

УДК 620.164.3

**МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ТВЕРДОМЕТРИИ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ,
ПОДВЕРЖЕННОЙ ЦИКЛИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ**

**HARDNESS TESTING RESULTS MULTIFRACTAL
PARAMETRIZATION OF SHELL-TYPE CONSTRUCTIONS
MATERIAL UNDER CYCLIC LOADING**

Самигуллин А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Тепсаев А.Н.

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

A.V. Samigullin, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev, A.N. Tepsayev

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation**

e-mail: S_Alecsei@mail.ru

Аннотация. В работе приведены результаты распределения значений твердости по цилиндрической обечайке оболочковой конструкции из стали 20, подверженной циклическому нагружению внутренним давлением, способствующим возникновению в конструкционном материале упругопластических деформаций. Результаты измерения твердости материала обрабатывались с помощью метода мультифрактальной параметризации и подвергались анализу изменения от уровня накопленных усталостных повреждений. Расчет мультифрактальных характеристик выполнялся с применением программного продукта MFDrom, разработанного профессором Встовским Г.В., что позволяет осуществить преобразование результатов измерения твердости в математическую форму данных и вести компьютерный анализ распределения значений твердости, осуществлять количественное описание степени нарушения фрактальной симметрии. Установлено,

что при уровне накопленных усталостных повреждений $N_i/N_p = 0,76 \pm 0,05$ скрытая упорядоченность структуры (D_1-D_{40}) и степень однородности (F_{40}) достигают минимального значения, а фрактальная размерность (D_0) характеризуется максимальной величиной. Это объясняется тем, что при достижении материалом предельного состояния происходит смена механизма адаптации структуры к внешнему воздействию. Анализ изменения значений твердости по оболочковой конструкции от уровня накопленных усталостных повреждений показал, что в процессе эксплуатации наблюдается общая тенденция снижения значений твердости по цилиндрической обечайке, т.е. конструкционный материал оболочковой конструкции из стали 20 в результате циклического нагружения внутренним давлением разупрочняется. Установленные зависимости указывают на смену механизма адаптации структуры к внешнему воздействию, при котором конструкционный материал достигает предельного состояния и могут быть использованы для определения периода безопасной эксплуатации оболочковых конструкций, подверженных циклическому нагружению.

Abstract. The results of the distribution of values hardness cylindrical shell steel structures 20, subject to cyclic loading by internal pressure, contributing to the emergence of a structural material elastic-plastic deformations. The results of measuring the hardness of the material processed by the method of the multifractal parameterization and analyzed changes in the level of fatigue damage accumulation. Calculation of multifractal characteristics was performed using the product program MFDrom, developed by professor G.V. Vstovski that allows the conversion of the results of hardness measurement data in mathematical form and maintain a computer analysis of the distribution of hardness values, perform a quantitative description of the degree of violation of fractal symmetry. It was found that the level of fatigue damage accumulation $N_i/N_p = 0.76 \pm 0.05$ hidden orderly structure (D_1-D_{40}) and the degree of homogeneity (F_{40}) reaches a minimum value, and the fractal dimension (D_0) is characterized by a maximum value. This is because when the material limit state is a

change adaptation mechanism structure to external influence. Analysis of changes in the values of hardness of the shell structure of the level of accumulated fatigue damage has shown that during operation there is a general tendency of decrease in hardness values cylindrical shell. The material of construction of the shell structure of steel 20 as a result of cyclic loading internal pressure softens. Set point depending on the change of the structure of the mechanism of adaptation to external influences, in which the structural material reaches a limiting condition, and can be used to determine the period of safe operation of shell structures subjected to cyclic loading.

Ключевые слова: оболочковая конструкция, циклическое нагружение, твердость, мультифрактальная параметризация, механизм адаптации, предельное состояние.

Key words: shell structures, cyclic loading, the mechanism of adaptation, hardness, multifractal parameterization, limiting state.

Оболочковые конструкции нефтеперерабатывающей промышленности, являясь сложными иерархическими системами, испытывают силовое, термическое и коррозионное влияние. Подобные условия эксплуатации способствуют формированию механизма адаптации конструкционного материала к внешним воздействиям путем упорядоченной самоорганизации структуры металла [1].

Известно [2], что свойство структуры адаптироваться к изменяющимся внешним условиям определяет механическое поведение материала под нагрузкой. Поэтому знание этих свойств является важным при контроле объекта исследования и обеспечения их безопасной эксплуатации.

