



транспортного средства, наилучшим образом соответствующую условиям эксплуатации и обеспечивающую оптимальные характеристики машины в целом.

УДК 669-176

ТЕКСТУРА, РАЗРУШЕНИЕ И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ИЗЛОМОВ СТАЛИ ТРУБОПРОВОДА

В.В. Усов¹, Т.С. Чернева², Д.В. Барган³

¹доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры общетехнических дисциплин и технологического образования, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: valentin_usov50@mail.ru

²аспирантка кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: chernevps@rambler.ru

³аспирант кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: bargan_90@mail.ru

Аннотация. В работе проведено исследование текстуры и установлены фрактальные особенности разрушения при испытаниях на малоцикловую усталость характерных участков сварного соединения (основного металла, зоны термического влияния и металла шва) стали трубопровода после его длительной эксплуатации.

Ключевые слова: текстура, сталь, трубопровод, сварное соединение, разрушение, фрактальная размерность.

TEXTURE, FAILURE, AND THE FRACTAL DIMENSION OF THE KINK STEEL OF PIPELINE

Valentin Usov¹, Tatiyana Cherneva², Dmitry Bargan³

¹Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Head of Department of technical disciplines and technology education, State Higher Educational Institution “South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky”, Odessa, Ukraine, e-mail: valentin_usov50@mail.ru

²postgraduate student of the Department of Physics, State Higher Educational Institution “South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky”, Odessa, Ukraine, e-mail: chernevps@rambler.ru

³ postgraduate student of the Department of Physics, State Higher Educational Institution “South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky”, Odessa, Ukraine, e-mail: bargan_90@mail.ru



Abstract. A study of texture were carried out and were found the fractal features of failure when tested in low-cycle fatigue of specific welded joints (base metal, heat affected zone and the welded seam) steel pipe after its long-term operation.

Keywords: texture, steel, pipeline, welded joint, failure, fractal dimension.

Введение. Безопасная эксплуатация нефтяных и газовых трубопроводных транспортных систем может быть обеспечена, в первую очередь, путем изучения причин разрушения трубопроводов лабораторными исследованиями основного металла, зоны термического влияния и сварного соединения. Поэтому остается актуальным экспериментальное определение основных закономерностей малоциклового усталостного (МЦУ) разрушения. Фрактографические исследования изломов металла методами оптической и сканирующей электронно-микроскопической микроскопии позволяют установить механизм и характер разрушения.

Ранее было показано, что хрупкое разрушение образцов низкоуглеродистой стали при испытаниях на ударный изгиб и малоцикловое усталостное хрупкое разрушение алюминия имеет фрактальную природу [1].

Цель работы. Цель данной работы – исследование текстуры и установление фрактальных особенностей разрушения при испытаниях на малоцикловую усталость характерных участков сварного соединения (основного металла (ОМ), зоны термического влияния (ЗТВ) и металла шва (МШ)) стали трубопровода после его длительной эксплуатации.

Материал и результаты исследований. Материалом для исследования послужили образцы сварного соединения, вырезанные из трубы $\varnothing 530 \times 8$ мм магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У. Предметом фрактографических исследований послужили изломы корсетных образцов после испытаний на малоцикловую усталость. На универсальной электрогидравлической машине 3201УЕ - 20 проводили одноосное растяжение – сжатие по жесткому циклу деформирования. Циклическая нагрузка велась с постоянной скоростью деформирования 6%/мин. при температуре 20°C. Асимметрия цикла составляла $R_\varepsilon = -1$. Корсетные образцы для испытаний вырезали из трех зон сварного соединения трубы магистрального трубопровода из стали 17Г1С-У: основного металла (ОМ), зоны термического влияния (ЗТВ) и металла шва (МШ). Выявление соответствующих зон сварного соединения перед вырезкой образцов проводили методом травления (в 5 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте) в плоскости (Т-С), перпендикулярно плоскости прокатки (L-T), где L – направление прокатки, Т – направление в плоскости прокатки, S – направление, перпендикулярное плоскости прокатки.



