

УДК 620.18:539

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННОГО ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОГО КОМПОЗИТА МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В. В. Дука, Л. П. Арефьева, Л. С. Шахова

Донской государственной технической университет, (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Приведены результаты фрактографического анализа излома поверхности естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК) методами атомно-силовой микроскопии после испытаний на ударный изгиб. Исследование излома методом АСМ показало, что данные оптической и атомно-силовой микроскопии согласуются. Трехмерное АСМ-изображение излома поверхности и его профили, снятые на разных участках, а также геометрические параметры структурных элементов указывают на наличие в структуре фаз с различными физическими и физико-химическими характеристиками.

Ключевые слова: излом, ЕФМК, атомно-силовая микроскопия, шероховатость, профиль, рельеф поверхности.

FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF NATURAL FERRITE-MARTENSITE COMPOSITE BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY METHODS

V. V. Duka, L. P. Arefeva, L. S. Shakhova

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The paper presents the results of fractographic analysis of the fracture of the surface of a natural ferrite-martensite composite (NFMC) by atomic force microscopy after impact bending tests. The study of the fracture by AFM showed that the data of optical and atomic force microscopy are in agreement. The three-dimensional AFM images of the surface fracture and its profiles taken in different areas, as well as the geometric parameters of the structural elements, indicate the presence of phases with different physical and physicochemical properties in the structure.

Keywords: fracture, NFMC, atomic force microscopy, roughness, profile, surface's relief.

Введение. Развитие современных нанотехнологий требует все более глубоких знаний о внутреннем строении материалов и их физических свойствах на микро-, мезо- и наноуровне. Эффективно управляя происходящими в этих масштабах процессами и явлениями, можно целенаправленно создавать материалы с принципиально новыми потребительскими качествами, недостижимыми в рамках использования традиционных технологий. Одним из наиболее перспективных инструментов решения этой проблемы является атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ успешно применяется в материаловедении при исследовании морфологии и локальных физико-механических свойств материала на наноструктурном уровне. Использование диагностических методов АСМ позволяет расширить объем получаемой информации благодаря получению трехмерного изображения рельефа поверхности, формирование которого для других методик затруднено [1, 2].

Цель данной работы — проведение фрактографического анализа излома естественного ферритно-мартенситного композита (ЕФМК) методами атомно-силовой микроскопии после испытаний на ударный изгиб. Композит был получен путем закалки доэвтектоидной строительной стали с исходной ферритно-перлитной структурой в область межкритического интервала

температур и последующего низкого отпуска. В результате такой обработки образуется ферритно-мартенситная структура, представляющая собой естественный композиционный материал (рис. 1).

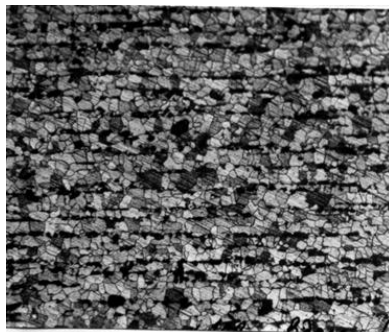


Рис. 1. Микроструктура стали 15Г после закалки в МКИ $\times 200$:

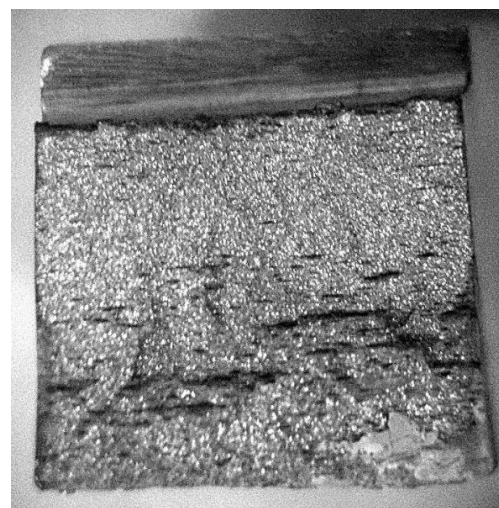
светлая фаза — феррит; темная фаза — мартенсит

В качестве исходного материала для получения композита была выбрана сталь 15Г. Закалку стали проводили при температуре 750°C с выдержкой 20 мин и последующим охлаждением в воде. Температура отпуска составляла 200°C . Металлографические исследования образца осуществлялись на продольных шлифах. Просмотр и съемка микроструктур выполнялась на микроскопах Метам РВ-22 и Neophot-21. Микротвердость фаз определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Расчет количественных и размерных характеристик структурных составляющих композита производился с использованием программы КОИ-1 [3].