Ранее было отмечено [3], что для понимания физической природы механизмов адаптации в различных условиях нагружения необходимо рассматривать деформированный металл как многоуровневую систему. Пластическое течение конструкционного материала развивается как самосо-

гласованный процесс потери сдвиговой устойчивости исходной структуры материала на различных масштабных-структурных уровнях.

В работах [4,7,8] проведен системный анализ стадийности пластической деформации, который позволяет установить точки бифуркации, отвечающие смене механизма адаптации конструкционного материала к внешнему воздействию и переходу в диссипативное состояние (рисунок 1). Согласно рисунку 1 стадии I и II связаны со сдвигом в кристаллической решетке с сохранением исходного гомеостаза для упругой и квазиупругой стадий. Эти две стадии связаны с микроскопическими концентраторами напряжений. Переход от стадии II к стадии III является точкой бифуркации на мезоуровне. К началу этой стадии образуется ячеистая структура, знаменующая переход к новому масштабному уровню пластического течения (мезоуровень I). Локализация пластического течения (стадия IV) приводит к появлению нового мезоскопического масштаба (мезоуровень II) и новой точки бифуркации на кривой растяжения.

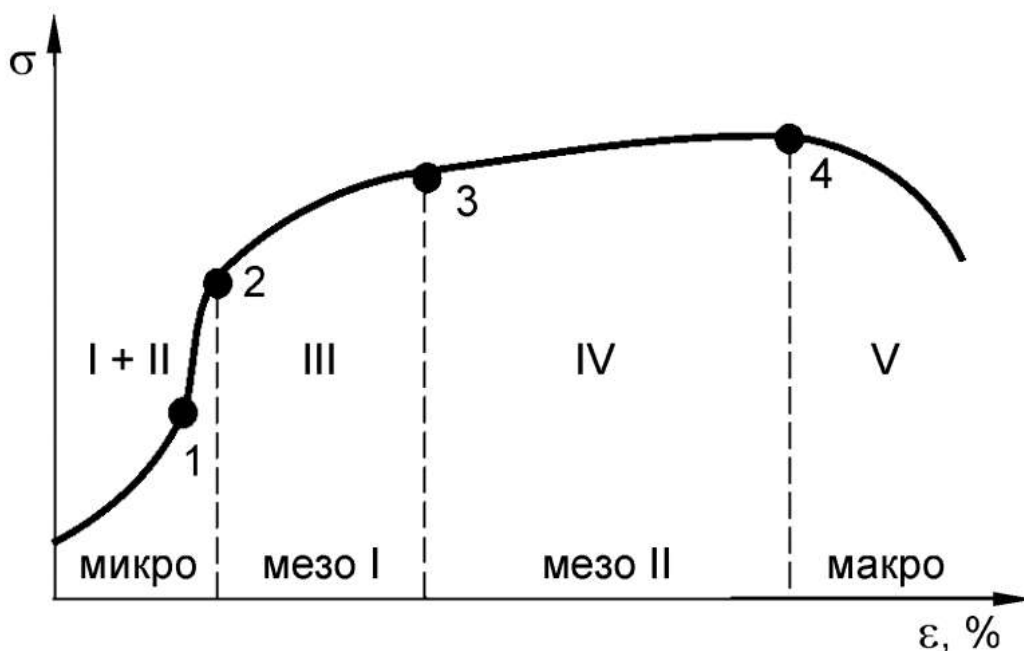


Рисунок 1. Схема стадий кривой «напряжение-деформация» при растяжении металлического поликристалла с ГЦК-решеткой с выделенными точками бифуркаций (1,2,3,4)

Переход от одной точки бифуркации к другой отвечает достижению критической разреженности среды, что сопровождается сменой механизма адаптации конструкционного материала к внешним воздействиям и переходом в диссипативное состояние, при котором в процессе обмена энергией и веществом с окружающей средой самоорганизуется новая, более устойчивая к нарушению симметрии структура. Смена механизма адаптации материала к внешним воздействиям позволяет отслеживать этапы разрушения конструкции [4]. Так в работе [5] были проведены исследования по определению предельного состояния материала плоских образцов, подверженных циклическому нагружению, по результатам анализа смены механизма адаптации структуры металла к силовому полю.

Однако необходимо установить признаки, характеризующие такое состояние металла оболочковой конструкции, при котором происходит смена механизма адаптации, соответствующая достижению конструкционным материалом оболочковой конструкции предельного состояния.

