

Микроструктурные особенности роликового раскатывания внутренней поверхности элементов судовой арматуры из алюминиевой бронзы

М. С. Смаковский

Рассмотрены вопросы изменения микротвердости и микроструктуры при роликовом раскатывании внутренних цилиндрических поверхностей элементов судовой арматуры из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1. Проведена мультифрактальная параметризация изображений образующихся при раскатывании микроструктур. Показано, что упрочненная поверхностная зона является многослойной.

Ключевые слова:

алюминиевая бронза, раскатывание, ролик, микроструктура, мультифрактал, структурный фазовый переход

УДК 620.18 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.29.4.56.60

Введение

Раскатывание с целью упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей, а также в качестве финишной обработки без снятия стружки, успешно применяется в металлообработке не одно десятилетие [1–3]. Роликовое раскатывание, вследствие своей низкой технологической себестоимости, например, широко применяется в судовом арматуростроении при изготовлении корпусных деталей из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1 и, по сути, в некоторой степени эта операция определяет их последующие эксплуатационные свойства.

Получаемый при такой обработке поверхностный слой имеет собственную макро- и микроструктуру, отличную от исходной, и в частности, у него могут измениться фазовый и химический составы.

Как известно [4], качество любой детали определяется всей ее технологической предысторией, и, в этом смысле, раскатывание незначительно исправляет погрешности предшествующей обработки, однако сами физико-механические свойства поверхностного слоя могут измениться кардинально. Такие изменения прежде всего могут быть связаны с формированием новых микроструктур и структурных состояний [5].

Важной составной частью анализа микроструктур в последние годы стал мультифрактальный анализ [6, 7], который является эффективным инструментом для изучения и количественного описания широкого многообразия неоднородных, хаотически сложных структур материалов. Мультифрактальный анализ имеет ряд преимуществ перед стандартным фрактальным, поскольку представляет

Таблица 1. Технологические режимы раскатки бронзовых деталей

Параметр	$D = 50$ мм	$D = 500$ мм
Преднатяг пружинного блока, мм	6	5
Ход оснастки в рабочем режиме, мм	4	7
Диаметр ролика, мм	4	12
Скорость вращения, об / мин	25	
Скорость подачи оснастки, мм / об	0,02	

информацию как о локальных, так и о глобальных свойствах изучаемой системы [8].

Настоящая работа посвящена исследованию с применением мультифрактального анализа изменений микроструктуры поверхностного слоя при раскатке внутренней цилиндрической поверхности корпусных деталей судовой арматуры из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1.

Предмет и методы исследования

Раскатке подвергались два цилиндра из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1. Малый цилиндр имел внутренний диаметр $D = 50$ мм, высоту 100 мм и толщину стенки 20 мм, большой цилиндр – внутренний диаметр 500 мм, высоту 250 мм и толщину стенки 45 мм. Внутренняя поверхность малого цилиндра до раскатки была обработана по 12 качеству точности с шероховатостью Ra 2,5, внутренняя поверхность большого цилиндра была обработана по 9 качеству с той же шероховатостью.

Замеры микротвердости проводились по ГОСТ 9450-76 с шагом 50 мкм после индентирования нагрузкой 0,5 Н. Исходная микротвердость внутренних поверхностей была оценена как $HV = 3,3 \pm 0,1$ ГПа.

Технологические режимы раскатки представлены в табл. 1. Подача оснастки – вертикальная, раскатка производилась при обильной подаче индустриального масла И40 (И40А) ГОСТ 20799-88.

Исследования микроструктуры образцов (шлифов), вырезанных из цилиндров так, чтобы можно было исследовать изменение микроструктуры по толщине цилиндра, проводились на оптическом микроскопе Axio – Observer Z1M в светлом поле и на световом микроскопе-микротвердомере «Аффри».

Мультифрактальная параметризация (МФП) – численная обработка изображений структур – выполнялась методами цифровой металлографии с применением программных пакетов «Эксперт Про» и «Фрактал» [9].

Для набора величин q (произвольные вещественные целые числа) из определенного интервала (максимально $q \in [-200; 200]$) (в нашем случае $q \in [-40; 40]$) производится вычисление традиционных мультифрактальных характеристик $f(\alpha)$ -спектров и D_q -спектров размерностей Реньи с проверкой их корректности. Конечные выходные мультифрактальные характеристики вычисляются как средние величины по всем корректным спектрам. Имеется также возможность дополнительного расчета мультифрактальных характеристик из так называемых псевдоспектров [8].