Кристаллографическую текстуру металла исследовали рентгеновским методом с построением обратных полюсных фигур (ОПФ) [2, 3]. Текстуру исследовали в направлениях, указанных на рис. 2. Перед исследованием текстуры все образцы химически полировали на глубину 0,2 мм для снятия искажений, внесенных механической обработкой. На дифрактометре ДРОН-3 проводили сканирование по углам $\theta - 2\theta$ в излучении K_{α} – молибдена. Записывали дифрактограммы линий исследуемых образцов стали трубопровода, а также образца без текстуры, который приготовили из мелких опилок исследуемой стали после рекристаллизационного вакуумного отжига. Определяли интегральные интенсивности дифракционных линий образцов и эталона и по соответствующей методике строили обратные полюсные фигуры ОПФ [2, 3]. При этом использовали нормировку ОПФ по Моррису [3].

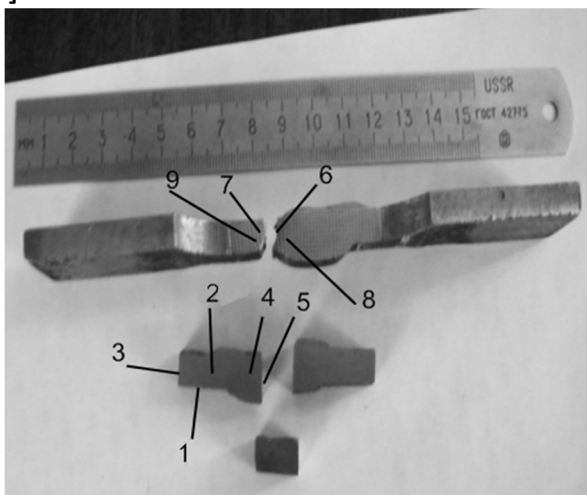


Рис. 1. Участки для исследования текстуры стали 17Г1С-У. До испытаний: 1 – плоскость прокатки ОМ; 2 – боковая поверхность ОМ; 3 – торец ОМ; 4 – боковая поверхность МШ; 5 – торец МШ. После разрушения: 6 – торец 1 МШ; 7 – торец 2 МШ; 8 – «изнанка» торца 1 МШ; 9 – «изнанка» торца 2 МШ

Макрофотографии изломов сделаны с помощью цифрового фотоаппарата NIKON. Исследования поверхности разрушения на макроуровне проводили с помощью стереоскопического оптического микроскопа МБС-10, а микрофрактографический анализ изломов - на модернизированном растровом (сканирующем) электронном микроскопе РЭМ - 100У при ускоряющем напряжении $U = 30$ KV с сохранением снимков в цифровом формате.

Фрактальную размерность двумерных изображений изломов определяли так называемым методом ячеек («box method») [4]. На изображение выбранной кривой линии границы фрагмента излома накладывали элементарную сетку, которая состояла из квадратов со сторонами ℓ_i . При



этом подсчитывали число квадратов $N(\ell_i)$, через которые проходит кривая. Затем изменяли масштаб сетки, а, следовательно, и сторон квадрата, равных $\ell_1 > \ell_2 > \ell_3 > \dots > \ell_n$. В данном случае масштаб сетки составил: (4×4) см; (2×2) см; (1×1) см; (0,5×0,5) см; (0,25×0,25) см. Каждый раз подсчитывали число квадратов, пересекающих кривую, $N(\ell_1), N(\ell_2), \dots, N(\ell_3), N(\ell_3), \dots, N(\ell_n)$. Результаты заносили в таблицу. Если $N(\ell)$ – минимальное число квадратов, которые в совокупности полностью покрывают фрактальную кривую, то

$$N(\ell) = \alpha \cdot \ell^{-D}, \quad (1)$$

где $D = \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{\ln N(\ell)}{\ln(1/\ell)}$ по определению обычно называют фрактальной раз-

мерностью или размерностью Хаусдорфа-Безиковича [4]. Затем, используя соотношение (1) в двойных логарифмических координатах строили графики зависимости $\lg N(\ell) = f(\lg \ell)$. Тангенс угла наклона графика к оси $\lg \ell$ равнялся фрактальной размерности D . Погрешность определения фрактальной размерности вышеописанным методом не превышает 5 % [1].

