УДК 621.77.04

П. В. Кононов, В. Н. Востров
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

И. Е. Кононова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение атомно-силовой микроскопии для анализа напряженного и деформированного состояния детали с фланцем из латуни

Созданы детали из латуни с помощью технологии угловой раскатки фланцев трубчатых заготовок. Морфология поверхностных пластически деформированных слоев сечения детали исследована с применением атомно-силовой микроскопии. Рассчитаны значения величин размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам. Проведен фрактальный анализ поверхностей структур с использованием атомно-силовой микроскопии с помощью программы Gwyddion.

Детали из фланцев, латунь, образующая часть трубчатой заготовки, атомно-силовая микроскопия, фрактальный анализ

Практически ни одно строительство промышленного типа не обходится без деталей из фланцев, главной задачей которых является обеспечение герметичного соединения отдельных узлов, агрегатов, сосудов и аппаратов, в трубопроводах, у вращающихся деталях и пр. Детали с фланцами, значительно удаленными от торца [1], [2], находят широкое применение в машиностроении, в т. ч. в агрегатах для обработки пищевых продуктов, льноуборочных, хлопкоуборочных, текстильных и бытовых машинах, насосах, электромоторах, редукторах роботов и др.

Высокие темпы развития отраслей машиностроения требуют дальнейшего совершенствования технологии и, следовательно, создания новых методов диагностики особенностей формообразования созданных деталей. Технологические возможности процессов ограничиваются явлениями разрушения материалов и потерей устойчивости, проявляющейся в искривлении и складкообразовании деформируемой части детали. В связи с этим актуальна разработка методов диагностики напряженно-деформированных состояний, оценка деформируемости материала заготовок, разработка рекомендаций по назначению технологических режимов, созданию новых схем, исключающих брак от разрушения и складкообразования заготовок и расширяющих технологические возможности процесса.

Процессы пластической деформации, происходящие в объеме нагруженного материала, находят однозначное отражение в изменении рельефа поверхности, что в первую очередь связано с действием поворотных мод деформации. При этом в нагруженном материале развиваются и движутся трехмерные структурные элементы деформации, форма и геометрические размеры которых зависят от вида и условий нагружения и могут быть оценены путем измерения рельефа поверхности. Распределение последнего при различных степенях деформации (на различных этапах нагружения) имеет определенный характер. Изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов на поверхности позволяет проследить дина-

мику развития процессов, протекающих в исследуемом материале в целом. Поэтому цель работы, результаты которой представлены настоящей статьей, – сопоставление микроскопического поведения с помощью фрактального анализа рельефа поверхностей структур с поведением систем в макроскопическом масштабе.

Теория фракталов [3] получила огромное распространение. До фактического начала активной деятельности в этой области в математике существовало понятие размерности Хаусдорфа–Безиковича. С 1977 г., когда было введено понятие фрактальной размерности, выяснилось, что оно является важным геометрическим понятием, позволяющим количественно описывать неупорядоченные структуры в простых моделях и физических системах в целом. Сейчас уже несомненно, что фракталы встречаются в огромном числе физических процессов и явлений. Обнаружено множество задач, где фрактальная структура и фрактальная размерность служат основными характеристиками системы [4]–[6]: теории турбулентности, динамических систем, фазовых переходов и т. д.

Для получения информации о распределении рельефа поверхности в настоящее время используются различные способы, в частности сканирующая зондовая микроскопия, растровая электронная микроскопия и оптическая микроскопия. Применение методов сканирующей зондовой мирокроскопии [7] позволяет анализировать морфологию и локальные свойства поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. Поэтому исследование морфологии пластически деформированных поверхностных слоев образцов в работе проводили с применением «полуконтактной» колебательной методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью нанолаборатории «Ntegra Terma».

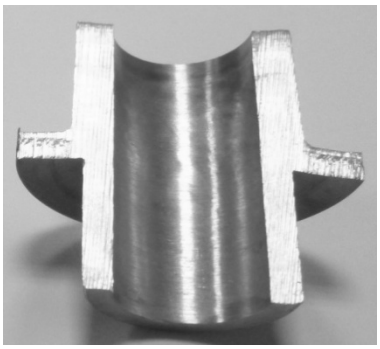
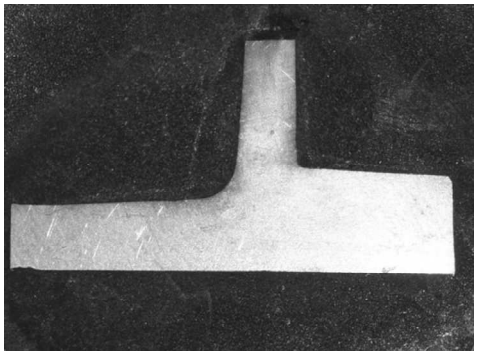
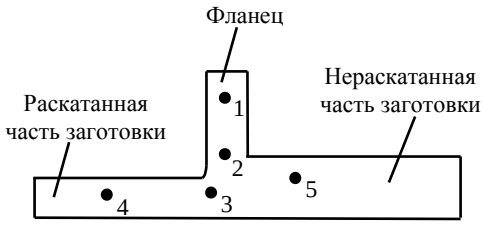


