

Писаренко Г. Г.

Майло А. Н.

*Институт проблем  
прочности  
им. Г. С. Писаренко  
НАН Украины*

Pisarenko G. G.

Maylo A. N.

*G.S. Pisarenko Institute  
for Problems of Strength  
National Academy of  
Sciences of Ukraine*

УДК 621.921

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТАЛИ X18H10T ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ R/S МЕТОДОМ

*В работе представлены характеристики распределения неупругих свойств поверхностного слоя стали X18H10T при циклическом нагружении. С применением показателя Херста выявлены закономерности рассеянной поврежденности стали X18H10T на базе  $10^7$  циклов нагружения.*

*Ключевые слова: усталость, рассеянная поврежденность, неупругость.*

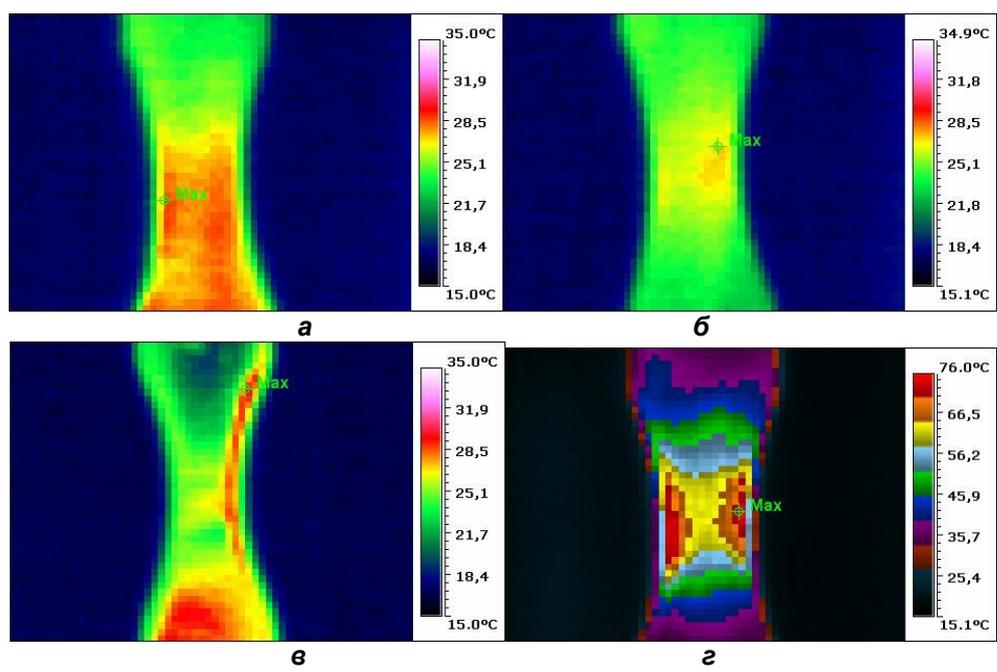
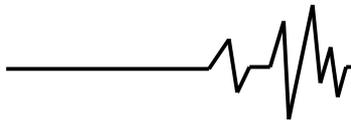
Методы определения циклической долговечности элементов металлоконструкций, основанные на моделях сопротивления усталостному разрушению, базируются преимущественно на интегральной оценке эволюции пластических свойств [1]. Критерием состояния поврежденности является величина накопленной неупругой деформаций, определяемая параметрами петли гистерезиса. Предельной величине этого параметра соответствует некоторая критическая плотность микропластических дефектов, возникших в результате циклического деформирования. Для гетерогенных материалов процесс повреждаемости характеризуется направленной эволюцией дискретной структуры материала, которая имеет критическое развитие на стадии предшествующей разрушению металлоконструкции.