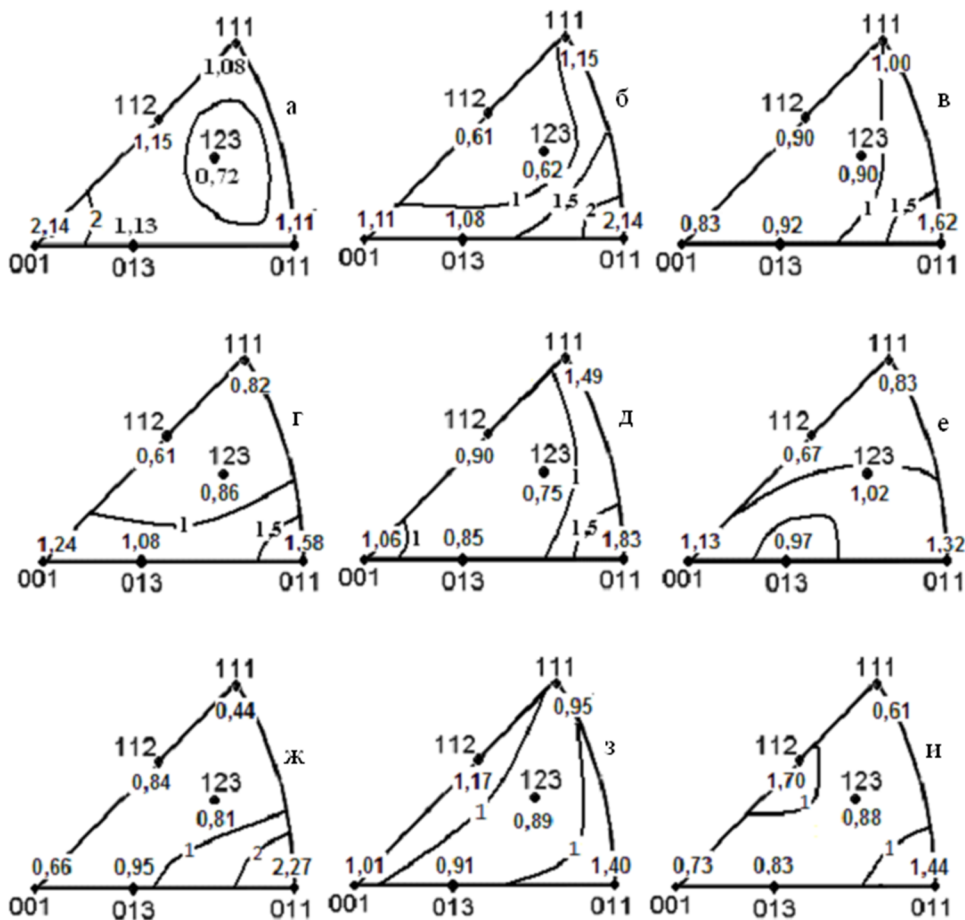


Рис. 2. ОПФ стали 17Г1С-У на участках, обозначенных цифрами на рис. 1.



Экспериментальные ОПФ, снятых на участках, обозначенных цифрами на рис. 1, представлены на рис. 2.

При обозначении идеальных ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ в цилиндрическом образце мы подразумеваем, что семейство плоскостей $\{hkl\}$ расположено в плоскости, касательной к цилиндрической поверхности (плоскость L-T), а совокупность кристаллографических направлений $\langle uvw \rangle$, принадлежащих $\{hkl\}$, параллельны оси цилиндра (оси трубы L).

Текстура основного металла в исходном состоянии до начала усталостных испытаний (рис. 2, а) может быть описана как комбинация ориентировки прокатки $\{001\}\langle 110 \rangle$ (основная) и $\{112\}\langle 110 \rangle + \{111\}\langle 110 \rangle$ (дополнительные), а также ориентировки сдвига типа $\{110\}\langle 001 \rangle$.