Рис. 1

В работе деталь (рис. 1) была получена с помощью технологии угловой раскатки фланцев трубчатых заготовок. При этом деформирование осуществляли при поступательном перемещении инструмента к оси заготовки и синхронном вращении за счет контактного трения между поверхностями инструмента и заготовки. Процесс выполняли деформирующим роликом, установленным с возможностью вращения и поворота относительно оси заготовки [8], [9]. Детали с фланцами были созданы из латуни (сплав Л63, химический состав: Cu – 62–65 %, Fe – 0.2 %, Pb – 0.07 %, Sb – 0.005 %, Bi – 0.002 %, P – 0.01 %, примеси – 0.5 %, Zn – остальное). Был получен шлиф сечения детали, изображение которого представлено на рис. 2, *а*, схематичное изображение шлифа сечения детали с указанием исследуемых областей – на рис. 2, *б*.



а



б

Рис. 2

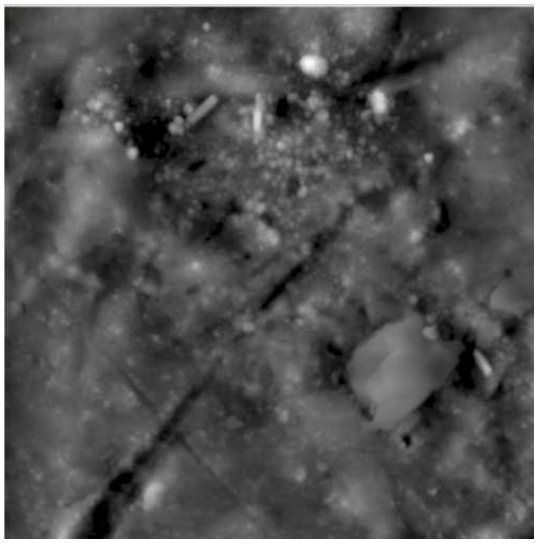
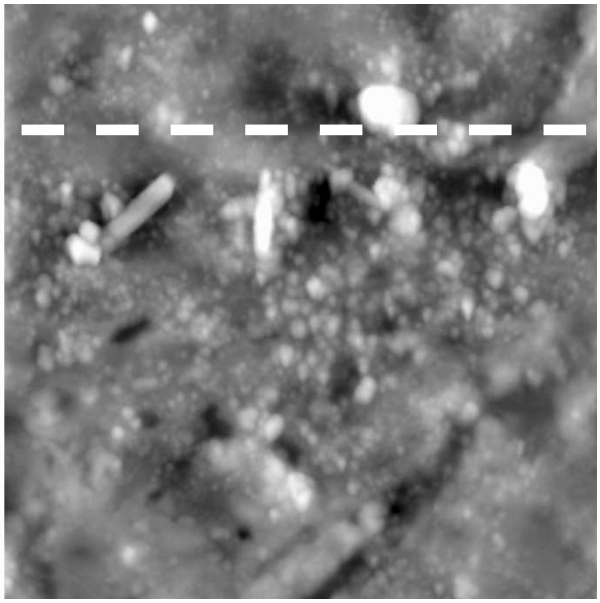
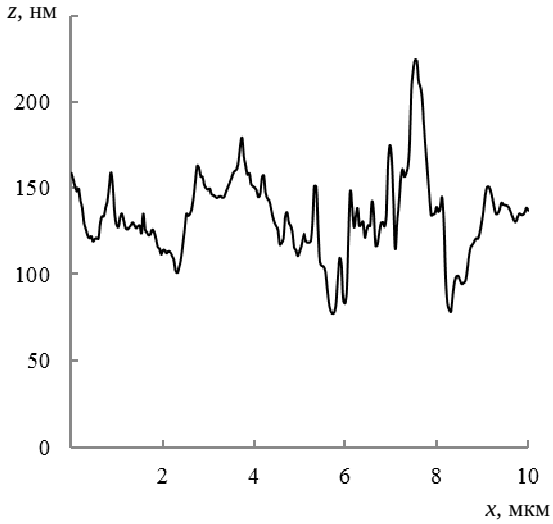