Состояние поврежденности может быть представлено [2] как образовавшееся в процессе естественного формирования и, проходя ряд стадий, на каждой из которых аналогичные между собой механизмы повреждаемости [3] действуют до исчерпания способности сопротивляться разрушению на следующем масштабном уровне и т.д., до разрушения. Сформированная на заключительной стадии рассеянного разрушения структура обладает характерными особенностями, подобными, для металла поверхностного слоя и поврежденного в

объеме. В работе [4] исследован процесс пластического деформирования и установлено, что фрактальная размерность характеризует состояние пластического деформирования поверхности и определяются кинетическим процессом разрушения, конечная стадия которого имеет признаки предельного состояния. Предварительные исследования выявили корреляционную связь характеристик неупругих деформаций поверхности нагруженного металла с циклической долговечностью [5]. Показано, что в исследовании поврежденности структурно-неоднородного материала необходимо учитывать статистические свойства сопутствующих процессов.

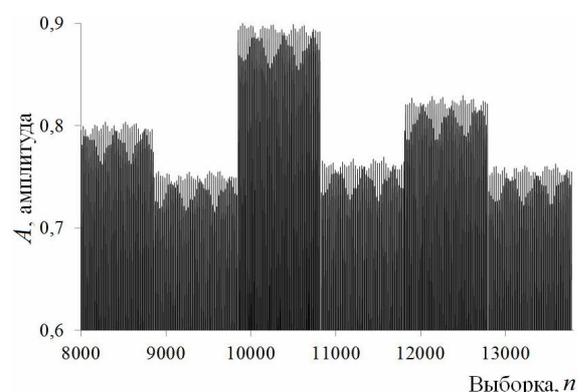
На рис. 1 приведены термограммы нагрева поверхности образца Ст. 45 сопутствующих циклическому деформированию растяжением-сжатием при разных амплитудах на частоте 20кГц в диапазоне –  $\sigma_a = (0,3-0,5)\sigma_{-1}$ .

Изменение интенсивности циклического деформирования активизирует смещение положения точки-репера максимальной температуры поверхности в зону наибольшей плотности микродеформаций, что указывает на влияние локального напряженно-деформированного состояния на диссипативные процессы поликристалла, вследствие статистической природы структуры материала.



**Рис. 1. Термограммы нагрева поверхности образца Ст. 45 (амплитуда циклических деформаций, мкм: а – 7,5; б – 10, в – 12; г – 15**

В данной работе представлены результаты анализа эволюции структурночувствительных характеристик деформаций поверхностного слоя стали X18H10T при действии переменных напряжений. На базе диаграмм фазо-частотного сканирования профиля поверхности образцов материала получены амплитудные характеристики деформирования локальных объемов материала в зоне сканирования. Пример профиля сканирования поверхности представлен на рис. 2. Диаграммы построены в координатах: амплитуды напряжения пропорционального углу сдвига фазы деформации относительно приложенного в зоне контакта механического напряжения растяжения-сжатия и числового ряда выборки измерений.



**Рис. 2 Экспериментальный ряд деформаций поверхности образца стали X18H10T**

При построении числовых рядов с применением RS-анализа использована прикладная программа «Fractan 4.4» для определенной параметр Херста [6]. Показатель Херста применяется для описания статистических свойств физических явлений [7, 8], подобных рассеянной поврежденности. Содержание метода состоит в определении среднего выборочного значения высоты ординаты профиля  $A$  на измеренной длине  $L$  в виде:

$$A(L) = \frac{1}{L} \sum A(l) \quad (1)$$

Тогда, накопившееся отклонение ординат профиля  $A(l)$  пространственного ряда составит величину  $R$ :

$$R(L) = \max A(l, L) - \min A(l, L) \quad (2)$$

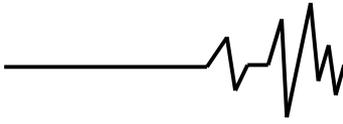
где,  $A(l, L)$  – накопившееся отклонение высот профиля  $A(l)$  относительно среднего значения.