Способность металла адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации определяют механические свойства конструкционного материала оболочковой конструкции при циклическом нагружении. В целях определения характера распределения механических характеристик по цилиндрической обечайке оболочковой конструкции и закономерности их изменения в процессе циклического нагружения были проведены испытания на малоцикловое нагружение внутренним давлением оболочковых конструкций до разрушения. Механические характеристики определялись косвенным методом по значениям твердости по методике, описанной в работе [6].

Оболочковая конструкция представляет собой сварное изделие, состоящее из цилиндрической обечайки, изготовленной из электросварной трубы из стали 20 по ГОСТ 10705-80 [9], эллиптических днищ и штуцеров для подачи и вывода рабочей среды. Одна из разрушенных оболочковых конструкций и ее развертка с указанием зон измерения значений твердости представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

Испытания оболочковых конструкций проводились на экспериментальном стенде по отнулевой схеме нагружения.

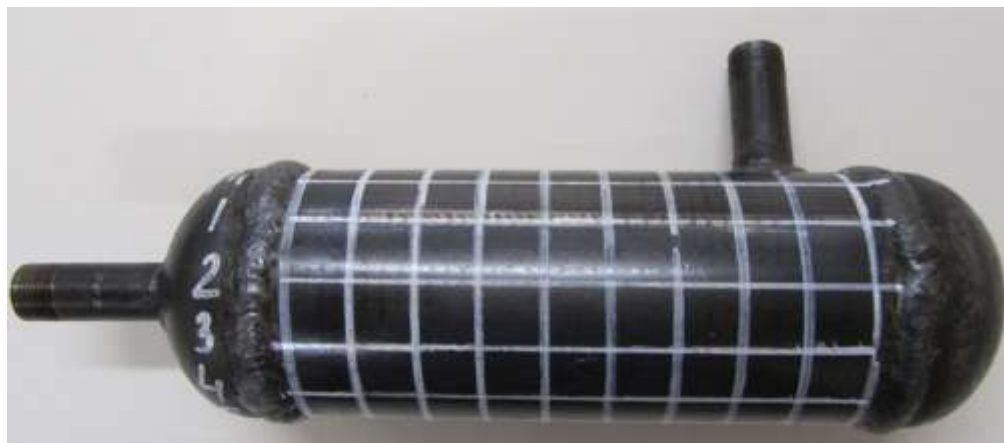


Рисунок 2. Оболочковая конструкция

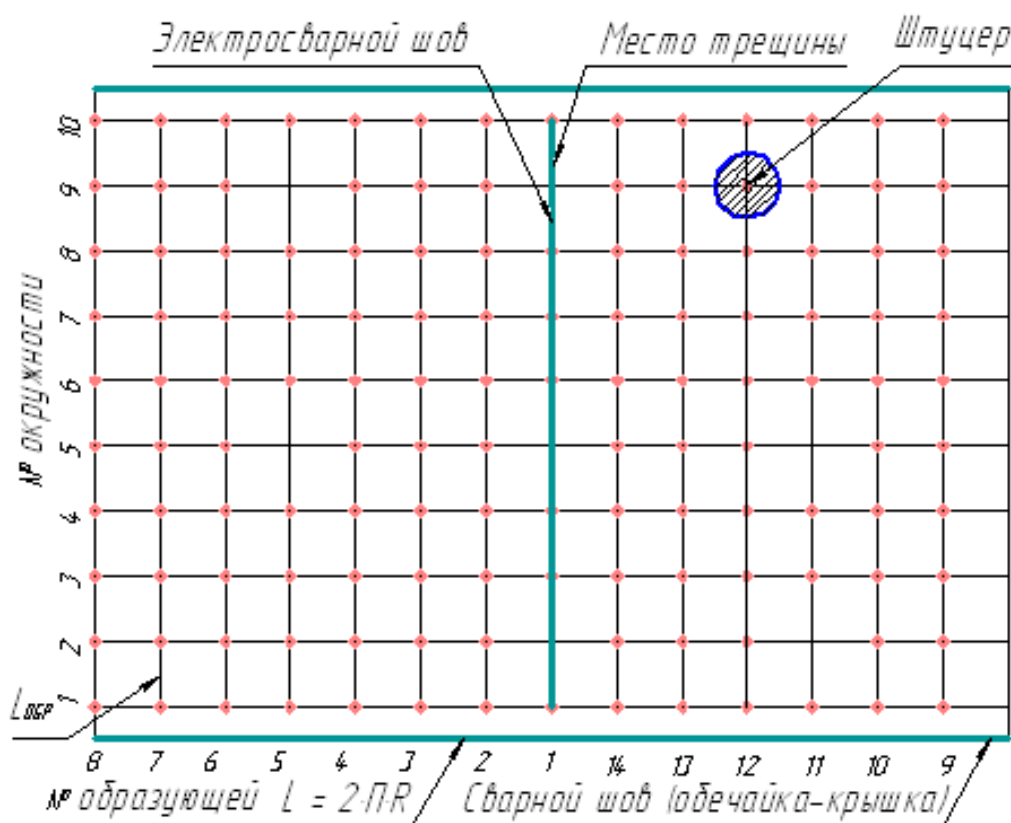


Рисунок 3. Развертка оболочковой конструкция с указанием зон измерения значений твердости

Амплитуда давления устанавливалась таким образом, чтобы возникающие в металле напряжения обеспечивали упругопластическую деформацию материала. Соответствующий вид деформации наблюдается при

