности и параметра упорядоченности

Состояние материала	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	Фрактальная размерность D_0	Скрытая упорядоченность Δ
Холоднокатаное	1150	1,9853	0,1256
	1500	1,9634	0,0984
	1800	1,9602	0,0462
Отожженное	915	1,9459	0,0709
	1400	1,9217	-0,0169
	1620	1,9406	-0,0128
	1750	1,9384	0,0089

Следует отметить, что (так же, как и в случае холоднокатаного состояния) чем выше значение скорости деформации, тем ниже значение Δ по модулю (см. таблицу 3). Зависимость фрактальной размерности D_0 от скорости деформации, в отличие от образцов холоднокатаного состояния, не столь однозначна, тем не менее она имеет тенденцию к снижению значений при увеличении скорости деформации.

Сравнивая результаты мультифрактальной обработки структуры образцов в холоднокатаном и отожженном состояниях, можно заметить, что первые оказались более устойчивы к структурному фазовому переходу (параметры упорядоченности у них существенно выше). Очевидно, что в исследуемом случае структурно-фазовый переход в образцах в зонах разрушения и предразрушения связан с переходом в квазиаморфное (подобному жидкому) состояние, связанное с измельчением (динамической рекристаллизацией) структуры [19].

В то же время известно [16], что структурно-фазовый переход связан с образованием неустойчивых возбужденных локальных областей (объемов). Возбужденное состояние, возникающее в полях сильных внешних воздействий [20] (как в рассмотренном случае), длится очень короткое время, при этом наблюдается взаимодействие структур различного уровня; материал находится в состоянии, далеком от равновесия, при котором наблюдается его качественная перестройка, его поведение становится сугубо нелинейным, возникают различные эффекты (например, массоперенос) [10]. Можно ожидать, что возбужденные локальные объемы (часть зерна, зерно, объединение зерен) являются зародышами квазигидродинамического поведения. И чем больше возникает таких локальных областей в материале, тем выше его пластичность, что мы и наблюдаем в экспериментах: самому малому значению параметра упорядоченности $\Delta = 0,0089$ соответствует самое высокое значение пластичности $\psi = 0,4$.

Заключение

Проведенные динамические испытания бронзы БрАЖНМц 9-4-4-1 в двух состояниях (холоднокатаном и отожженном) на разрезном стержне Гопкинсона показали, что по сравнению со статическими стандартными характеристиками выросли как характеристики прочности, так и характеристики пластичности.

Проведенный мультифрактальный анализ испытанных на РСГ образцов показал, что исследуемый материал в отожженном состоянии при высоких скоростях деформации обладает низкой устойчивостью к структурному фазовому переходу, в отожженных образцах возникает большее количество возбужденных локальных областей,

в которых возможен гидродинамический характер течения и, как следствие, такие образцы более пластичны.

Список литературы

1. Брагов А.М., Ломунов А.К. *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
2. Морозов В.А. *Динамика высокоскоростного нагружения материалов*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 112 с.
3. Басалин А.В., Константинов А.Ю., Крушка Л. Развитие метода прямого удара для определения диаграмм деформирования упругопластических материалов при больших деформациях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №2. С. 135–146. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-2-135-146.
4. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. *Высокоскоростная деформация материалов различной физической природы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2020. 299 с.
5. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R., Curran D.R. *Impact Dynamics*. N.Y.: John Wiley & Sons Ltd, 1982. 452 p.
6. Khantuleva T.A., Meshcheryakov Y.I. Nonequilibrium processes in condensed media: Part 1. Experimental studies in light of nonlocal transport theory. *Physical Mesomechanics*. 2015. Vol. 18. No 3. P. 228–243. DOI: 10.1134/S1029959915030078.
7. Barakhtin B.K., Savenkov G.G. Relationship between spall characteristics and the dimension of fractal fracture structures. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009. Vol. 50. Iss. 6. P. 965–971. DOI:10.1007/S10808-009-0130-Y.
8. Кузнецов А.В., Савенков Г.Г., Брагов А.М., Константинов А.Ю. Влияние формирующей фрактальной поверхности разрушения на динамические свойства титана. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 218–227. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-2-218-227>.
9. Savenkov G.G., Stolyarov V.V., Kuznetsov A.V., Meshcheryakov Yu.I. The nature of fractal relief of fractured metal samples after dynamic loading. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49. Iss. 5. P. 439–445. DOI: 10.3103/S1052618820050131.
10. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. *Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов*. Т. 1, 2. Новосибирск: Наука, 1995. 298 с.
11. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. *Синергетика и фракталы в материаловедении*. М.: Наука, 1994. 383 с.
12. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов*. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 116 с.
13. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kuznetsov A.V., Lomunov A.K., Savenkov G.G. Relationship between the crack velocity, fractal dimension, and dynamic fracture toughness of a material. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018. Vol. 59. Iss. 1. P. 132–137. DOI: 10.1134/S0021894418010169.
14. Lévy Véhel J., Vojak R. Multifractal analysis of Choquet capacities. *Advances in Applied Mathematics*. 1998. Vol. 20. Iss. 1. P. 1–43. DOI: 10.1006/AAMA.1996.0517.
15. Бунин И.Ж., Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Терентьев В.Ф. Методология мультифрактальной параметризации структур материалов. *Вестник ТГУ. Сер. Естественные и технические науки*. 1998. Т. 3. Вып. 3. С. 293–294.
16. Savenkov G.G., Barakhtin B.K., Rudometkin K.A. Multifractal analysis of structural modifications in a cumulative jet. *Technical Physics*. 2015. Vol. 60. Iss. 1. P. 96–101. DOI: 10.1134/S1063784215010211.
17. Дроздовский Б.А., Проходцева Л.А., Жегина И.А., Герчикова Н.С. Влияние скоростей деформирования и понижения температуры на трещиностойкость металлических материалов. *ФХММ*. 1985. №6. С. 26–31.
18. Колмаков А.Г. Взаимосвязь мультифрактальных характеристик структур поверхностей

