

О.А. Рудакова

O.A. Rudakova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОСОБЕННОСТЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

THE FRACTAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF FEATURES OF WELD FATIGUE BREAKDOWN

Поверхность усталостных изломов отражает особенности разрушения и является фотографией истории разрушения. Показана эффективность применения метода фрактального анализа для количественного описания геометрии излома, установлена взаимосвязь между фрактальной размерностью поверхности излома и количественными параметрами сопротивления усталости. Установленная взаимосвязь позволяет анализировать причины усталостного разрушения многослойных сварных швов.

Ключевые слова: сварной шов, усталостное разрушение, инкубационный период, скорость роста усталостной трещины, поверхность излома, фрактальная размерность поверхности излома.

The fatigue fracture surface indicates breakdown features and it is a photo of breakdown history. In this paper efficiency of fractal analysis method application for the quantitative description of fracture geometry is shown, the interrelation between fractal dimension of a fracture surface and quantitative parameters of a fatigue resistance is ascertained. The determined interrelation enables to analyze the fatigue breakdown sources of multilayer welds.

Keywords: a weld, fatigue breakdown, the incubation period, fatigue crack growth rate, a fracture surface, fractal dimension of a fracture surface.

В процессе сварки плавлением воздействие термического цикла сварки (ТЦС) приводит к появлению в зоне сварных соединений резко выраженной структурной и механической неоднородности: как правило, в металле сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ) образуется смешанная структура, состоящая из полигонального и видмаштеттова феррита, перлита, бейнита, мартенсита, зон крупного и мелкого зерна [1–3]. Указанные структурные изменения сопровождаются образованием развитого участка разупрочнения, оказывающего значительное влияние на свойства сварных соединений. Так, в работах отмечается, что в зоне сварных соединений, отличающихся резко выраженной структурной и механической неоднородностью и наличием де-

фектов на поверхности, как правило, зарождаются очаги усталостного разрушения.

Большую информацию о характере разрушения несет поверхность излома, изломы являются своеобразной фотографией истории разрушения. Большой интерес представляет установление взаимосвязи между количественными параметрами поверхности излома и параметрами сопротивления усталостному разрушению.

Исследовали металл сварных швов стали 10Г2ФБЮ, выполненных по трем различным технологиям: технология 1 – ручная дуговая сварка: корень шва – ЛБ-52 У; заполнение/облицовка – ОК 74.70; технология 2 – ручная дуговая сварка: корень шва – Conarc 52; заполнение/облицовка – Conarc 74; технология 3 – полуавтоматическая сварка самозащитной порошковой проволокой с проплавлением корня шва в CO₂: корень шва – SuperArc L-56; заполнение/облицовка – Innershield NR-208 Special. Для исследования сопротивления усталости вырезали образцы из верхней части сварных соединений типа Шарпи таким образом, чтобы зарождение усталостной трещины началось в облицовочном слое, имеющем наиболее грубое строение, и проводили испытание консольно закрепленного образца на усталостный изгиб на воздухе при амплитудах 1,0 и 1,2 мм. По результатам испытания были рассчитаны количественные параметры сопротивления усталостному разрушению – продолжительность инкубационного периода зарождения усталостной трещины и скорость роста усталостной трещины в период стабильного роста (таблица).

Количественные параметры сопротивления усталости

Технология	Инкубационный период, циклы		Скорость роста усталостной трещины в период стабильного роста, мм/цикл	
	Амплитуда нагружения 1,0 мм	Амплитуда нагружения 1,2 мм	Амплитуда нагружения 1,0 мм	Амплитуда нагружения 1,2 мм
1	317 400	97 200	0,00001922	0,00001510
2	150 000	45 000	0,00002222	0,00004525
3	105 000	85 000	0,00005729	0,00002041

Анализ полученных зависимостей в сопоставлении с фрактограммами поверхности излома (рис. 1) позволил выделить наиболее характерные участки усталостных изломов, наибольший интерес из которых представляет участок стабильного роста трещины, где продвижение усталостной трещины происходит с равномерной скоростью [4].