напряжениях $(0,9 \div 1,1)\sigma_T$ [14]. Амплитуда напряжения в процессе нагружения выбиралась как наименьшее граничное значение из указанного интервала, т.е. равное $(0,9 \cdot \sigma_T)$. Предел текучести для данной стали определялся по результатам статического осевого растяжения стандартных плоских образцов по ГОСТ 1497-84 [15], изготовленных из электросварной трубы, и составил 361 МПа. Рабочее давление [14] рассчитывалось по формуле:

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot s}{D + s} \cdot 0,9 \cdot \sigma_T, \quad (1)$$

где s – толщина стенки цилиндрической обечайки, мм;

φ – коэффициент прочности сварного шва;

D – внутренний диаметр цилиндрической обечайки, мм;

σ_T – предел текучести стали 20, МПа.

Амплитуда давления при испытаниях составила 22,6 МПа.

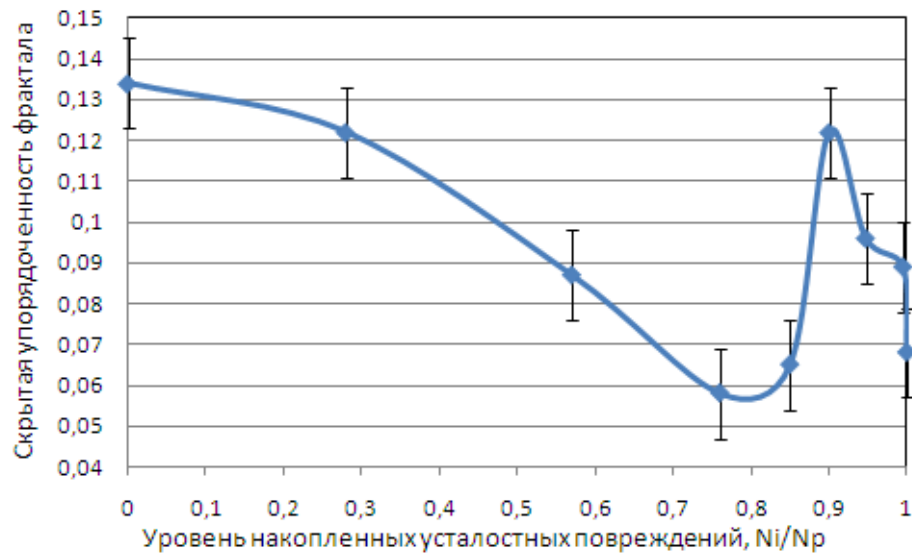
Измерения значений твердости по цилиндрической обечайке оболочковой конструкции проводились с помощью твердомера Роквелла марки R574, погрешность измерения которого составляет $0,1 \cdot HRB$. Для проведения исследований использовалась широко применяемая при техническом диагностировании конструкционных материалов оболочковых конструкций шкала измерения твердости HRB, которой соответствует шариковый индентер диаметром 1,5875 мм, предварительная нагрузка 98,07 Н и полная нагрузка 980,7 Н. При осуществлении эксперимента каждое последующее измерение значений твердости металла выполнялось таким образом, чтобы расстояние между двумя смежными отпечатками было равно не менее трем диаметрам отпечатков [10].