Рис. 3



а



б

Рис. 4

Анализировали пять областей: *1* и *2* – области фланца; *3* и *4* – раскатанные области детали; *5* – нераскатанная область детали (рис. 2). Для диагностики использовали зондовые датчики с кантилевером в виде балки прямоугольного сечения серий NSG 01 компании NT-MDT (Зеленоград) с резонансными частотами 150 кГц. АСМ-кадры представляли собой квадратные матрицы, имеющие размер 256 × 256 элементов. В качестве иллюстрирующего примера на рис. 3 (размер изображения 20 × 20 мкм) и на рис. 4, *а* (размер изображения 10 × 10 мкм) представлены АСМ-изображения области *1*.

В работе были исследованы профили АСМ-изображений путем сечения поверхности плоскостью, перпендикулярной плоскости образца. В результате получали кривые, описывающие рельеф поверхности с точностью, определяемой величиной шага сканирования (рис. 4, *б*, сечение профиля изображено на рис. 4, *а* белой штриховой линией).

Анализировали средние профили вдоль оси абсцисс изображений размером 3 × 3 мкм, 7 × 7 мкм, 10 × 10 мкм, 12 × 12 мкм, 20 × 20 мкм, 40 × 40 мкм. Длину кривой, описывающей средний профиль вдоль оси абсцисс, рассчитывали по формуле $L_{\text{ср}}(\delta) = \sum_i l_i(\delta)$, где $l_i = \sqrt{|h_{i+1} + h_i|^2 + \delta^2}$ – длина промежутка на кривой между двумя шагами сканирования; h_i – шероховатость в некоторой точке сканирования; δ – величина шага сканирования. Было показано, что зависимость средней длины профиля поверхности от измерительного масштаба при увеличении площади сканирования является линейной. Поэтому в дальнейшем в работе приведены данные АСМ-микроскопии для размера изображений 20 × 20 мкм.

Исходные атомно-силовые изображения являются дискретными двумерными функциями, которые имеют некоторый минимальный шаг по оси *Z*. По данным АСМ были построены гистограммы плотности распределения значений дискретной функции, заданной на плоскости *XY*.

Были построены гистограммы плотности распределения значений функции *Z*, на которых по оси абсцисс откладываются значения функции *Z*, с определенным шагом, а по оси ординат – количество точек *N*, значения которых лежат в заданном интервале по функции *Z* (например, рис. 5 для области *1*, размер изображения 10 × 10 мкм).

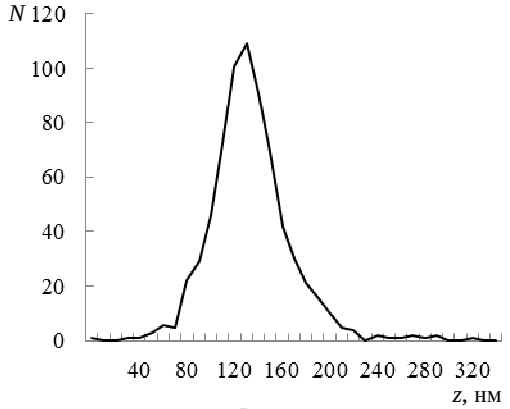


Рис. 5

Область	Анализируемая величина				
	Статистические параметры, нм		Значения рассчитанной фрактальной размерности		
	S_y	S_z	Метод триангуляции	Метод подсчета кубов	Метод спектра мощности
1	413.967	210.384	2.31	2.39	2.51
2	445.211	219.952	2.29	2.36	2.38
3	544.404	277.927	2.27	2.33	2.30
4	899.796	450.899	2.24	2.30	2.26
5	1097.960	548.472	2.21	2.25	2.25

В таблице приведены результаты анализа гистограмм плотности распределения значений функции Z АСМ-изображений (размер изображения 20×20 мкм), где S_y – величина размаха высот; S_z – параметр, выражающий шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам.

Выявлено, что область фланца характеризуется наименьшими значениями размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам, а нераскатанная часть заготовки – наибольшими значениями.

Чтобы косвенно охарактеризовать поверхность образцов в работе анализировали результаты фрактального анализа поверхностей структур с использованием АСМ с помощью программы Gwyddion. Для расчета использовали методы подсчета кубов, триангуляции и спектра мощности.

Установлено, что фланец характеризуется наибольшими значениями фрактальной размерности, а нераскатанная область заготовки – наименьшими значениями.