Испытания ЕФМК на ударный изгиб проводились в соответствии с ГОСТ 9454–78 на маятниковом копре МК-30 с максимальным углом подъема маятника [4]. Образец с U-образным надрезом шириной и глубиной 2 мм и радиусом закругления 1 мм воспринимал нагрузку перпендикулярно расположению волокон. Макроструктура излома ЕФМК после испытаний на ударный изгиб представлена на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Макроструктура излома ЕФМК после испытаний на ударный изгиб:
а — общий вид разрушенного образца; б — поверхность, исследуемая АСМ

Исследование поверхности излома производилось с использованием атомно-силового микроскопа Nanoeducator II в бесконтактном режиме. Сравнивались поверхность излома и гладкая поверхность образца путем проведения измерений линейных размеров особенностей

рельефа поверхности. Геометрические параметры структурных элементов композита были получены методами Section Analysis и Grain Analysis. Метод Section Analysis позволяет анализировать профиль поверхности и рассчитывать основные статистические параметры профиля. Grain Analysis предназначен для определения геометрических параметров структурных элементов, линейных размеров и их площади [5, 6].

Результаты исследования. Результаты стереометрической металлографии показали, что представленный режим термообработки позволяет получать в структуре композита порядка 35 % мартенсита и 65 % — феррита. Значение микротвердости фаз имели следующие значения: мартенсит — 5000 МПа, феррит — 1700 МПа. При рассмотрении макроструктуры поверхности излома методом оптической микроскопии были зафиксированы три характерные зоны: в устье надреза, в результате сдвигового разрушения с расслоением по плоскостям максимальных касательных напряжений образуется область межфазной границы феррит-мартенсит, далее наблюдается зона вязкого разрушения и зона нестабильного хрупкого разрушения. Анализ поверхности разрушенного образца ЕФМК показал наличие вязко-хрупкого излома, подтверждающее присутствие строчечности в структуре [7].

Исследование излома методом АСМ подтверждают ранее сделанные выводы. На 3D-изображении излома ЕФМК по всей площади рельефа четко видны участки повторяющихся впадин и выпуклостей, указывающие на гетерогенность структуры (рис. 3)

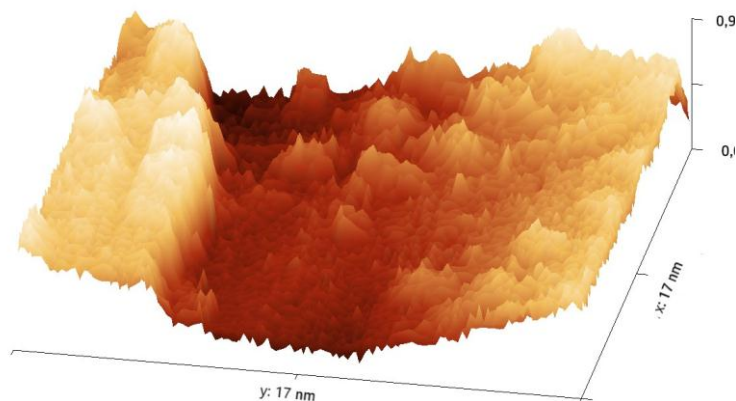


Рис. 3. 3D-изображение излома ЕФМК

Измерения геометрических характеристик проводились в автоматическом режиме с помощью программного комплекса Gwyddion в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014 с выполнением всех требований к условиям измерения [8]. Погрешность измерений составляла менее 4 % для всех величин. Полученные геометрические параметры выпуклых участков поверхности излома, представленные в таблице 1, и перепад высот между участками в интервале 500–650 мкм в разных областях скан-изображения подтверждают наличие в структуре фаз с различными физическими и физико-химическими особенностями [9, 10].

Геометрические характеристики рельефа поверхности ЕФМК

Геометрические параметры выпуклостей	Значение
Средний размер, нм	224
Средний объем, мкм ³ ×мкм ³ ×нм	3,92
Локальная высота, нм	115,3
Средняя протяженность по оси X, нм	255
Средняя протяженность по оси Y, нм	264

При рассмотрении амплитуды шероховатости фаз были получены следующие значения: феррит — 55 нм, мартенсит — 75 нм (рис. 4).

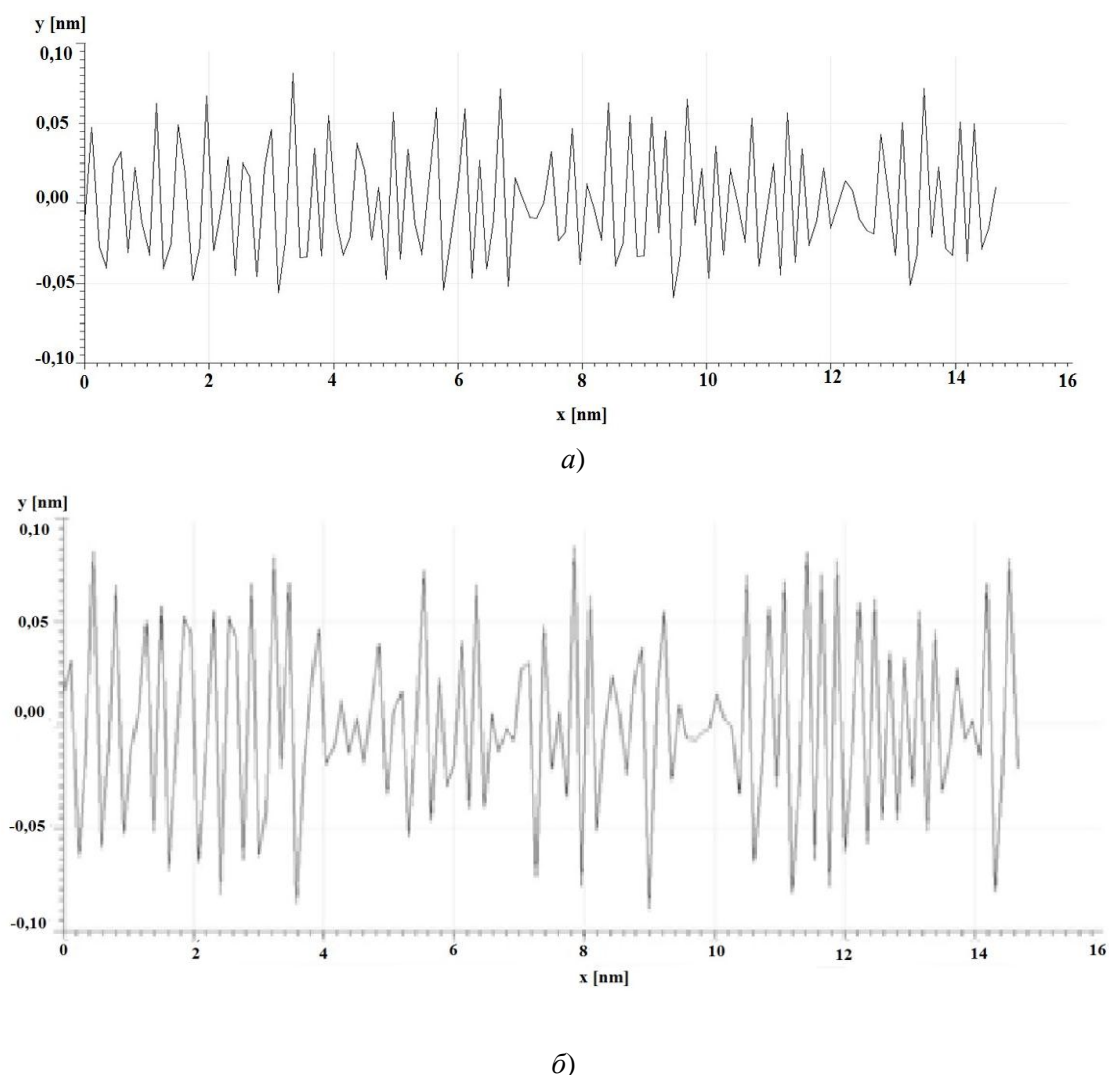


Рис. 4. Амплитуда шероховатости фаз вдоль оси X 2D-изображения:
а — феррит, *б* — мартенсит

Снятые на разных участках профили поверхности, полученные вдоль и поперек изображения, также указывают на гетерогенность структуры (рис. 5).

Наблюдается строчечная повторяющаяся с определенной периодичностью структура с разной шириной строк.