Из статистического набора МФП в настоящей работе использованы три: пространственная размерность объекта D_0 , скрытая упорядоченность Δ и мера беспорядка K .

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 (в нашем случае $q = 40$). Чем больше (по модулю) величина Δ , тем более упорядочена структура, то есть в ней становится больше периодической составляющей. Устремление 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).

Характеристика $K = D_{-q} - D_q$ позволяет оценить степень однородности изучаемой структуры. Чем больше K , тем более равномерно распределены единичные элементы рассматриваемой структуры в евклидовом пространстве, охватывающем эту структуру.

Приводимые при обработке изображений значения D_1 и D_2 характеризуют скорость роста количественной информации и вероятность найти в одной и той же ячейке покрытия две точки множества [10].

Результаты микроструктурного анализа и мультифрактальной параметризации и их анализ

Замеры микротвердости и шероховатости на образцах дали следующие результаты: Ra 0,8 (для обоих образцов), $HV = 3,7 \pm 0,2$ ГПа – для малого цилиндра (рис. 1 а) и $HV = 3,6 \pm 0,4$ ГПа – для большого цилиндра (рис. 1 б).

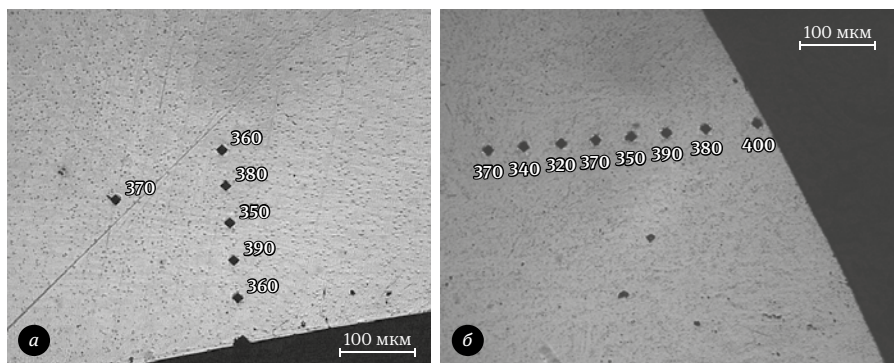


Рис. 1. Изображения нетравленных шлифов со следами замеров микротвердости

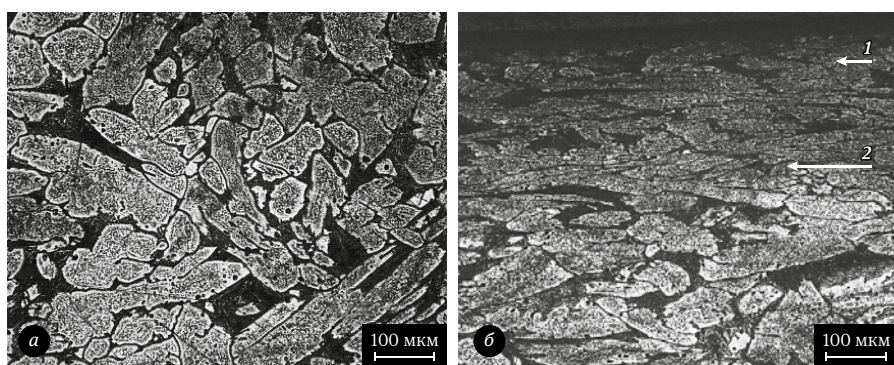


Рис. 2. Микроструктура внутренней поверхности большого цилиндра: а – микроструктура образца вне упрочненного слоя; б – микроструктура упрочненного слоя

Сравнение с исходными значениями шероховатости и микротвердости показывает, что параметр шероховатости изменился на 1,7 мкм (более, чем на 50%), микротвердость изменилась не столь значительно (на 0,3–0,7 ГПа, что составляет 10–25% по отношению к значениям

исходной микротвердости). Необходимо отметить, что в малом цилиндре разброс значений микротвердости в два раза меньше, чем в большом цилиндре. Толщина упрочненной зоны в обоих цилиндрах лежит в диапазоне 350–400 мкм.

Микроструктурный анализ исследуемых образцов выявил качественно различную двухфазную структуру как исходного состояния, так и поверхностного (упрочненного) слоя цилиндров. Так, в большом цилиндре (рис. 2 б) в упрочненной зоне, состоящей из двух слоев, зерна сплющены и, предположительно, развернуты на ~90° по отношению к исходным зернам и по направлению вращения (оснастки – раскаточного инструмента), часть зерен фрагментирована. К тому же большинство зерен неравноосны, и в части из них наблюдаются зачатки фрагментации. Первый слой состоит из более мелких и тонких зерен, во втором слое – зерна более крупные и имеют больший размер по малой оси.