Присутствие текстурного компонента $\{001\}\langle 110 \rangle$, как известно, облегчает развитие слоисто-хрупких трещин нормального отрыва [6], так как кристаллографические плоскости куба $\{001\}$ являются основными плоскостями скола в ОЦК металлах [7]. Поэтому, исходя из текстуры, следует ожидать разрушения основного металла трубопровода преимущественно по типу скола.

Присутствие более «вязкого» компонента необычный для стали текстуры сдвига $\{110\}\langle 001 \rangle$, обусловленной трением при контакте металла с валками прокатного стана [5], будет в определенной степени ослаблять склонность основного металла к разрушению сколом.

В текстуре сварного шва в исходном состоянии наблюдается усиление сдвигового компонента $\{110\}\langle 001 \rangle$ (или компонента текстуры Госсса), что обусловлено рекристаллизацией [8] при сварке. Этот компонент является основным. Кроме того в текстуре присутствуют также компоненты текстуры основного металла $\{001\}\langle 100 - 111 \rangle$ (рис. 2, г, д). Однако интенсивность «вязкой» текстуры сдвига здесь превышает интенсивность «хрупких» кубических компонентов. Поэтому, исходя из текстуры МШ, следует ожидать более вязкого характера разрушения при испытаниях на МЦУ.

В процессе испытаний на МЦУ наблюдается изменение текстуры в околошовной зоне (рис. 2, е, ж) и сварном шве (рис. 2, з, и). В торцевой части образца для испытаний после разрушения наблюдаются ориентировки растяжения – сжатия. Так в околошовной торцевой зоне 1 (рис. 1) с направлением растяжения совпадают, в основном, кристаллографические направления, расположенные вдоль диагонали стереографического треугольника $\langle 001 \rangle - \langle 110 \rangle$ (рис. 2, е). Набор таких ориентировок при растяжении обусловлен механизмом деформации скольжением по кристаллографическим плоскостям $\{110\}$ в направлениях $\langle 110 \rangle$ [3]. В околошовной торцевой зоне 2 (рис. 1) с направлением растяжения совпадают кристаллографические направления $\langle 110 \rangle$ (рис. 2, ж), что обусловлено скольже-



нием по кристаллографическим плоскостям $\{110\}$, но в направлениях $\langle 111 \rangle$ [3].

В сварном шве в направлении растяжения, совпадающем с продольной осью образца (рис. 1), преимущественно располагаются кристаллографические направления $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ (рис. 2, и, к). Первая из вышеуказанных ориентировок образуется в ОЦК металлах при растяжении в результате скольжения по системам кристаллографических плоскостей $\{110\}$ в направлениях $\langle 111 \rangle$ [3]. Появление второй из вышеуказанных ориентировок при циклическом одноосном растяжении, вероятно, обусловлено двойникованием [8].

Типичный излом после испытаний на малоцикловую усталость корсетного образца основного металла (ОМ) на макроуровне представлен на рис. 3.