При выборе метода обработки результатов измерения твердости был проведен анализ работ [2-4], где отмечено, что переход системы в диссипативное состояние можно оценить фрактальной размерностью кластеров при достижении порога адаптивности системы к сохранению динамической устойчивости системы. Так что каждому масштабному уровню деформации отвечает свой порог адаптивности системы к росту дефектов,

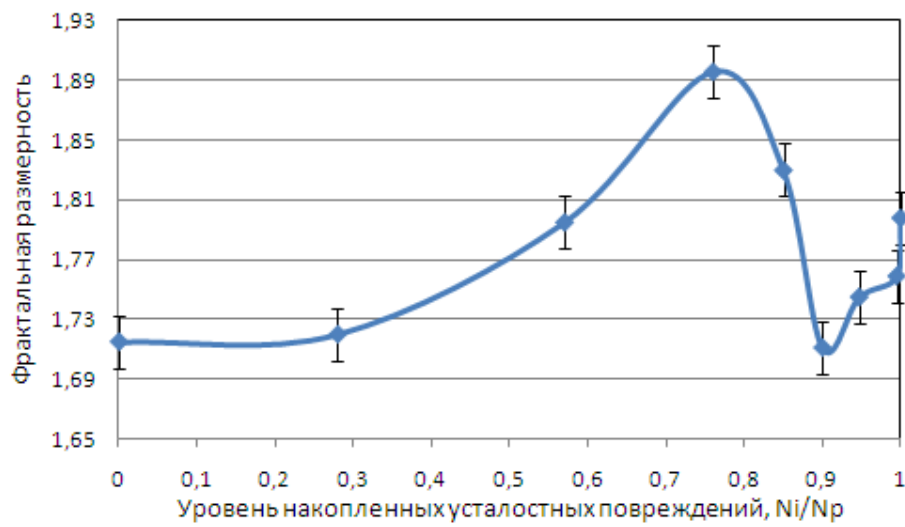
следовательно, и своя пороговая фрактальная размерность кластеров, дефектов, ответственных за сохранение динамической устойчивости (гомеостаза) разреженной среды. Также необходимо отметить, что нарушение фрактальной симметрии обусловлено внешним воздействием, которое «запоминается» структурой в виде специфических структур – мультифракталов, и становится очевидным, что мультифрактальная параметризация структур материалов, подвергаемых различным видам воздействия, является прямым методом определения адаптивных свойств структуры [11]. Поэтому обработка результатов измерения твердости проводилась методом мультифрактальной параметризации. Расчет мультифрактальных характеристик без применения возможностей ЭВМ является достаточно трудоемким и длительным процессом. Поэтому пакет данных измерения твердости загружается в программный продукт MFDrom, разработанный Встовским Г.В., который позволяет осуществлять преобразование результатов измерения твердости в математическую форму данных и вести компьютерный анализ распределения значений твердости, осуществлять количественное описание степени нарушения фрактальной симметрии [12].

Результатом мультифрактального анализа распределения значений твердости по цилиндрической обечайке оболочковой конструкции является определение основных параметров, которые количественно характеризуют конструкционный материал. Таковыми являются фрактальная размерность (D_0), скрытая упорядоченность (D_1 - D_{40}) и степень однородности (F_{40}), графики зависимостей которых от уровня накопленных усталостных повреждений представлены на рисунке 3.

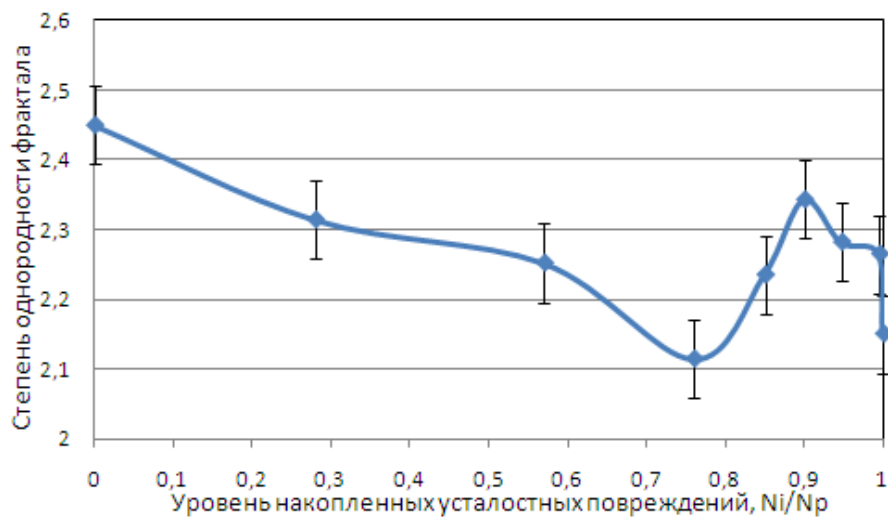
Из представленных графиков следует, что при уровне накопленных усталостных повреждений равным $0,76 \pm 0,05$ скрытая упорядоченность (D_1 - D_{40}) приобретает наименьшее значение, фрактальная размерность (D_0) обладает максимальным значением, а степень однородности (F_{40}) характеризуется минимальным значением.