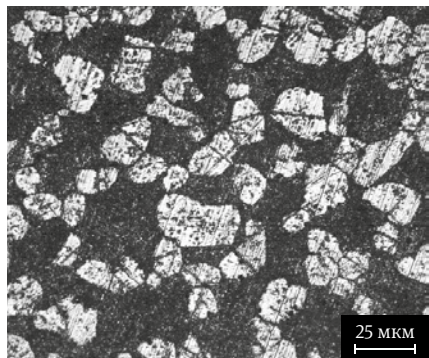


Рис. 3. Строение недеформированного металла

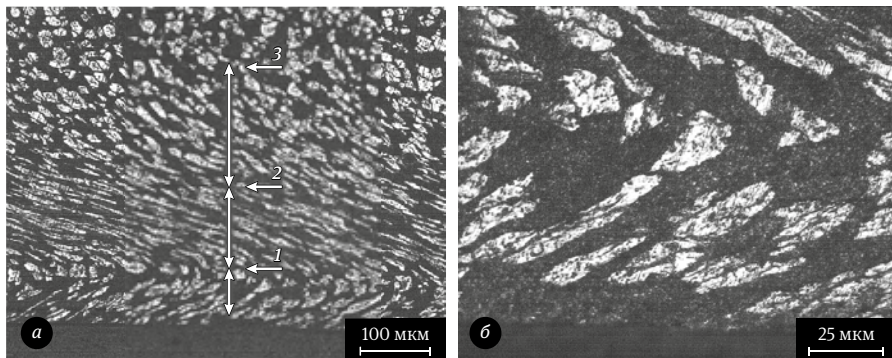


Рис. 4. Зона упрочнения металла в малом цилиндре: а – общий вид, б – участок изменения направления упрочнения. Зоны упрочнения обозначены стрелками и цифрами: 1 – 70 мкм, 2 – 90 мкм, 3 – 160 мкм

Микроструктура материала раскатанной внутренней поверхности малого цилиндра имеет следующий вид. Исходное (недеформированное) состояние характеризуется двухфазным строением с равноосными зернами размером от 10 до 30 мкм (рис. 3). Зона упрочнения достигает глубины ~380 мкм (рис. 4). В зоне упрочнения выявлена структура переменной морфологии. Так, в ближайшем к внутреннему отверстию

Микроструктурный анализ исследуемых образцов выявил качественно различную двухфазную структуру как исходного состояния, так и поверхностного (упрочненного) слоя цилиндров. Так, в большом цилиндре (рис. 2 б) в упрочненной зоне, состоящей из двух слоев, зерна сплющены и, предположительно, развернуты на ~90° по отношению к исходным зернам и по направлению вращения (оснастки – раскаточного инструмента), часть зерен фрагментирована. К тому же большинство зерен неравноосны, и в части из них наблюдаются зачатки фрагментации. Первый слой состоит из более мелких и тонких зерен, во втором слое – зерна более крупные и имеют больший размер по малой оси.

Микроструктура материала раскатанной внутренней поверхности малого цилиндра имеет следующий вид. Исходное (недеформированное)

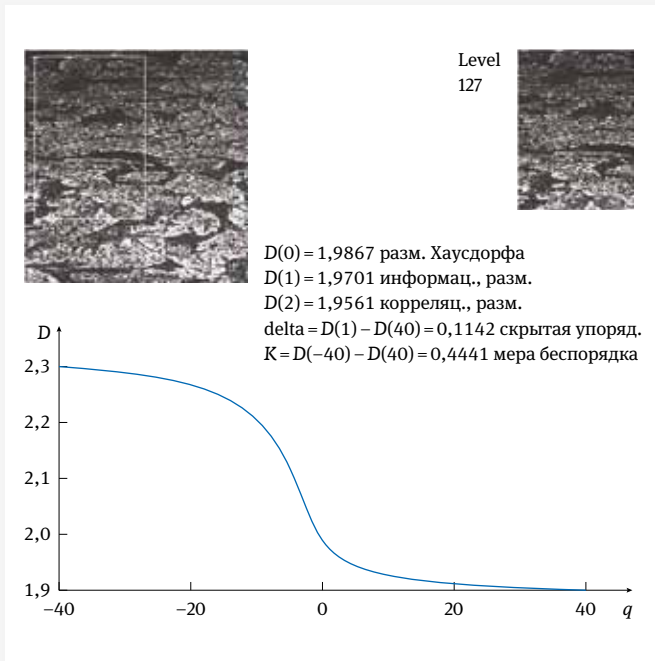


Рис. 5. Мультифрактальные параметры структуры большого цилиндра

слое толщиной ~70 мкм однонаправленные, но повернутые деформированные зерна характеризуются размерами 30×8 мкм. Далее зафиксирована структура более