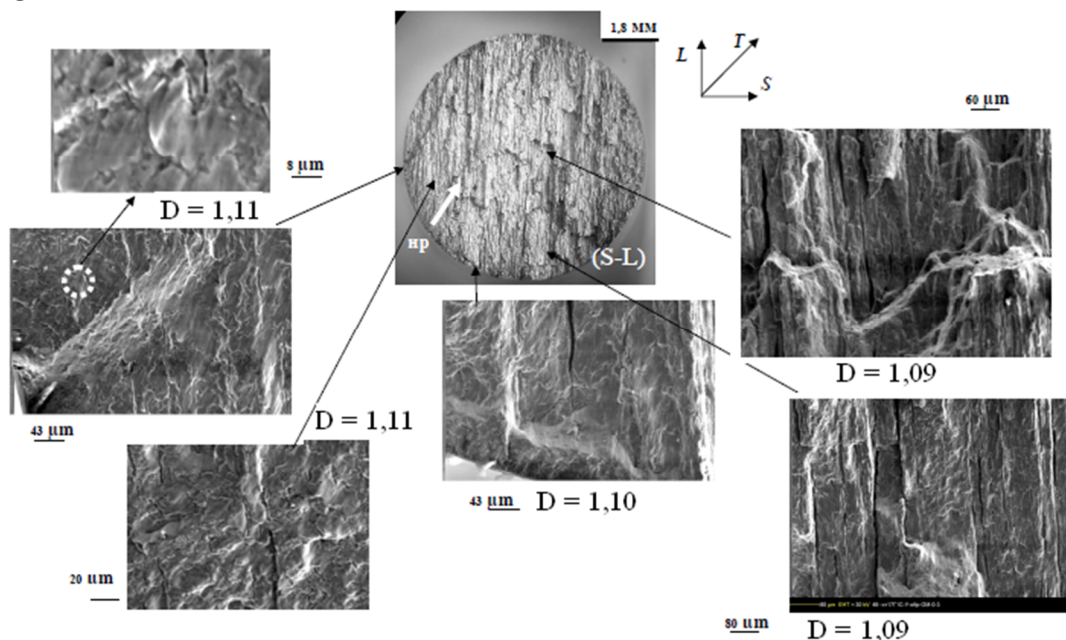


Рис. 3. Типичный микрорельеф разрушения корсетного образца ОМ: HP - направление разрушения; D – фрактальная размерность.

Характер излома позволяет заключить, что образец, вырезанный из ОМ, разрушается хрупко по механизму квазискола, как это следовало из анализа соответствующей текстуры. Фрактальная размерность в различных участках излома ОМ изменяется от 1,09 до 1,11, средняя величина фрактальной размерности поверхности излома основного металла составила $D_{cp} = 1,10$.

Аналогичные результаты показал анализ фрактальной размерности излома образца ЗТВ (рис. 4).

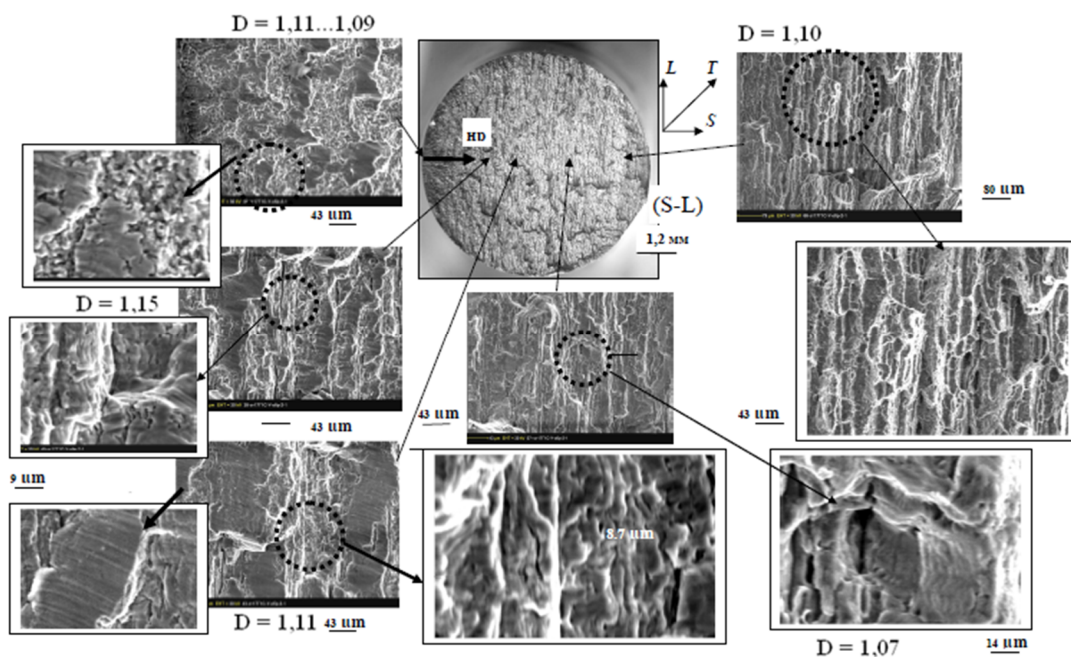


Рис. 4. Типичный микрорельеф разрушения корсетного образца ЗТВ: HP - направление разрушения; D – фрактальная размерность.