Накопившееся отклонение профиля, нормированное на величину среднеквадратического отклонения описывается степенной зависимостью:

$$R/S = c \cdot n^H \quad (3)$$

где  $n$  – число наблюдений,  $H$  – показатель Херста,  $c$  – константа.

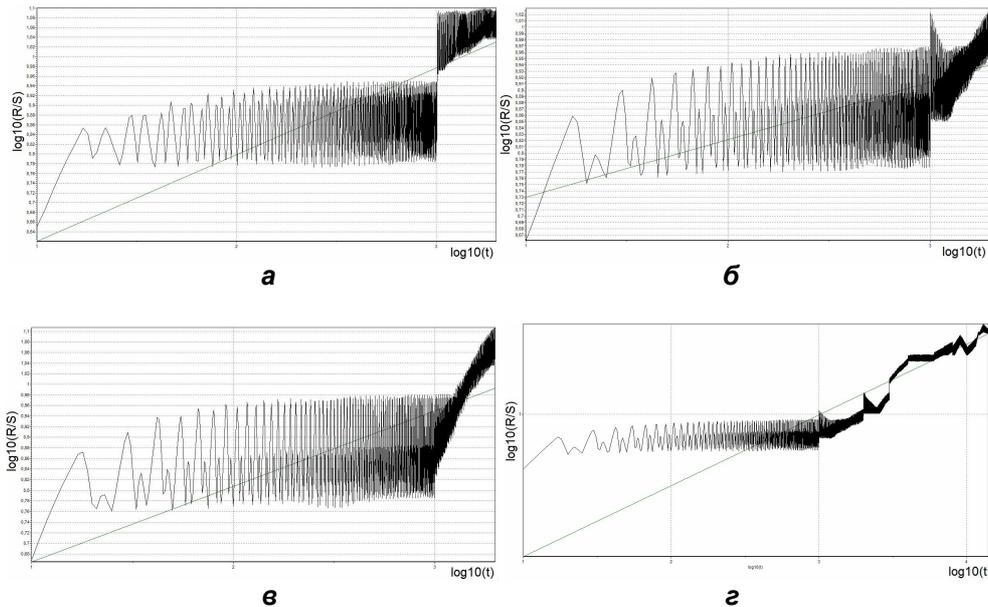
В двойных логарифмических координатах угловой коэффициент аппроксимирующей прямой функции  $R/S=f(n, t)$  определяет



величину параметра Херста. Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой соответствует значению  $H$  – (нормированного значения величины накопленного отклонения случайного ряда амплитуд локальных деформаций). Выбор параметра Херста для анализа пространственного профиля неоднородности распределения микропластических деформаций в данной работе обусловлен его высокой структурной чувствительностью к циклическим нагрузкам

вследствие применения алгоритма аддитивного формирования структуры данной функции.

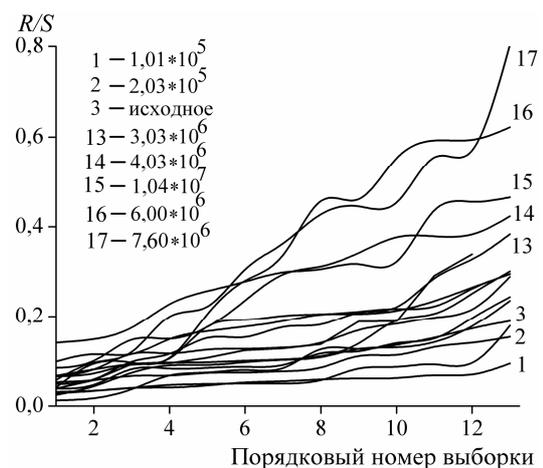
Для определения эволюции характеристического параметра пространственных закономерностей повреждаемости, адекватно характеризующих процессы рассеянного разрушения материала, необходимо учитывать стохастические свойства неоднородности поликристалла.