деформированных, раздробленных (фрагментированных) зерен размерами 65×6 мкм, которые по отношению к зернам первого слоя повернуты на 90° (то есть как и для первого слоя, наблюдаются элементы ротационной деформации) и сгруппированы в слое толщиной ~90 мкм. Этот (второй) слой заканчивается полосой ~160 мкм из менее деформированных зерен, но ориентированных по направлению второго слоя.

Таким образом, структура поверхностного упрочненного слоя для обоих цилиндров является для большого цилиндра – двухслойной, а для малого цилиндра – трехслойной.

При этом в малом цилиндре во всех трех слоях деформация осуществляется по ротационному механизму. Можно предполагать, что ротационный механизм пластического течения в малом цилиндре, по сравнению с трансляционным механизмом пластической деформации в большом цилиндре, связан с большими напряжениями, возникающими в упрочняемом слое малого цилиндра. Кроме того, ротационная структура материала в зоне упрочнения малого цилиндра напоминает структуру вихреобразования в пристеночном слое при движении жидкости. Как известно, такая вихреобразная структура гидродинамического течения жидкости возникает

при достижении числом Рейнольдса $(Re = \frac{\rho U \delta}{\mu})$,

где ρ – плотность материала; U – скорость

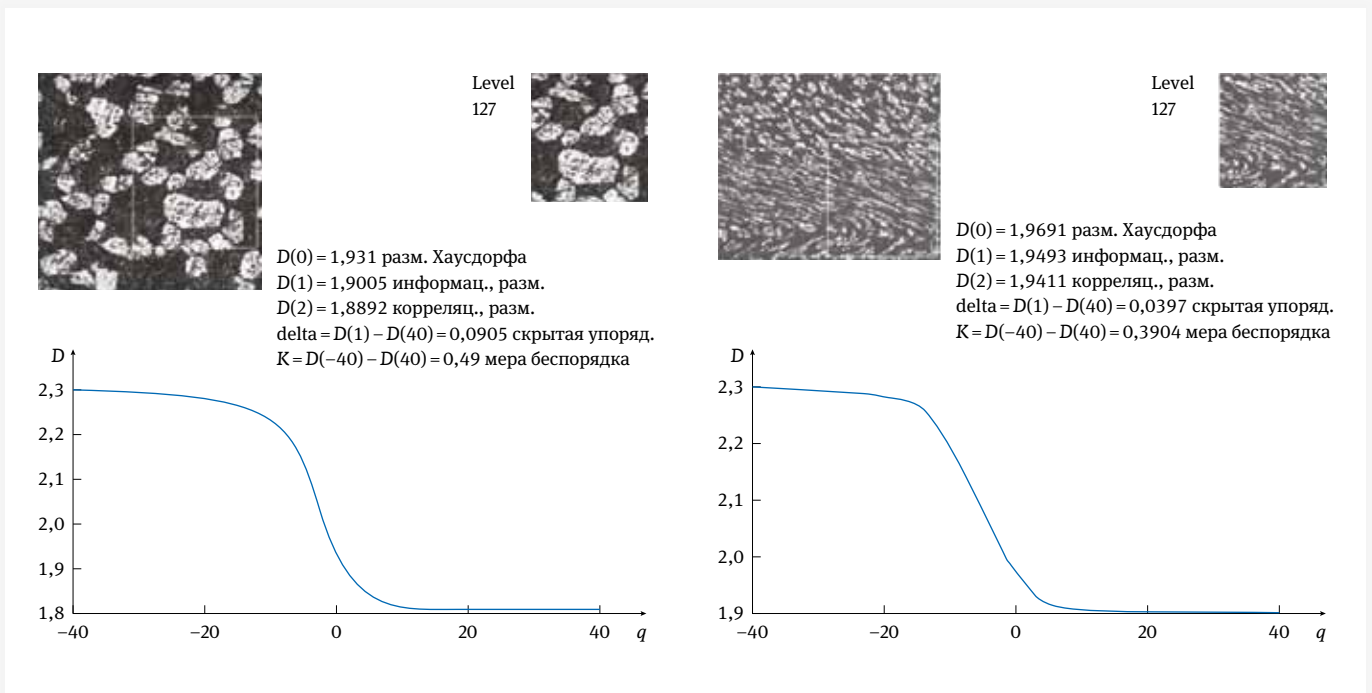


Рис. 6. Мультифрактальные параметры структуры малого цилиндра: а – исходная структура; б – структура после раскатки