Фрактальная размерность в различных участках излома ЗТВ изменяется от 1,07 до 1,15, так что средняя величина фрактальной размерности поверхности излома образца ЗТВ металла составила $D_{cp} = 1,11$.

Типичный микрорельеф излома корсетного образца металла сварного шва (МШ) после испытаний на МЦУ характеризуется сглаженным рельефом. Малорельефные рубцы ориентированы в направлении магистральной трещины (рис. 5).

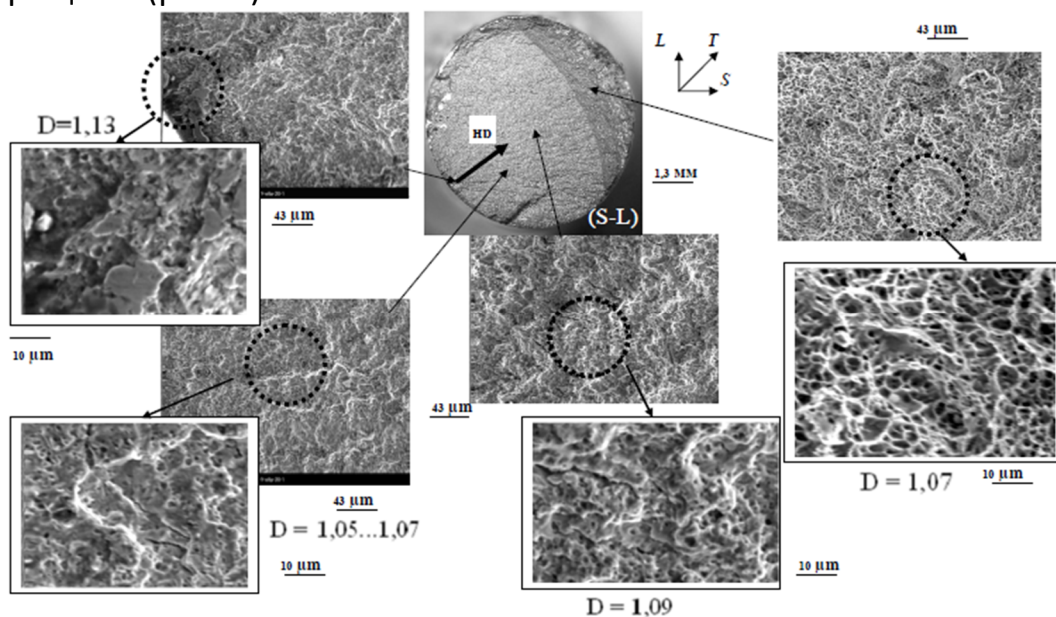


Рис. 5. Типичный микрорельеф разрушения корсетного образца МШ: HP - направление разрушения; D – фрактальная размерность.



Анализ излома МШ позволил заключить, что образцы, вырезанные из зоны МШ, разрушаются по механизму образования ямок (вязкое разрушение) в отличие от квазихрупкого разрушения с образованием вторичных трещин расслоения, характерных для ОМ (рис. 3) и, в меньшей степени, для ЗТВ (рис. 4). При этом фрактальная размерность на различных участках излома образца МШ изменяется от 1,05 до 1,13, а средняя величина фрактальной размерности МШ составила $D_{cp} = 1,08$.

Общей особенностью разрушения корсетных образцов ОМ, ЗТВ и МШ в условиях малоциклового усталости является образование большого количества ячеек разрушения.

Таким образом, прослеживается тенденция увеличения фрактальной размерности при переходе от вязкого характера разрушения металла шва к квазихрупкому его характеру при разрушении основного металла и ЗТВ.