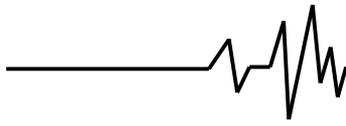
**Рис. 3. Характеристики накопленного размаха амплитуд деформаций: а, б, в- локальные ряды (одна точка поверхности 30мкм), г - обобщенный ряд (14 точек): а -  $H = 0,0913$ ; б -  $H = 0,1782$ ; в -  $H = 0,1426$ ; г -  $H = 0,4387$**

Представленные на рис. 3 диаграммы локального деформирования характеризуют эволюцию неоднородности деформаций на поверхности в сечении образца с  $\sigma_a \max$  для каждого блока циклического нагружения (рис.3 а, б, в) и обобщенную для этих трех точек на рис.3 г. Результат измерений, выполненных по описанному алгоритму, представлен на рис. 4 диаграммами обобщающими данные измерений в 150 точках поверхности.

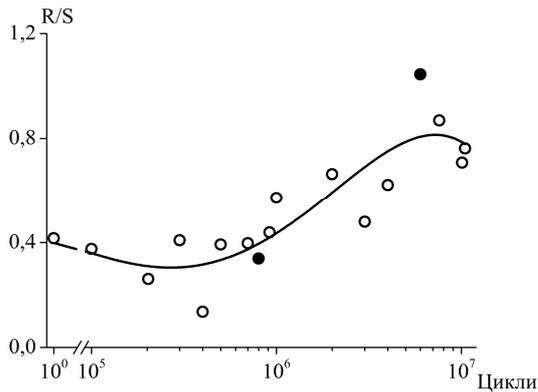
Представленные на рис. 4 две диаграммы деформаций характеризуют неоднородность распределения локальных эволюций поверхности образца в сечении с  $\sigma_a \max$ . Разный угол наклона диаграмм определяет степень изменения состояния неоднородности структурных дефектов при различных циклах нагружения относительно исходного состояния материала.



**Рис. 4. Диаграммы неоднородности локальных деформаций при усталости ( $\sigma_a = 523$  МПа)**



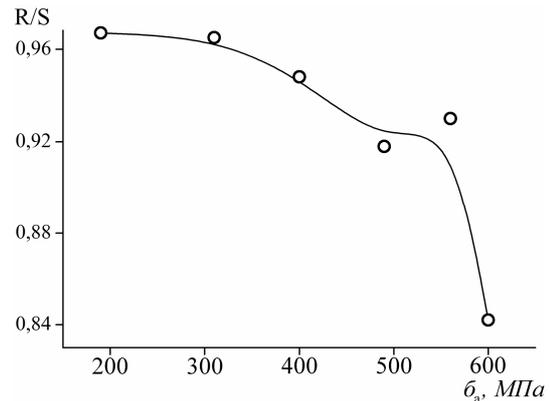
Временной ряд представленный на рис. 5 построен по данным 17 диаграмм неоднородности локальных деформаций, исходящих из общего начала координат, аналогичных диаграммам на рис.4. Каждой точке ряда, обобщающего результаты 150 измерений, соответствует дискретное состояние рассеянной поврежденности материала на определенной базе нагружения до разрушения при  $10^7$  циклов.



**Рис. 5. Диаграмма накопленного размаха локальных деформаций при многоцикловом нагружении стали X18H10T**

В рассмотренном случае форма обобщенной диаграммы характерна для процессов с немонотонной кинетикой развития. Точка экстремума диаграммы, по-видимому, соответствует наиболее развитой стадии активации действия механизма накопления рассеянной поврежденности. В случае циклического нагружения – микропластическое деформирование. При усталости упругопластичного материала известны три стадии разрушения, представленные обобщенной диаграммой [9]. Стадия рассеянного разрушения занимает около 90% циклической долговечности. Зона необратимых повреждений начинается на линии Френча и соответствует около 70% долговечности. По-видимому, зона максимума диаграммы локальных деформаций (рис. 5) расположена в этом интервале относительной долговечности образца.