Таблица 2. Результаты мультифрактальной параметризации структур

Диаметр цилиндра, мм	$D[0]$	Δ	K
50 (исходная структура)	1,931	0,0905	0,49
50 (деформированная структура)	1,9691	0,0397	0,3904
500 (деформированная структура)	1,9867	0,1142	0,4441

течения; δ – толщина пограничного (пристеночного) слоя, μ – динамическая вязкость) некоторого критического значения [11]. В этом случае возможен некий фазовый переход между основной частью материала и пристеночной областью [12].

Результаты численной (мультифрактальной) обработки изображений структур представлены на рис. 5 и 6. Из рисунков следует, что структура зерен для каждого изображения характеризуется каноническим видом спектра размерностей Реньи. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов численной обработки изображений структуры показывает, что в малом цилиндре в переходной зоне параметр скрытой упорядоченности Δ близок к нулю, то есть в этой зоне материал близок к осуществлению фазового перехода, что подтверждает ранее высказанное предположение о возможности структурного фазового перехода в переходной зоне. В этой же зоне наблюдается наименее однородная структура (параметр K имеет меньшее значение, чем в двух других случаях). Наиболее упорядоченная структура – исходная структура материала малого цилиндра.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

При раскатывании цилиндрических поверхностей из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-4-1 микротвердость изменяется не более чем 10–25% по отношению к значениям исходной микротвердости. Разброс значений микротвердости в цилиндре с внутренним диаметром 50 мм в два раза меньше, чем в цилиндре с внутренним диаметром 500 мм.

Поверхностная упрочненная зона обоих цилиндров является многослойной: двухслойной для большого цилиндра, трехслойной для малого цилиндра. Толщина упрочненной зоны в обоих цилиндрах лежит в диапазоне 350–400 мкм.

Зона упрочнения малого цилиндра является аналогом структуры вихреобразования в пристеночном слое при

движении жидкости с критическим числом Рейнольдса.

В переходной зоне между вихреподобной и исходной структурами материал близок к осуществлению структурного фазового перехода.

Литература

1. **Коновалов Е. Г., Сидоренко В. А.** Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей. Минск: Высшая школа, 1968.
2. **Дальский А. М., Арутюнова И. А., Барсукова Т. М. и др.** Технология конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 664 с.
3. **Одинцов Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
4. **Васильев А. С.** Направленное формирование эксплуатационных свойств деталей в технологических средах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2017. Т. 17, № 1. С. 33–40.
5. **Глезер А. М.** Принципы создания многофункциональных конструкционных материалов нового поколения // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 5. С. 559–569.
6. **Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогов А. А.** Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
7. **Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж.** Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 116 с.
8. **Бунин И. Ж., Колмаков А. Г., Встовский Г. В., Терентьев В. Ф.** Методология мультифрактальной параметризации структур материалов // Вестник ТГУ. 1998. Т. 3, вып. 3. С. 293–294.
9. **Kuznetsov A., Savenkov G., Stolyarov V.** Multifractal Formalism in Tasks of Dynamic Plasticity // MATEC Web of Conferences V. 346, 02038 (2021). ICMTMTE 2021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134602038>.
10. **Встовский Г. В., Гринберг Е. М., Маркова Е. В., Фомичёва Н. Б.** Фрактографические исследования поверхности изломов стали 09Х16Н4БЛ с использованием прикладного мультифрактального анализа // Перспективные материалы. 2012. № 5. С. 89–94.
11. **Хинце И. О.** Турбулентность. М.: ГИФМЛ, 1963. 680 с.
12. **Погодаев Л. И., Голубев Н. Ф.** Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин. СПб: СПбГУ водных коммуникаций, 1997. 415 с.

Автор

Смаковский Михаил Сергеевич – главный инженер АО «Машиностроительный завод «Армалит»

МЕТАЛЛООБРАБОТКА. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ



RIMTOS 20

Russian International
Machine-Tool and
Manufacturing Technology Show

22

Москва, МВЦ «Крокус-Экспо», павильон №2

7 – 11 ноября 2022 г.

ОРГАНИЗАТОР:

Ассоциация «Станкоинструмент»

+7 (495) 650-58-04

rimtos.ru



Ассоциация производителей
станкоинструментальной продукции
«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»