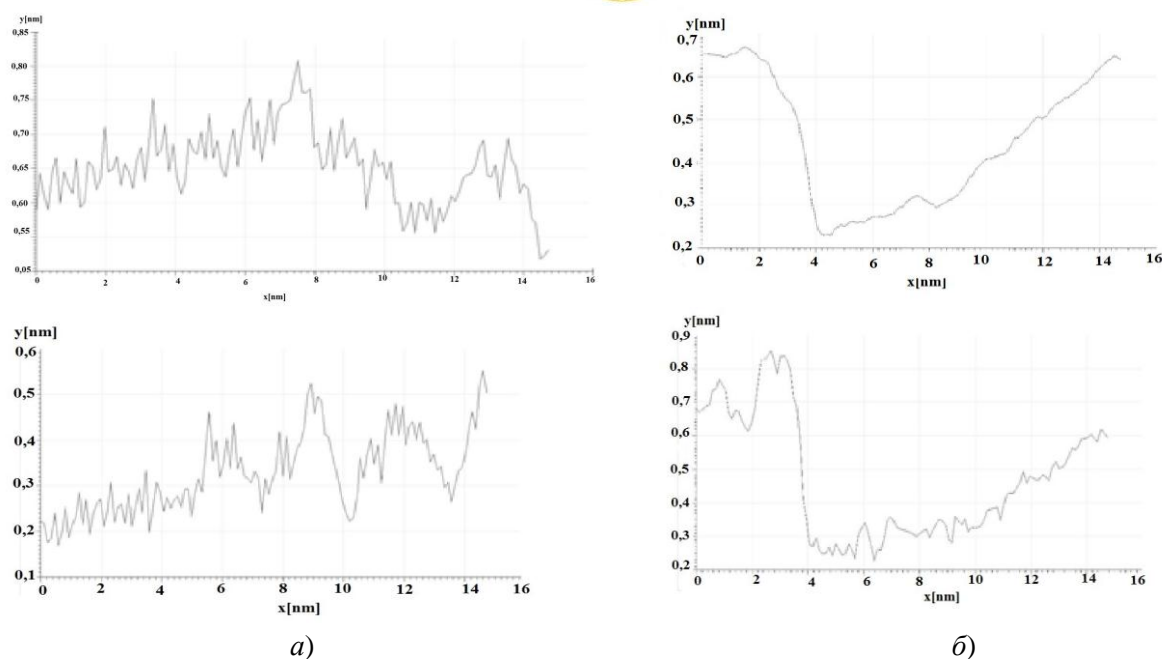


Рис. 5. Профили поверхности излома ЕФМК, полученные вдоль и поперек изображения:
а — в направлении оси X изображения; б — в направлении оси Y изображения

Заключение. Полученные данные фрактографического анализа ЕФМК методами АСМ хорошо согласуются с результатами оптической микроскопии с учетом масштаба изучаемых структурных составляющих. Трехмерное АСМ-изображение излома поверхности ЕФМК и его профили показывают наличие строчечности в структуре стали. Геометрические параметры указывают на наличие в структуре фаз с различными физическими и физико-химическими свойствами, что коррелирует с данными микротвердости при проведении металлографических исследований.

Библиографический список

1. Шляхова, Г. В. Исследование структуры стали 40Х13 после закалки методами атомно-силовой микроскопии / Г. В. Шляхова, С. А. Баранникова, Л. Б. Зуев // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. — 2016. — Т. 21, вып. 3. — С. 1447–1449.
2. Панкратов, И. А. Определение упругих характеристик структурных составляющих сталей Х12 и Р6М5 методом атомно-силовой микроскопии / И. А. Панкратов, И. Н. Степанкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017. — Т. 40, № 7. — С. 83.
3. Пустовойт, В. Н. Кинетика и механизм роста трещины в стали со структурой ферритно-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, С. А. Гришин, М. В. Зайцева // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т.11, № 6 (57). — С. 857–861.
4. ГОСТ 9 454–78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Государственный стандарт Союза ССР. — Москва : Издательство стандартов, 1978. — 45 с.
5. Шляхова, Г. В. Оценка параметров структуры конструкционной углеродистой стали методами АСМ / Г. В. Шляхова, Л. Б. Зуев, Е. А. Попова. // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Приложение к журналу. — 2018. — Т.23, № 123. — С. 581–584.
6. Исследование строчечной структуры стали методом атомно-силовой микроскопии / В. В. Дука, Л. П. Арефьева, В. Н. Пустовойт, Д. А. Киселёва // Письма о материалах. — 2020. — Т.10, № 4 (40). — С. 445–450.

7. Структурная организация и свойства естественного стального ферритно-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, Ю. М. Домбровский, В. В. Дука // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 2020. — № 6 (780). — С. 15–21

8. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS) / Национальный стандарт Российской Федерации — Москва: Стандартинформ, 2016. — 55 с.

9. Методы выявления мартенсита деформации в аустенитно-ферритных сталях / М. Б. Ригмант, М. К. Корх, Д. И. Давыдов [и др.] // *Дефектоскопия*. — 2015. — № 11. — С. 28–42.

10. The use of the atomic force microscopy to investigate the structure of steel 14G2 / V. V. Duka, V. N. Pustovoit, D. A. Ostapenko [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 680. — Art. 012023.

Об авторах:

Дука Валентина Владимировна, старший преподаватель кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) valentina.duka.92@mail.ru

Арефьева Людмила Павловна, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ludmilochka529@mail.ru

Шахова Лилия Сергеевна, магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), shahowa.lilya@yandex.ua

About the Authors:

Duka, Valentina V., Senior lecturer, Department of Physical and Applied Materials Science, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), valentina.duka.92@mail.ru

Arefeva, Lyudmila P., Associate professor, Department of Physical and Applied Materials Science, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand.Sci., Associate professor, ludmilochka529@mail.ru

Shakhova, Liliya S., Master's degree student, Department of Physical and Applied Materials Science, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), shahowa.lilya@yandex.ua