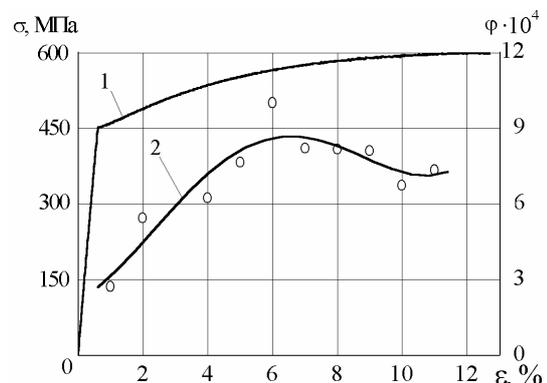
На рис. 6 показано влияния циклического нагружения на базе  $10^6$  циклов, определенное в 5-ти сечениях, неоднородно нагруженного образца до разрушения. X-ка относится к периоду завершающей стадии рассеянного разрушения примыкающего к стадии критического разрушения обобщенной диаграммы усталости.



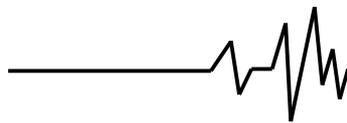
**Рис. 6. Амплитудная характеристика изменения накопленного размаха на базе  $N = 10^6$  циклов**

Диаграмма отображает ниспадающую ветвь характеристики процесса рассеянного повреждения в материале, интенсивность которого возрастает с ростом амплитуды циклических напряжений. Сравнение характеристик накопления поврежденности рис. (5, 6) в области многоциклового усталости показывает идентичную закономерность амплитудно-временных параметров деформирования.

Подобные закономерности кинетики локального деформирования при растяжении металлического образца за пределом пропорциональности получены в работе [10]. На рис. 7 представлены результаты кинетики неупругого деформирования сопоставленные с диаграммой деформирования при квазистатическом нагружении. Максимальная точка диаграммы локального деформирования совпадает с наибольшей интенсивностью упрочнения материала при растяжении на стадии квадратичного участка диаграммы.



**Рис. 7. Повреждаемость алюминиевого сплава: 1 – диаграмма растяжения; 2 – характеристика рассеянной поврежденности**



В этом же диапазоне относительных деформаций (рис. 8 а) возникает пик активности акустической эмиссии,

сопутствующей деформированию при растяжении образца, представленный в работе [11]