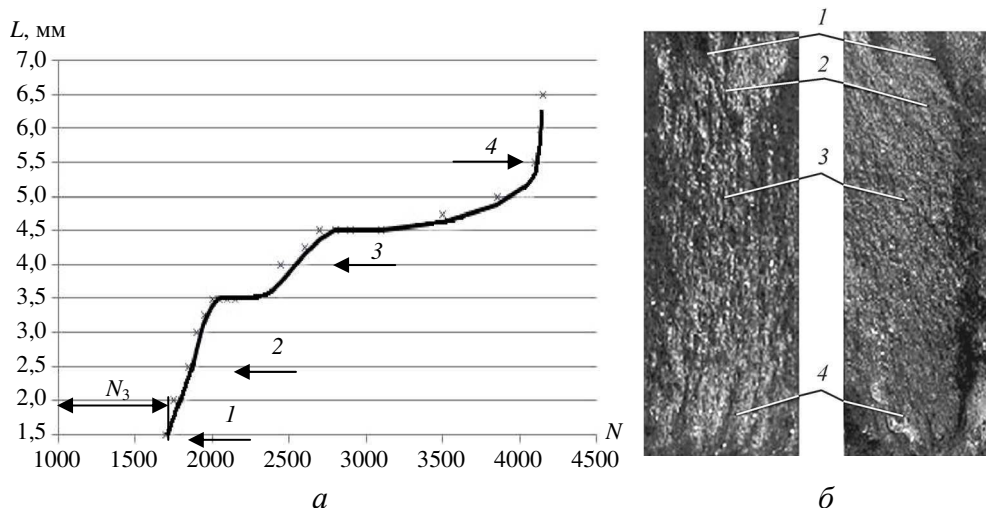


Рис. 1. Характерные участки усталостных изломов на зависимостях роста усталостной трещины от числа циклов нагружения (*а*) и фрактограммах поверхности разрушения (*б*): 1 – очаг разрушения; 2 – зона стабильного роста трещины; 3 – зона нестабильного роста трещины; 4 – зона долома

Исследование фрактографических особенностей изломов показало, что рельеф излома (характер и размер микрополос) определяется такими параметрами, как амплитуда нагружения, скорость распространения усталостной трещины в период стабильного роста и продолжительность инкубационного периода зарождения усталостной трещины. Так, например, с увеличением скорости распространения трещины на поверхности излома наблюдаются более грубые и протяженные борозды (рис. 2).

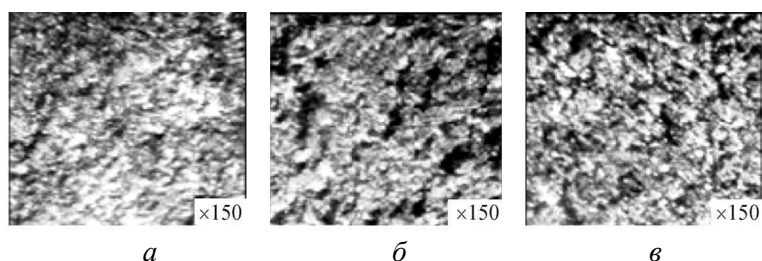


Рис. 2. Поверхности излома сварных швов стали 10Г2ФБЮ, соответствующие различным скоростям распространения усталостной трещины в период стабильного роста, мм/цикл: *а* – 0,000019; *б* – 0,000022; *в* – 0,000057

Для количественного описания геометрии излома в работах [5–6] успешно применен метод фрактального анализа и показано, что фрактальная размерность является комплексным показателем геометрии излома, что позволяет количественно описывать взаимосвязь между строением излома

и параметрами сопротивления усталости. По алгоритму фрактального анализа [5–7] обрабатывали фотографии поверхностей изломов сварных швов стали 10Г2ФБЮ, выполненных по различным технологиям (рис. 3).

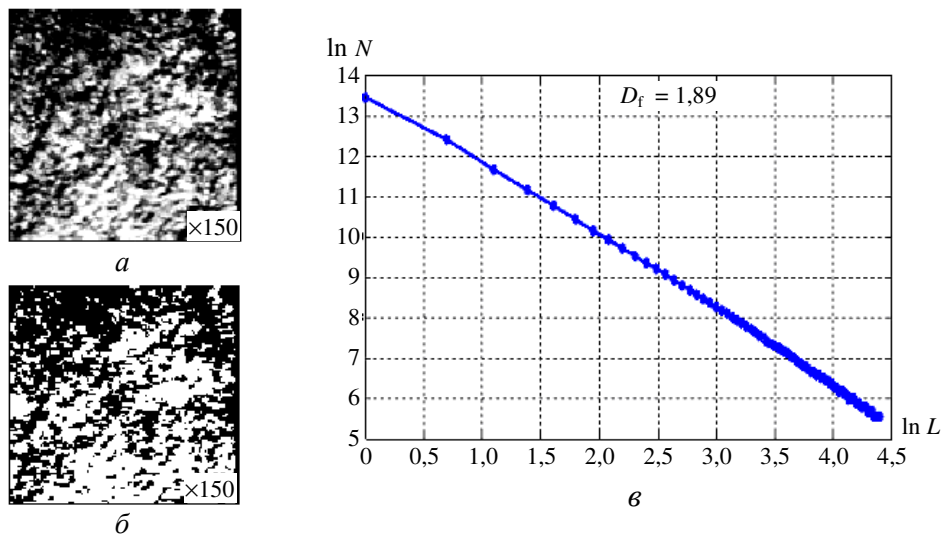


Рис. 3. Алгоритм фрактального анализа поверхности излома: *a* – фотография излома; *b* – бинаризованное изображение фотографии; *в* – расчет фрактальной размерности

Результаты расчета фрактальных размерностей поверхностей изломов показали, что фрактальная размерность является количественным параметром строения усталостных изломов и отражает особенности усталостного разрушения (рис. 4).