Оценим критический размер R хрупкой трещины, исходя из ее фрактальной модели [20]. Согласно [20]

$$R^{2-D} \approx \frac{2\gamma DE}{\sigma^2} \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала; γ – удельная поверхностная энергия, D – фрактальная размерность, σ – предел прочности.

Подставим в уравнение (2) соответствующие численные данные. Значение модуля упругости для стали возьмем из [9] $E = 210$ ГПа. Примем $\gamma \approx 1$ [9]. По данным испытаний на разрыв были получены значения предела прочности в интервале от 308 до 327 МПа. В результате получим, что критический размер хрупкой трещины основного металла (квазихрупкое разрушение) находится в пределах от 5,30 до 5,62 мкм (среднее значение составило 5,45 мкм), что близко к среднему размеру дислокационных ячеек стали [1].

Вывод. 1. Текстура стали 17Г1С-У трубопровода после длительной эксплуатации перед испытаниями на усталость является типичной текстурой прокатки низкоуглеродистых сталей с основным компонентом $\{001\}\langle 110 \rangle$, дополнительными $\{112\}\langle 110 \rangle$, $\{111\}\langle 110 \rangle$ и компонентом сдвига $\{110\}\langle 001 \rangle$. В сварном шве текстура представлена совокупностью компонентов сдвига $\{110\}\langle 001 \rangle$ (основная) и ориентировок куба $\{001\}\langle 110 - 111 \rangle$. После разрушения образца в условиях малоциклового усталости в направлении прикладываемой нагрузки в сварном шве формируются ориентировки типа $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$. Первая обусловлена деформацией скольжения по системам $\{110\}\langle 111 \rangle$, а вторая – двойникованием.

2. Образцы, вырезанные из зоны сварного шва, разрушаются по механизму образования ямок (вязкое разрушение) в отличие от квазихрупкого разрушения с образованием вторичных трещин расслоения, характерных



для основного металла и, в меньшей степени, для зоны термического влияния.

3. Прослеживается тенденция увеличения средней фрактальной размерности от 1,08 для вязкого разрушения металла сварного шва до 1,10 для основного металла и 1,11 для зоны термического влияния при квазихрупком характере разрушения.

4. Фрактальная модель хрупкой трещины позволяет оценить критический ее размер, средняя величина которого для основного металла при квазихрупком разрушении составила 5,45 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Usov V.V. Fractal nature of the brittle fracture surfaces of metal / V.V. Usov, N.M. Shkatulyak // *Materials Science*. – 2005. – Vol. 41, No. 1, – P. 62 – 66.

2. Бородкина М.М. Рентгенографический анализ текстуры в металлах и сплавах / М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор. – М.: Металлургия, 1982. – 272 с.

3. Вишняков Я.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 343 с.

4. Bunde A. *Fractals and Disordered Systems* / A. Bunde, S. Havlin. – Heidelberg: Springer, 1991. – 350 p.

5. Брюханов А.А. Влияние контролируемой прокатки на неоднородность кристаллографической текстуры по сечению толстолистного проката низколегированной стали / А.А. Брюханов, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк // *Изв. вузов. Черная металлургия*. - 1989. - №2. - С. 73-76.

6. Усов В.В. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоперлитных сталей / В.В.Усов, Н.М. Шкатуляк, В.С. Гиренко и др. // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1990. – № 1. – С. 12С – 125.

7. Баррет Ч.С. Структура металлов / Ч.С. Баррет, Т.Б. Масальский. – М.: Металлургия, 1984. – 685 с.

8. Hölscher M., Rolling and recrystallization textures of bcc steels / M. Hölscher, D. Raabe, K. Lücke // *Steel research*. – 1991. – Vol. 62, No. 12. – P. 567 – 575.

9. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. / Р. Хоникомб – М.: ИЛ, 1962. – 582 с.

УДК 669-176

ТЕКСТУРА ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ МАГНИЯ

Н.М. Шкатуляк¹, А.И. Соколенко², С.В. Санькова³

¹кандидат физико-математических наук, приват-профессор кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Одесса, Украина, e-mail: shkatulyak@mail.ru