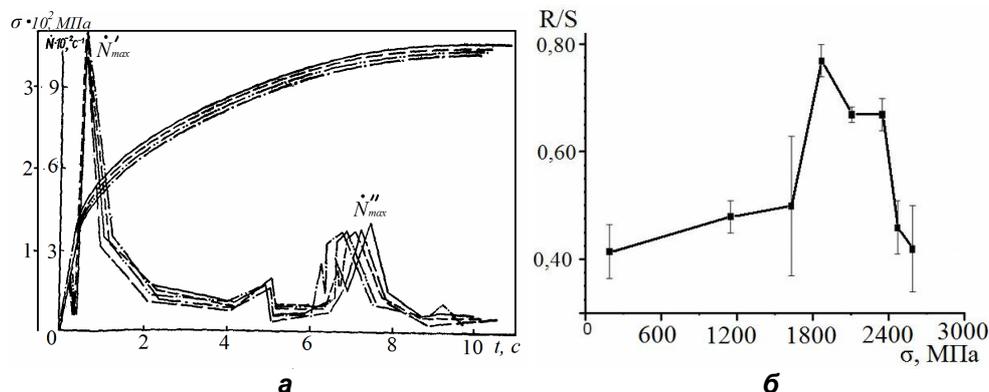


Рис. 8. Диаграммы повреждаемости при разрушении поликристалла

На рис. 8 б показана диаграмма интенсивности акустической эмиссии при квазистатическом нагружении образца хрупкого поликристаллического материала в координатах R/S-размерность - напряжение сжатия [2], в котором механизм рассеянной поврежденности под нагрузкой реализуется посредством эстафетного развития системы кристаллографических двойников деформационной природы [12], что является аналогом механизма образования полос скольжения в упругопластической среде. Точка экстремума диаграммы (рис. 8) соответствует состоянию локализации рассеянных повреждений перед образованием макротрещин. С позиций масштабновременной связанности статистических процессов разрушения поликристаллических тел, представленные примеры локализации процессов разрушения структурно неоднородных материалов, с различными пластическими свойствами, характеризуются идентичными закономерностям кинетики накопления рассеянной поврежденности. Для повышения достоверности инженерных подходов при оценке долговечности и остаточного ресурса конструктивных элементов в условиях переменных нагрузений целесообразно развивать методы исследования сопротивления усталости конструкционных материалов с применением RS-анализа.

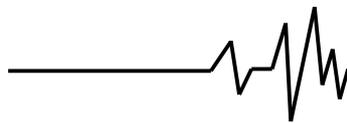
### Выводы

- Выявлены закономерности кинетика рассеянной поврежденности на базе  $10^7$  циклов нагружения стали X18H10T, показано немонокотное изменение параметра Херста при многоциклового усталости.

- Определены амплитудные закономерности влияния циклического нагружения на параметры локального деформирования поверхностного слоя образца стали X18H10T на базе  $10^7$  циклов.

### Список использованных источников

1. Цыбанев Г.В. Определение долговечности материалов при циклическом нагружении со случайной амплитудой напряжений по модели предельного истощения пластичности // Надежность и долговечность. – 2011. – Вып. 34. – С. 67–79.
2. Гиляров В.Л. Нелинейные эффекты в реакциях твердых тел на механические и термические воздействия: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук / В.Л. Гиляров. – Сп.-Петербург. ФТИ РАН, 2007. – 35 с.
3. Яковлева Т. Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. / – К. : Наук. думка, 2003. – 238 с. – ISBN 966-00-000103-7.
4. Гиляров В.Л. Фликер-эффект, фрактальные свойства разрушающихся материалов и прогнозирование разрушения / В.Л. Гиляров // ФТТ. – 1994. – Т. 36, Вып. 8. – С. 2247–2252.
5. Г. Писаренко, О. Войналович, А. Майло Амплітудні характеристики дискретної непружності субмікросталічного титану BT1-0 за багатоциклового навантажування. Вісник ТНТУ. – №3(71). – 2013. – С. 47–52.
6. А.Г. Масловская, Т.Р. Осокина, Т.К. Барабаш Применение фрактальных методов для анализа динамических данных / А.Г. Масловская, Т. Р. Осокина, Т.К. Барабаш // Вестник амурского государственного



университета. – 2010. – вып : 51: Сер. Естеств. и экон. науки. – С. 13–20.

7. Б. Мандельброт «Фрактальная геометрия природы» – М.: Мир. 2002. – 656 с.

8. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Ю. Фрактальная размерность как характеристика стадий деформации на мезоуровне при циклическом и активном нагружении. В сб. Фракталы и прикладная синергетика, М.: 1999. – С. 142–143.

9. Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф Терентьев. – М.: Metallurgiya, 1975. – 456 с.

10. Майло А. М. Закономірності розподілу локальної непружності сплаву Д16Т в умовах статичного розтягу / А. М. Майло // Пробл. прочності. – 2009. – № 4. – С. 141–148.

11. Стрижало В.А., Добровольский Ю.В., Стрельченко В.А. и др. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.

12. А.Н. Пилянкевич, Г.С. Олейник и др.. О фрактографических особенностях усталостного разрушения пьезокерамических материалов // Пробл. Прочн. – 1978. – № 5 – С. 36–39.

#### Список источников в транслитерации

1. Tsybanev G.V. Opredelenie dolgovechnosti materialov pri tsiklicheskom nagruzhennii so sluchaynoy amplitudoy napryazheniy po modeli predelnogo ischerpaniya plastichnosti // Nadezhnost i dolgovechnost. – 2011. – Вып. 34. – С. 67–79.

2. Gilyarov V.L. Nelineynye efekty v reaktsiyakh tverdykh tel na mekhanicheskie i termicheskie vozdeystviya: avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni doktora fiz.-mat. nauk / V.L. Gilyarov. – Sn.-Peterburg. FTI RAN, 2007. – 35 s.

3. Yakovleva T. Yu. Lokalnaya plasticheskaya deformatsiya i ustalost metallov. / – К. : Nauk. dumka, 2003. – 238 s. – ISBN 966-00-000103-7.

4. Gilyarov V.L. Fliker-effekt, fraktalnye svoystva razrushayuschikhsya materialov i prognozirovaniye razrusheniya / V.L. Gilyarov // FTT. – 1994. – Т. 36, Вып. 8. – С. 2247–2252.

5. G. Pisarenko, O. Voynalovich, A. Maylo Amplitudni kharakteristiki diskretnoy nepruzhnosti submikrokristalichnogo titanu VT1-0 za bagatotsiklovogo navantazhuvannya. Visnik NTU. – №3(71). – 2013. – С. 47–52.

6. A.G. Maslovskaya, T.R. Osokina, T.K. Barabash Primeneniye fraktalnykh metodov dlya analiza dinamicheskikh dannyykh / A.G.

Maslovskaya, T. R. Osokina, T.K. Barabash // Vestnik amurskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2010. – vyp : 51: Ser. Estestv. i ekon. nauki. – С. 13–20.

7. B. Mandelbrot «Fraktalnaya geometriya prirody» - M.: Mir. 2002. – 656 s.

8. Kuznetsov P.V., Panin V.E. Fraktalnaya razmernost kak kharakteristika stadiy deformatsii na mezourovne pri tsiklicheskom i aktivnom nagruzhennii. V sb. Fraktaly i prikladnaya sinergetika, M.: 1999. – С. 142–143.

9. Ivanova V. S. Priroda ustalosti metallov / V. S. Ivanova, V. F Terentev. – М. : Metallurgiya, 1975. – 456 s.

10. Maylo A. M. Zakonomirnosti rozpodilu lokalnoy nepruzhnosti splavu D16T v umovakh statichnogo roztyagu / A. M. Maylo // Probl. prochnosti. – 2009. – № 4. – С. 141–148.

11. Strizhalo V.A., Dobrovolskiy Yu.V., Strelchenko V.A. i dr. Prochnost i akusticheskaya emissiya materialov i elementov konstruktsiy. - Kiev: Nauk. dumka, 1990. – 232 s.

12. A.N. Pilyankevich, G.S. Oleynik i dr.. O fraktograficheskikh osobennostyakh ustalostnogo razrusheniya pezokeramicheskikh materialov // Probl. Prochn. – 1978. – № 5 – С. 36–39.

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОШКОДЖУВАНОСТІ СТАЛІ Х18Н10Т ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ R/S МЕТОДОМ

**Анотація.** В роботі показано характеристики розподілу непружних властивостей поверхневого шару сталі Х18Н10Т за дії циклічного навантаження. Застосування показника Херста дозволило виявити закономірності розсіяної пошкодженості сталі Х18Н10Т на базі  $10^7$  циклів навантаження.

**Ключові слова:** втома, розсіяне пошкодження, непружність.

#### DETERMINATION OF THE REGULARITIES OF DAMAGEABILITY OF STEEL H18N10T AT THE CYCLIC LOADS FOR R/S METHOD

**Annotation.** In this paper presents results of the evolution of the distribution of inelastic deformation of the surface layer of steel H18N10T under the action of cyclic stresses. With the application of the Hurst exponent set scale dependency ordering local damage the structure of the material under the action of cyclic stress to fracture based on  $10^7$  cycles.

**Key words:** fatigue, scattered damage, inelasticity.