Установлена зависимость между фрактальной размерностью как параметром рельефа излома и количественными параметрами сопротивления усталости – скоростью роста усталостной трещины в период стабильного роста и инкубационным периодом зарождения усталостной трещины. Чем более грубый рельеф наблюдается на поверхности излома (инкубационный период 60 000–120 000 циклов, скорость роста $0,3500 \cdot 10^{-4}$ – $0,5729 \cdot 10^{-4}$ циклов/минуту), тем меньше фрактальная размерность $D_f = 1,79 \dots 1,82$, при более гладкой поверхности излома, при значении инкубационного периода 130 000–340 000 циклов и скорости роста трещины $0,1510 \cdot 10^{-4}$ – $0,2222 \cdot 10^{-4}$ циклов/минуту, фрактальная размерность изменяется в пределах $D_f = 1,87 \dots 1,89$.

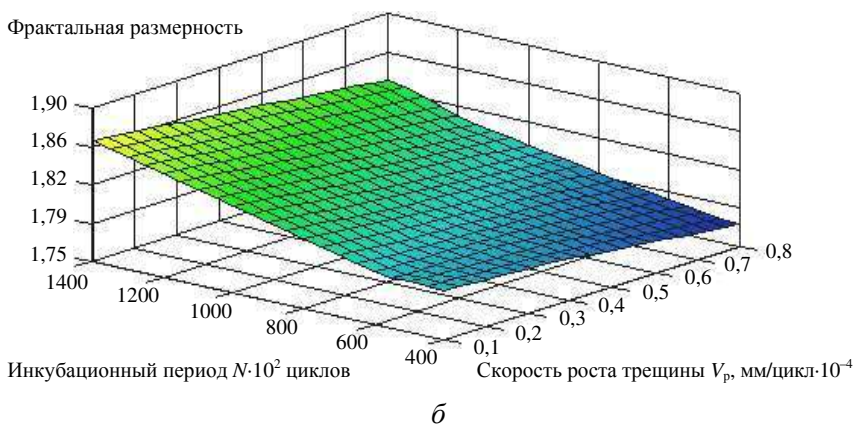
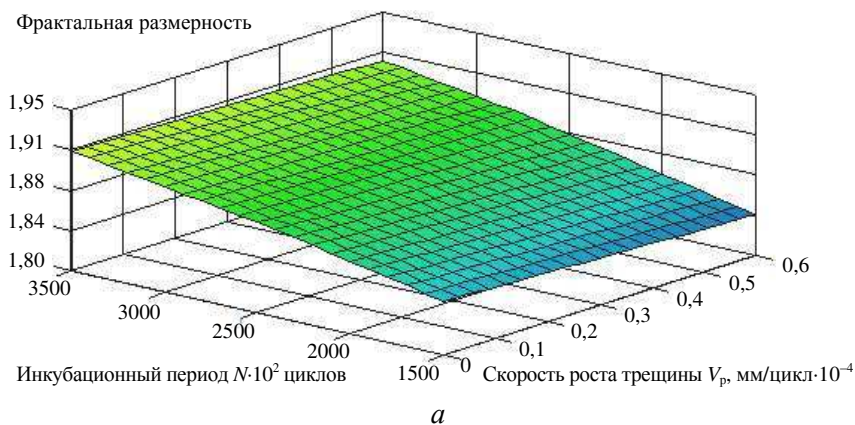


Рис. 4. Зависимости фрактальной размерности от скорости роста трещины и инкубационного периода для образцов, испытанных на амплитуде, мм: $a - 1,0$; $б - 1,2$

Таким образом, применение фрактального подхода при анализе особенностей усталостного разрушения показывает, что фрактальная размерность как количественный параметр строения поверхности излома взаимосвязана с параметрами сопротивления усталостному разрушению, что позволяет использовать метод фрактальной параметризации при анализе причин усталостного разрушения.

Список литературы

1. Майстренко Д.А., Кривоносова Е.А. Исследование усталостных характеристик металла сварных швов // Технология сварки-2004: сб. материалов науч.-практ. студ. конф., Пермь, 15 апр. 2004 г. – Пермь, 2004. – С. 18–24.

2. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 23–27.

3. Разработка методики исследования коррозионной усталости сварных соединений магистральных газонефтепроводов / О.А. Рудакова [и др.] // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2010. – Т. 12, № 2. – С. 58–64.

4. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А. Определение характеристик сопротивления усталости многослойных сварных швов стали 10Г2ФБЮ // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2012. – Т. 14, № 2. – С. 29–36.

5. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вассерман Н.Н. Структурные аспекты усталостного разрушения металла сварных швов // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 9. – С. 20–23.

6. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Шумяков В.И. Некоторые аспекты управления структурообразованием сварных швов // Сварка и контроль-2005: материалы докл. 24-й науч.-техн. конф. сварщиков Урала и Сибири, Челябинск, 16–18 марта 2005 г. – Челябинск, 2005. – С. 24–31.

7. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А., Встовский Г.В. Мультифрактальный анализ структурного состава зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 6. – С. 26–31.

Получено 1.11.2012

Рудакова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: olga_rudakova_16@mail.ru).

Rudakova Olga Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: olga_rudakova_16@mail.ru).