В [10] с помощью программно-аппаратного комплекса на основе ANSYS и LS–DYNA были выполнены расчеты процесса холодной раскатки деталей с фланцами методом конечно-элементного моделирования. Была получена информация о напряженных и деформированных состояниях заготовок. Выявлено, что эквивалентные напряжения в раскатанных и нераскатанных областях детали отличаются в 3–5 раз.

В работе было установлено, что значения размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам для раскатанных и нераскатанных областей, отличаются в 2.5–2.7 раза.

Таким образом, в работе был предложен новый метод анализа напряженных и деформированных состояний сплава (металлов) в процессе угловой раскатки фланца трубчатой заготовки. Значения эквивалентных напряжений в раскатанных и нераскатанных областях детали прямопропорциональны значениям фрактальной размерности и обратнопропорциональны значениям размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимаксимальным высотам и впадинам. Причем как эквивалентные напряжения, так и статистические параметры отличаются для раскатанных и нераскатанных областей примерно в 3 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31655 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции рентгеновских лучей // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2013. № 166. С. 223–230.

2. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 // Металлообработка: науч.-производственный журн. 2012. № 4 (70). С. 38–42.

3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / пер. с англ. А. Р. Логунова; Ин-т компьютерных исследований. М., 2002. 656 с.

4. Грачева И. Е., Мошников В. А., Абрашова Е. В. Обобщение результатов анализа величины фрактальной размерности золь-гель пористых иерархических структур // Материаловедение. 2013. № 6. С. 13–22.

5. Самосборка фрактальных агрегатов системы магнетит–диоксид кремния в постоянном магнитном поле / И. Е. Кононова, К. Г. Гареев, В. А. Мошников, В. И. Альмяшев, О. В. Кучерова // Неорганические материалы. 2014. Т. 50, № 1. С. 75.

6. Грачева И. Е., Мошников В. А. Анализ газочувствительных фрактальных структур на основе диоксида олова методом атомно-силовой микроскопии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. № 5. С. 3–10.

7. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / Ин-т физики микроструктур РАН. Н. Новгород, 2004. 114 с.

8. Пат. на способ № RUS 2 499 648. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / В. Н. Востров, П. В. Кононов. 25.06. 2012.

9. Пат. на полезную модель № RUS 116079. Устройство для раскатки буртов на трубных заготовках / В. Н. Востров, П. В. Кононов. 07.12.2011.

10. Кононов П. В., Востров В. Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. 2013. № 9. С. 46–49.

P. V. Kononov, V. N. Vostrov
Saint-Petersburg state polytechnical university

I. E. Kononova
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ANALYSIS STRESS-STRAIN STATE ITEMS WITH FLANGE BRASS USING ATOMIC FORCE MICROSCOPY

Model samples brass parts with the help of technology rolling flanges on the generator side of the tubular blank were created. The morphology of plastically deformed surface layers of the model samples was investigated using atomic force and optical microscopy . Values of heights and scope parameter that expresses the surface roughness of the selected five maximum heights and hollows were calculated. Fractal analysis of surfaces structures using atomic force microscopy was conducted.

Details of the flanges, brass, forming part of the tubular blank, atomic force microscopy, fractal analysis

УДК 543.423

Д. К. Кострин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Автоматический поиск положения спектральных линий при анализе спектров излучения плазмы

Рассмотрены требования, выдвигаемые к алгоритмам поиска спектральных линий при анализе спектров плазмы. Приведены результаты работы двух быстродействующих методов поиска с помощью тестового программного обеспечения. Показана возможность применения полученных результатов для анализа состава плазмы при контроле технологических процессов.

Спектральная линия, оптический спектр, спектрометр, излучение плазмы

Спектрометрический контроль имеет широкое применение в ионно-плазменных процессах травления и осаждения материалов [1]. В данных процессах удаляемое или осаждаемое вещество находится в распыленной фазе и, испытывая соударения с электронами, частично переходит в возбужденное состояние. Обратный переход частиц из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием излучения, которое несет информацию о плотности возбужденных состояний атомов и молекул распыленного вещества и других компонентов газовой среды [2].

Спектральные системы контроля достаточно просто встраиваются в технологический процесс. Методами спектрального контроля прямо или косвенно оцениваются качество газовой среды, скорость и появление конечной точки при травлении пленок в плазмохимических установках, степень ионизации плазмы, температура нейтральных частиц и электронов. Спектрометрический контроль в распылительном нанесении пленок применяется для контроля скорости распыления материала, для измерения и поддержания на заданном уровне соотношения распыляемых ком-