а)



б)



в)

Рисунок 4. Графики изменения от уровня накопленных усталостных повреждений: а – скрытой упорядоченности; б – фрактальной размерности; в – степени однородности

Характер изменения мультифрактальных параметров, изображенных на рисунке 4, объясняется тем, что в конструкционном материале оболочковой конструкции, находящемся в условиях циклического нагружения, наблюдается передача информации о состоянии среды в критических точках в момент возникновения неустойчивости симметрии системы. Это связано с тем, что поведение нелинейной динамической (равновесной) системы универсально только в критических точках [2]. Ранее [13] было отмечено, что относительное среднее напряжение отклика электрического сигнала ($U_{ср_i}/U_{ср_{исх.}}$) приобретает минимальное значение при уровне накопленных усталостных повреждений $N_i/N_p = 0,8 \pm 0,05$, соответствующем предельному состоянию материала оболочковой конструкции из стали 20, подверженной малоцикловому нагружению.

Следующий подход обработки результатов измерения твердости заключался в том, что проводился анализ изменения полученного массива данных от уровня накопленных усталостных повреждений конструкционного материала оболочковой конструкции в определенных диапазонах значения твердости. На рисунке 5 представлено распределение значений твердости от числа циклов нагружения в соответствующих числовых диапазонах.

Из рисунка 5 следует, что значения твердости в процессе усталостного нагружения оболочковой конструкции внутренним давлением имеют общую тенденцию снижения, связанную с тем, что конструкционный материал цилиндрической обечайки из стали 20 разупрочняется при циклическом нагружении внутренним давлением.