стей разрушения молибдена с его механическими свойствами. *Изв. РАН. Сер. Металлы*. 1996. №6. С. 37–43.

19. Павлов В.А. Аморфизация структуры металлов и сплавов с предельно высокой степенью пластической деформации. *Физика металлов и металловедение*. 1985. Т. 59. №4. С. 629–649.

20. Egorushkin V.E., Panin V.E., Cavushkin E.V., Khon Yu.A. Strongly excited states in crystals. *Soviet Physics Journal*. 1987. Vol. 30. No 1. P. 5–24. DOI:10.1007/BF00896010.

References

1. Bragov A.M., Lomunov A.K. *Use of the Kolsky Bar Method for Studying High-Rate Deformation Processes in Materials of Various Physical Natures*. N. Novgorod. Publishing House of Nizhny Novgorod State University. 2020. 149 p.

2. Morozov V.A. *Dinamika vysokoskorostnogo nagruzheniya materialov [Dynamics of High-Speed Loading of Materials]*. SPb. SPbGU Publ. 2003. 112 p. (In Russian).

3. Basalin A.V., Konstantinov A.Yu., Kruszka L. Razvitie metoda pryamogo udara dlya opredeleniya diagramm deformirovaniya uprugoplasticheskikh materialov pri bolshikh deformatsiyakh [Development of direct impact method for determining diagrams of deformation of elastoplastic materials at large deformations]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 2. P. 135–146 (In Russian).

4. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. *Vysokoskorostnaya deformatsiya materialov razlichnoy fizicheskoy prirody [High-Speed Deformation of Materials of Various Physical Nature]*. N. Novgorod. NNGU Publ. 2020. 299 p. (In Russian).

5. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R., Curran D.R. *Impact Dynamics*. N.Y. John Wiley & Sons Ltd. 1982. 452 p.

6. Khantuleva T.A., Meshcheryakov Y.I. Nonequilibrium processes in condensed media: Part 1. Experimental studies in light of nonlocal transport theory. *Physical Mesomechanics*. 2015. Vol. 18. No 3. P. 228–243. DOI: 10.1134/S1029959915030078.

7. Barakhtin B.K., Savenkov G.G. Relationship between spall characteristics and the dimension of fractal fracture structures. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009. Vol. 50. Iss. 6. P. 965–971. DOI: 10.1007/S10808-009-0130-Y.

8. Kuznetsov A.V., Savenkov G.G., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu. Vliyanie formiruyushcheysoya fraktalnoy poverkhnosti razrusheniya na dinamicheskie svoystva titana [The effect of a forming fractal failure surface on the dynamic properties of titanium]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 2. P. 218–227 (In Russian).

9. Savenkov G.G., Stolyarov V.V., Kuznetsov A.V., Meshcheryakov Yu.I. The nature of fractal relief of fractured metal samples after dynamic loading. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49. Iss. 5. P. 439–445. DOI: 10.3103/S1052618820050131.

10. Panin V.E., Egorushkin V.E., Makarov P.V. et al. *Fizicheskaya mezomekhanika i kompyuternoe modelirovanie materialov [Physical Mesomechanics and Computer Modeling of Materials]*. Vol. 1, 2. Novosibirsk. Nauka Publ. 1995. 298 p. (In Russian).

11. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and Fractals in Materials Science]*. Moscow. Nauka Publ. 1994. 383 p. (In Russian).

12. Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Bunin I.Zh. *Vvedenie v multifraktal'nyuyu parametrizatsiyu struktur materialov [Introduction to Multifractal Parametrization of Material Structures]*. Izhevsk. NITs “Regular and chaotic dynamics” Publ. 2001. 116 p. (In Russian).

13. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Kuznetsov A.V., Lomunov A.K., Savenkov G.G. Relationship between the crack velocity, fractal dimension, and dynamic fracture toughness of a material. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018. Vol. 59. Iss. 1. P. 132–137. DOI: 10.1134/S0021894418010169.

14. Lévy Véhel J., Vojak R. Multifractal analysis of Choquet capacities. *Advances in Applied Mathematics*. 1998. Vol. 20. Iss. 1. P. 1–43. DOI: 10.1006/AAMA.1996.0517.

15. Bunin I.J., Kolmakov A.G., Vstovsky G.V., Terent'ev V.F. Metodologiya multifraktalnoy parametrizatsii struktur materialov [The multifractal parameterization of materials structures methodology]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhn-*

nicheskie nauki [Tambov University Review. Series Natural and Technical Sciences]. 1998. Vol. 3. Pt. 3. P. 293–294 (In Russian).

16. Savenkov G.G., Barakhtin B.K., Rudometkin K.A. Multifractal analysis of structural modifications in a cumulative jet. *Technical Physics*. 2015. Vol. 60. Iss. 1. P. 96–101. DOI: 10.1134/S1063784215010211.

17. Drozdovsky B.A., Prokhotseva L.A., Zhegina I.A., Gerchikova N.S. Vliyanie skorostey deformirovaniya i ponizheniya temperatury na treshchinostoykost metallicheskih materialov [Influence of strain rates and temperature decrease on crack resistance of metallic materials]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Physico-Chemical Mechanics of Materials]. 1985. No 6. P. 26–31 (In Russian).

18. Kolmakov A.G. Vzaimosvyaz multifraktalnykh kharakteristik struktur poverkhnostey razrusheniya molibdena s ego mekhanicheskimi svoystvami [Interrelation of the multifractal characteristics of the structures of the destruction surfaces of molybdenum with its mechanical properties]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya Metally* [Izvestiya RAN. Seriya Metals]. 1996. No 6. P. 37–43 (In Russian).

19. Pavlov V.A. Amorfizatsiya struktury metallov i splavov s predelno vysokoy stepenyu plasticheskoy deformatsii [Amorphization of the structure of metals and alloys with an extremely high degree of plastic deformation]. *Physica metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography]. 1985. Vol. 59. No 4. P. 629–649 (In Russian).

20. Egorushkin V.E., Panin V.E., Cavushkin E.V., Khon Yu.A. Strongly excited states in crystals. *Soviet Physics Journal*. 1987. Vol. 30. No 1. P. 5–24. DOI:10.1007/BF00896010.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON DYNAMIC PROPERTIES OF TIN-FREE BRONZE. MULTIFRACTAL PARAMETERIZATION OF THE STRUCTURES OF DESTROYED SAMPLES

Smakovskiy M.S.¹, Bragov A.M.², Konstantinov A.Yu.²,
Kuznetsov A.V.¹, Lomunov A.K.², Savenkov G.G.¹

¹JSC Machine Building Plant “Armalit”, St. Petersburg, Russian Federation

²Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The results of experimental studies of the dynamic characteristics of tinless bronze of the BrAZhNMts 9-4-4-1 brand of two types (in cold-rolled and annealed states) at different strain rates are presented. An experimental determination of the dynamic characteristics of bronze was carried out using a modification of the Kolsky method for dynamic tension using a split Hopkinson pressure bar. Tests were carried out with different strain rates up to rupture of the samples. It has been found that for both states, an increase in the strain rate leads to a significant change in the mechanical characteristics. The material after annealing showed a decrease in strength properties compared to the initial state by 20–22%. Compared to the static standard characteristics, the dynamic reduction in area has increased for both types of metal condition, and the dynamic reduction in area in the annealed state is 18–25% higher than the reduction in the cold-rolled state, i.e. in the annealed state, bronze is more ductile, which fits into the traditional theory of heat treatment. After dynamic testing, the fractured specimens were cut along the central tensile axis along the diameter so that the analytical sections (surfaces of the specimens that are ground, polished and chemically etched to reveal the structure or defectiveness of the specimens) were perpendicular to the fractures. The microstructural analysis of the destroyed samples and multifractal parametrization of their structures were carried out. On the basis of multifractal analysis in terms of the latent ordering parameter, it was found that the annealed state is less resistant to structural phase transition than the cold-rolled state. In annealed samples, a larger number of excited local regions appear, in which the hydrodynamic nature of the flow is possible and, as a result, such samples are more plastic.

Keywords: bronze, strain rate, dynamic strength, fracture, multifractal analysis, latent order.