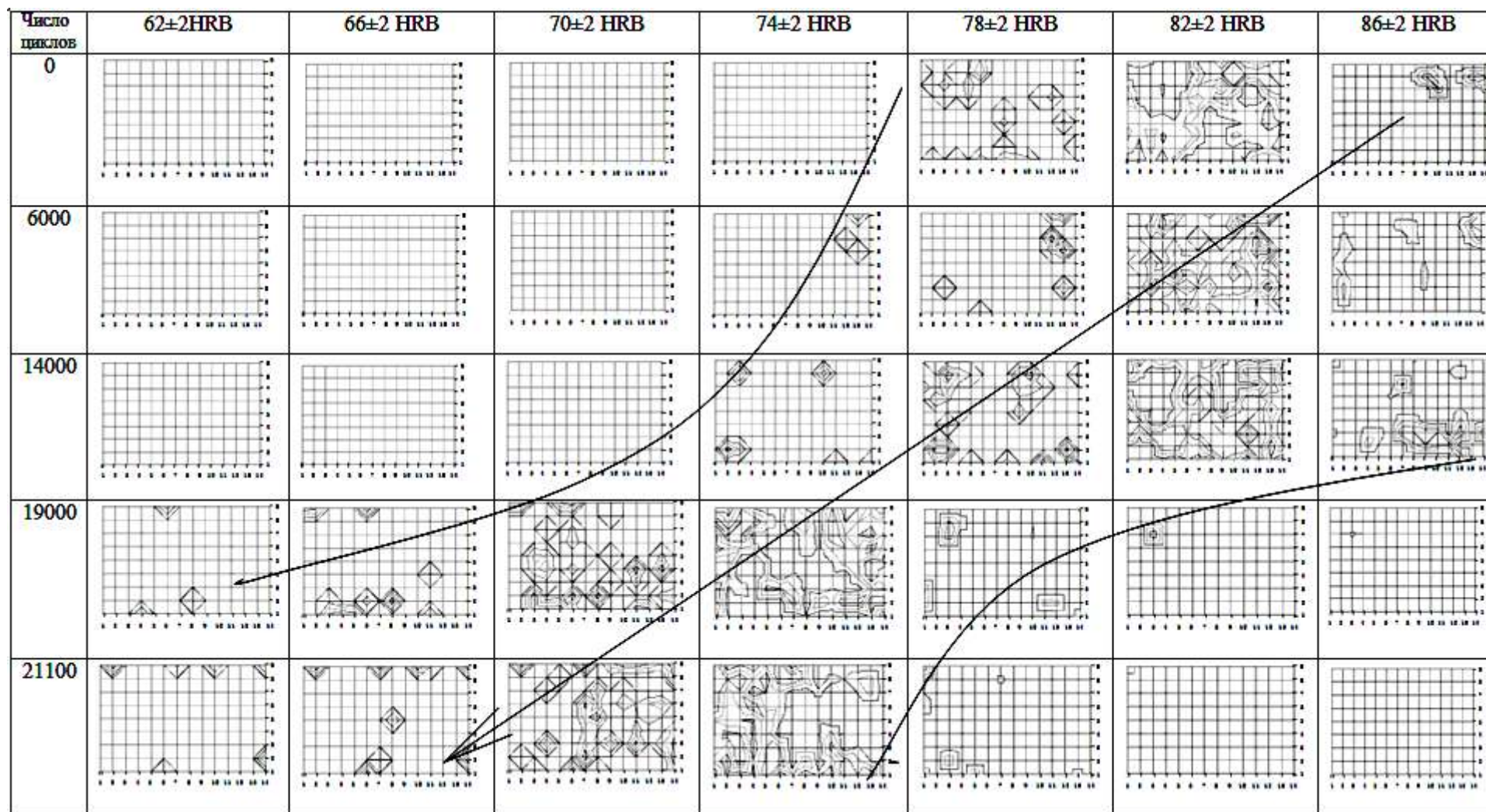


Рисунок 5. Распределение значений твердости по цилиндрической обечайке от числа циклов нагружения

Выводы

Таким образом, анализ результатов распределения твердости материала по цилиндрической обечайке оболочковой конструкции из стали 20, подверженной циклическому нагружению, показал, что при обработке данных измерения твердости методом мультифрактальной параметризации при достижении уровня накопленных усталостных повреждений $N_i/N_p = 0,76 \pm 0,05$ скрытая упорядоченность структуры, фрактальная размерность и степень однородности приобретают экстремальное значение. Анализ изменения значений твердости по оболочковой конструкции от уровня накопленных усталостных повреждений показал, что конструкционный материал в результате циклического нагружения внутренним давлением разупрочняется.

Установленные зависимости указывают на смену механизма адаптации структуры к внешнему воздействию, соответствующую достижению конструкционным материалом оболочковой конструкции предельного состояния.

Исследования выполнялись при содействии Межвузовского центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс «Недра» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Список используемых источников

- 1 Сложные системы в природе и технике/ Кузеев И.Р. [и др.]. Уфа: изд-во УГНТУ, 1997. 227 с.
- 2 Оксогоев А.А. Мультифрактальный анализ нелинейной динамики адаптивности структуры материалов к внешним воздействиям. // Прикладная синергетика И. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. Т. 2. С. 7-14.

3 Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Физические основы многоуровневого подхода // Физ. мезомех. 2006. Т.9. № 3. С. 9-22.

4 Иванова В.С., Оксогоев А.А. О связи стадийности процессов пластической деформации с фрактальной структурой, отвечающей смене масштабного уровня деформации // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. № 6. С. 17-27.

5 Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Кондрашова О.Г. Оценка адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования// Нефтегазовое дело: науч. техн. журн. УГНТУ. 2006. Т.1, № 4. С.124-133.

6 Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Проблемы прочности. 2002. № 4. С. 5 – 11.

7 Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформированном твердом теле // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. № 4. С. 5-23.

8 Оксогоев А.А. Стадийность пластической деформации металлических материалов с позиции фрактальной геометрии // Вестник Томского ун-та. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. № 5. С. 16-22.

9 ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1980. 10 с.

10 Руководство по эксплуатации твердомера Rockwell 574 модели 574.

11 Оптимизация структуры машиностроительных материалов / Иванова В.С. [и др.] // Металлургия машиностроения. В 2-х частях. 2002. № 6 (9). С. 18-25; 2003. № 2. С. 15-24.

12 Встовский Г.В. Элементы информационной физики. М.: Изд-во МГИУ. 2002. 260 с.

13 Самигуллин А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Расчетно-экспериментальное определение предельного состояния материала оболочковой конструкции, подверженной малоцикловому нагружению// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2014. № 5. С. 404-419. URL: http://ogbus.ru/issues/5_2014/ogbus_5_2014_p404-419_SamigullinAV_ru.pdf

14 Лейбо А.Н. Справочник механика нефтеперерабатывающего завода: Справочное пособие. М.: Наука, 1963. 840 с.

15 ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1984. 28 с.

References

1 Slozhnye sistemy v prirode i tehnike/ Kuzeev I.R. [i dr.]. Ufa: izd-vo UGNTU, 1997. 227 s. [in Russian].

2 Oksogoev A.A. Mul'tifraktal'nyj analiz nelinejnoj dinamiki adaptivnosti struktury materialov k vneshnim vozdeystvijam. //Prikladnaja sinergetika I. - Ufa: Izdatel'stvo UGNTU. 2004, t. 2. S. 7-14. [in Russian].

3 Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Fizicheskaja mezomehanika deformiruемого твердого тела как mnogourovnevoj sistemy. Fizicheskie osnovy mnogourovneвого podhoda // Fiz. mezomeh. 2006. T. 9. № 3. S. 9-22. [in Russian].

4 Ivanova V.S., Oksogoev A.A. O svjazi stadijnosti processov plasticheskoj deformacii s fraktal'noj strukturoj, otvechajushhej smene masshtabного urovnja deformacii // Fiz. mezomeh. 2006. T. 9. № 6. S. 17-27. [in Russian].

5 Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Kondrashova O.G. Ocenka adaptivnyh svojstv metalla po izmeneniju ego magnitnyh harakteristik dlja opredelenija resursa bezopasnoj jekspluatacii neftegazovого oborudovanija// Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn/UGNTU. 2006. T.1, № 4. S. 124-133. [in Russian].

6 Lebedev A.A., Muzyka N.R., Volchek N.L. Opredelenie povrezhdennosti konstrukcionnyh materialov po parametram rassejanija harakteristik tverdosti // Problemy prochnosti. 2002. № 4. S. 5 - 11. [in Russian].

7 Panin V.E., Panin L.E. Masshtabnye urovni gomeostaza v deformirovannom tverdom tele // Fiz. mezomeh. 2004. T. 7. № 4. S. 5-23. [in Russian].

8 Oksogoev A.A. Stadijnost' plasticheskoj deformacii metallicheskih materialov s pozicii fraktal'noj geometrii // Vestnik Tomskogo universiteta. Bjulleten' operativnoj nauchnoj informacii. Tomsk: Izd-vo TGU, 2005. № 5. S. 16-22. [in Russian].

9 GOST 10705-80. Truby stal'nye jelektrosvarnye. Tehnicheskie uslovija. M.: izd-vo standartov, 1980. 10 s. [in Russian].

10 Rukovodstvo po jekspluatacii tverdomera Rockwell 574 modeli 574. [in Russian].

11 Optimizacija struktury mashinostroitel'nyh materialov / Ivanova V.S. i [dr.] // Metallurgija mashinostroenija. V 2-h chastjah. 2002, № 6 (9). S. 18-25; 2003, № 2. S. 15-24. [in Russian].

12 Vstovskij G.V. Jelementy informacionnoj fiziki. M.: Izdatel'stvo MGIU. 2002. 260 s. [in Russian].

13 Samigullin A.V., Naumkin E.A., Kuzeev I.R. Raschetno-jeksperimental'noe opredelenie predel'nogo sostojanija materiala obolochkovoje konstrukcii, podverzhenoj malociklovomu nagruzeniju // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo". 2014. № 5. S. 404-419. URL: http://ogbus.ru/issues/5_2014/ogbus_5_2014_p404-419_SamigullinAV_ru.pdf. [in Russian].

14 Lejbo A.N. Spravochnik mehanika neftepererabatyvajushhego zavoda: Spravochnoe posobie. M.: Nauka, 1963. 840 s. [in Russian].

15 GOST 1497-84. Metally. Metody ispytanij na rastjazhenie. Moskva: Izd-vo standartov, 1984. 28 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Самигуллин А.В., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Samigullin, Post-graduate Student of the Chair "Technological Machines and Equipment", FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: S_Alecsei@mail.ru

Наумкин Е.А., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E.A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair "Technological Machines and Equipment" FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Кузеев И.Р., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

I.R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair "Technological Machines and Equipment" FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Тепсаев А.Н., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.N. Tepsayev, Post-graduate Student of the Chair "Technological Machines and Equipment", FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation