

УДК 66.023.23

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF SHELL STRUCTURES

Ковшова Ю.С.

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

Yu.S. Kovshova

FSBEI HPE «Ufa State Petroleum Technological  
University», Ufa, the Russian Federation  
e-mail: july52008@yandex.ru

В статье представлен обзор фундаментальных и прикладных исследований по проблемам прочности, ресурса и безопасной эксплуатации технологического оборудования оболочковой конструкции. Определение остаточного ресурса эксплуатируемого объекта относится к классу задач индивидуального прогнозирования и включает решение таких научно-технических проблем, как оценка текущего состояния и развитие этого состояния в ближайшем будущем, оценка вероятностей наступления отказов и прогнозирование аварийных ситуаций, оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям.

В процессе эксплуатации оборудования неизбежны колебания состава сырья и реагентов, колебания регулируемых параметров (температуры, давления, расхода). Подобные изменения термосиловых факторов обуславливают возникновение квазистатического режима нагружения конструкции.

Исследования закономерностей изменения физико-механических свойств материалов оболочковых конструкций под действием различных эксплуатационных факторов и видов нагружения показывают, что конструкционные материалы являются самоорганизованными системами, которые реагируют на изменение внешней нагрузки, путем непрерывного изменения кристаллической структуры и поэтапного изменения механизма адаптации к внешнему воздействию.

Проведенный анализ исследований в области оценки ресурса технологического оборудования показывает, что одним из перспективных направлений развития методов комплексной оценки технического состояния оболочковых конструкций, наряду с изучением влияния циклических нагрузок и других эксплуатационных факторов, является исследование влияния длительного квазистатического нагружения на физические параметры (скорость ультразвуковых волн, напряженность постоянного магнитного поля и др.) и механические свойства материала.

**Ключевые слова:** оболочковые конструкции, остаточный ресурс, прочность, надежность, квазистатическое нагружение, малоцикловое нагружение, накопление повреждений, предельное состояние, конструкционный материал, напряжение, деформация, скорость ультразвуковых волн, напряженность магнитного поля, напряжение отклика электрического сигнала, твердость, поверхность, неразрушающий контроль, предел прочности, предел текучести, механизмы адаптации, микроструктура, технологическое оборудование.

**Key words:** shell structures, residual life, strength, reliability, quasi-static loading, low-cycle loading, damage accumulation, limit state, engineering material, stress, deformation, velocity of ultrasonic waves, magnetic field strength, voltage of the electric signal response, hardness, surface, nondestructive testing,

The article provides an overview of basic and applied research on durability, service life and safe operation of the technological equipment of the shell structure. Determination of residual life of the exploited object belongs to the class of the individual prediction and involves the solution of scientific and technical problems, as the assessment of the current state and development of the state in the near future, the estimation of the probabilities of failure and forecasting of emergencies, risk assessment with respect to hazardous emergencies.

In the operation of the equipment is inevitable fluctuations in the composition of raw materials and reagents, vibrations of adjustable parameters (temperature, pressure, flow). Such changes thermopower factors determine the emergence of quasi-static loading regime of shell structure.

Research of laws of change of physical and mechanical properties of materials shell structures under the influence of various operational factors and types of loading show that construction materials are self-organized systems that respond to changes in the external load, by continuously changing the crystal structure and phase change mechanism of adaptation to external influences.

The analysis of research in the field of resource estimation process equipment shows that one of the most promising directions of development of integrated assessment of technical condition of shell structures, along with the study of the effect of cyclic loads and other operational factors, is to study the effect of long-term quasi-static load on the physical parameters (speed of the ultrasonic waves, The constant magnetic field, and others.) and mechanical properties of the material.

tensile strength, yield strength, mechanisms of adaptation, microstructure, technological equipment

Современные нефтегазоперерабатывающие производства представляют собой комплекс сложных технологических установок, включающих различные виды машин и оборудования.

Значительную долю технологического оборудования составляют конструкции оболочкового типа, работающие в условиях квазистатического нагружения. Данный вид нагружения возникает при малых возмущениях термосиловых факторов в процессе работы колонных аппаратов, теплообменных аппаратов, различных технологических емкостей.

При длительной эксплуатации технологического оборудования неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов

даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации, что обусловлено особенностями нефтегазоперерабатывающих производств: высокой коррозионной активностью технологических сред, высокими температурой, давлением и скоростью технологических потоков, наличием переменных температурных деформаций и сложного напряженного состояния металла оборудования.

Даже при соблюдении технологической дисциплины при эксплуатации оборудования неизбежны колебания состава сырья и реагентов, в том числе содержания в них агрессивных компонентов; колебания регулируемых параметров (температуры, давления, расхода и др.), обусловленные запаздыванием срабатывания систем регулирования. Воздействие указанных факторов в течение длительного времени вызывает повреждение металла: развитие микротрещин на поверхностях нагруженных элементов оборудования или отложение на них осадков, препятствующих протеканию технологического процесса. В некоторые моменты функционирования оборудования могут возникать такие сочетания параметров, которые нарушают его работоспособность, т.е. вызывают отказы [1].

Невозможность во многих случаях своевременной замены конструкций и оборудования приводит к тому, что их эксплуатация продолжается за пределами проектного ресурса [2].

Поэтому оценка предельных состояний, ресурса, безопасности и работоспособности элементов технологического оборудования является одним из основных способов обеспечения безаварийной эксплуатации ОПО. В этой связи для формирования физических критериев достижения предельного состояния особое значение имеют выявление и анализ физических особенностей механизмов появления и накопления повреждений в материале оболочковых конструкций, эксплуатируемых в условиях квазистатического нагружения.

Определение остаточного ресурса эксплуатируемого объекта относится к классу задач индивидуального прогнозирования и включает решение таких научно-технических проблем, как оценка текущего состояния и развитие этого состояния в ближайшем будущем, оценка вероятностей наступления отказов и прогнозирование аварийных ситуаций, оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям. На основе этого прогноза устанавливается предельно допустимый срок эксплуатации оборудования или назначается срок очередного контроля состояния исследуемого объекта [3].

Основой для прогнозирования остаточного ресурса служит следующая информация:

- диагностические данные о состоянии объекта, данные текущего оперативного контроля в процессе эксплуатации;

- данные о нагрузках и условиях воздействия окружающей среды на объект;
- экспериментальные сведения об элементах, определяющих ресурс [1, 3-5].

Существует два основных направления определения остаточного ресурса: первое основано на физических предпосылках, второе использует вероятностные методы оценки остаточного ресурса [3].

Использование физических методов оценки остаточного ресурса ограничено из-за того, что физические методы, как правило, не учитывают многообразие реальных условий эксплуатации, в связи с этим значения показателей ресурса, рассчитанные на основе физических предпосылок, часто во много раз превышают значения, полученные путем обработки статистических данных.

Применение вероятностных методов оценки остаточного ресурса требует получения статистической информации о ресурсе анализируемых объектов, что затруднительно экономически и требует слишком продолжительного времени. Кроме того, необходимо выполнение условия статистической устойчивости, а это для изделий в единичном исполнении сомнительно.

Наиболее перспективным направлением определения остаточного ресурса является использование физических представлений о ресурсных свойствах с применением вероятностных методов [3]

Прогнозирование остаточного ресурса для каждого из основных несущих элементов оборудования осуществляется по установленному доминирующему механизму повреждения (коррозия, эрозия, давление, температура, режим нагружения и т.п.), играющему определяющую роль в исчерпании ресурса оборудования в процессе его эксплуатации [1]:

- общий коррозионно-эрозионный износ – для оборудования, эксплуатирующегося в условиях статического нагружения;
- малоцикловая усталость металла – для оборудования, эксплуатирующегося в условиях малоциклового нагружения;
- низкотемпературная сероводородная коррозия, следствием которой является расслоение металла или его растрескивание;
- водородная коррозия, коррозионное растрескивание, межкристаллитная коррозия;
- изменение химического состава или механических свойств металла и др.

Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и аппаратов при прогнозировании определяется расчетом минимального срока службы, возможного при самом неблагоприятном развитии процессов деградации.

При прогнозировании в зависимости от срока эксплуатации оборудования и степени его поврежденности применяют два подхода:

- при малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительных размерах дефектов и повреждений (в пределах норм допустимых технологических дефектов) прогнозирование остаточного ресурса оборудования осуществляют на основе информации об эксплуатационных нагрузках и прочности конструкции.

- при сроке эксплуатации, близком к нормативному, и (или) значительной поврежденности элементов оборудования дополнительно исследуют влияние повреждений на долговечность и безопасность оборудования [1].

Расчет остаточного ресурса, основанный на комплексном подходе, проводится с учетом всех факторов, формирующих техническое состояние. Анализ результатов расчета позволяет выделить определяющий фактор, дающий наименьший остаточный ресурс [3].

При проектировании оборудования требуемые показатели надежности и безопасности достигаются за счет установления запасов прочности и обеспечения износостойкости и коррозионной стойкости с учетом возможных наиболее неблагоприятных режимов эксплуатации. В реальных условиях эксплуатации интенсивность исчерпания ресурса отличается от расчетных значений и во многих случаях может быть определена на основе анализа режимов нагружения и фактических повреждений элементов оборудования [2, 3-5].

Научное направление фундаментальных и прикладных исследований по проблемам прочности, ресурса и безопасной эксплуатации технологического оборудования и конструкций основывается на базе большого числа научно-исследовательских работ, выполняемых на протяжении многих десятилетий К.В. Фроловым, Н.А. Махутовым, А.П. Гусенковым, Г.В. Москвитиным, Е.М. Морозовым, В.З. Партоном, М.М. Гадениным, В.Н. Пермьяковым и др. [2, 6-11]. Разработанные ими уравнения состояния, критерии прочности и ресурса распространяются на широкий круг машин и конструкций, используемых в технологических процессах, в энергетике, в горнодобывающих комплексах, в транспортных системах.

Для обоснования уравнений статической, циклической и длительной прочности введены многочленные степенные зависимости предельных пластических и упругих деформаций от числа циклов и времени нагружения. Общая структура методов и систем многокритериального подхода к обоснованию расчетных характеристик прочности, ресурса и безопасности элементов химических производств и магистральных трубопроводов рассмотрена в работах [2, 6-10].

Н.А. Махутовым в качестве одного из подходов к описанию накопления повреждений и последующего разрушения предложена концепция поврежда-

емости материала. В зависимости от процессов деформирования или разрушения изменение сплошности (повреждаемость) может означать появление и рост микротрещин и пор, изменение механических или физических свойств или и то и другое. Повреждаемость отражает состояние материала при воздействии на него механических нагрузок и физических полей [2, 7-10].

Остаточная прочность, ресурс, износостойкость и трещиностойкость на стадии эксплуатации машин и конструкций определяются с учетом изменения состояния несущих элементов (механические свойства и дефектность) и накопления эксплуатационных повреждений. При отсутствии макродефектов (трещин) предельное состояние конструкции определяется критическими значениями местных напряжений или деформаций с учетом зон концентрации напряжений, контактных воздействий и выделения характерных точек и значений напряжения по схеме циклов приведенных напряжений для стадии эксплуатационного нагружения. Допускаемое, с точки зрения безопасности, суммарное повреждение для режимов нагружения по времени, числу циклов и температуре устанавливается путем введения в расчет по критериям статической, длительной и циклической прочности коэффициентов запаса по местным напряжениям и деформациям, что позволяет установить и оценить ресурс безопасной эксплуатации оборудования [2, 7-11].

Исследованиям вопросов повышения ресурса трубопроводных систем, аспектов деформирования оболочек и сварных соединений посвящены работы Э.М. Гутмана, А.Г. Гумерова, Р.С. Зайнуллина, И.Г. Абдуллина, А.Г. Гареева, Р.С. Абдуллина [12-16].

В работах [15-16] рассмотрены вопросы оценки предельного состояния конструктивных элементов сосудов, аппаратов и трубопроводов различного назначения, работающих преимущественно в условиях статического нагружения с учетом реальных условий эксплуатации, изометрической и механической неоднородности, трещин и трещиноподобных дефектов при эксплуатации и испытаниях.

Расчетный метод оценки ресурса нефтепроводов по параметрам их испытаний и эксплуатации предложен в работе [16]. Авторами установлено, что уровень дефектности трубопровода зависит от испытательного давления, времени выдержки и числа циклов нагружения. Получены количественные зависимости для оценки влияния параметров режима гидравлических испытаний на остаточную дефектность сосудов и трубопроводов. Разработана методика количественной оценки долговечности труб и зависимости от параметров гидравлических испытаний. Рекомендуется рассматривать испытания нефтепроводов как метод активной диагностики для обеспечения фактического запаса прочности, равного 1,1-1,5 и более. При определенных условиях

эти значения запасов прочности могут обеспечивать безопасность нефтепроводов.

В ФГБОУ ВПО УГНТУ исследованиям механизмов накопления повреждений, методам оценки предельного состояния, долговечности и прогнозирования ресурса оболочковых конструкций, эксплуатируемых в условиях циклических нагрузок, посвящены работы А.В. Бакиева, И.Р. Кузеева, А.Г. Халимова, Е.А. Наумкина и др. [17-38].

А.В. Бакиевым предложен способ определения остаточного ресурса длительно эксплуатируемых трубопроводов с учетом деградации механических свойств металла трубопроводов, подверженных действию различных долговременных нагрузок, на основании которого из наименее подверженных износу участков контролируемого трубопровода вырезают образцы, свидетельствующие о его ресурсе. Половину образцов подвергают отжигу, а вторую половину оставляют в исходном состоянии, затем подвергают статическим и усталостным испытаниям, и на основе сравнительного анализа результатов определяют остаточный ресурс [17-18].

И.Р. Кузеевым исследованы вопросы долговечности, эксплуатационной надежности и оценки остаточного ресурса аппаратов нефтепереработки и нефтехимии, находящихся под действием циклических термосиловых нагрузок [19-29]. В работах [19-26, 28] рассмотрены условия старения металла реакторов установок замедленного коксования (УЗК), показан характер взаимодействия нефтяных пеков с металлической поверхностью, дана характеристика кинетических зависимостей изменения температуры оболочки реактора в течение цикла коксования. По результатам анализа процесса деформирования реактора под действием силовых и термических нагрузок установлен механизм накопления повреждений в материале конструкции реактора. На основе установленных закономерностей разработан метод поузлового расчета долговечности реакторов УЗК.

Проведенные в работах [32] исследования показали, что измерения поверхностных характеристик сталей, подверженных усталостным нагружениям, являются чувствительными к структурным изменениям, происходящим на разных стадиях деформирования материала, что позволяет получать информацию по оценке накопленных повреждений и предельного состояния материала оборудования. По результатам полученных исследований разработаны алгоритмы прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации.

В работах [37, 38] установлена зависимость для стали 09Г2С, определяющая связь накопленных повреждений в материале с изменением коэффициента степени затухания ( $\psi$ ) отклика электрического сигнала, которая позволяет оценить фактический

уровень поврежденности металла оборудования. С учетом полученных закономерностей предложен метод оценки ресурса оборудования нефтегазоперерабатывающей промышленности на основе установления связи между изменением параметров отклика электромагнитного сигнала и степенью накопления усталостных повреждений.

Существующие направления исследований по оценке ресурса и прочности оборудования рассматривают влияние различных условий эксплуатации на изменение состояния несущих элементов технологического оборудования. Изменения, происходящие в структуре материала в процессе накопления повреждений, отражаются на его физико-механических характеристиках, для измерения которых широко используются акустические, магнитные и электромагнитные методы неразрушающего контроля, а также разрушающие испытания и микроструктурный анализ.

Одними из важнейших информативных характеристик акустических методов неразрушающего контроля являются затухание и скорость распространения акустических волн в конструкционных материалах [39].

**Скорость звука в изотропных твёрдых телах** определяется модулями упругости вещества. В неограниченной твёрдой среде распространяются продольные и сдвиговые (поперечные) *упругие волны*.

Скорость распространения продольных волн всегда больше, чем скорость сдвиговых волн, а именно выполняется соотношение

$$V_L > V_T \sqrt{2} \quad (1)$$

В металлах и сплавах скорость ультразвуковых волн существенно зависит от обработки, которой был подвергнут металл: прокат, ковка, отжиг и т. п. Частично это явление связано с дислокациями, наличие которых также влияет на скорость ультразвука. В металлах, как правило, скорость ультразвука уменьшается с ростом температуры. При действии на твёрдое тело статических механических напряжений скорость ультразвука зависит от величины этих напряжений, что является следствием отклонения от линейного закона Гука [39-41].

В диссертационной работе А.К. Гайдукевича [42] исследования закономерности распространения ультразвуковых волн в реальных объектах при акустико-эмиссионном контроле в условиях гидравлического испытания теплообменного аппарата показали, что при достижении уровня нагрузки, соответствующей рабочему давлению  $p_{\text{раб}} = 0,7$  МПа, в материале аппарата наблюдается резкое снижение скорости их распространения (рисунок 1).

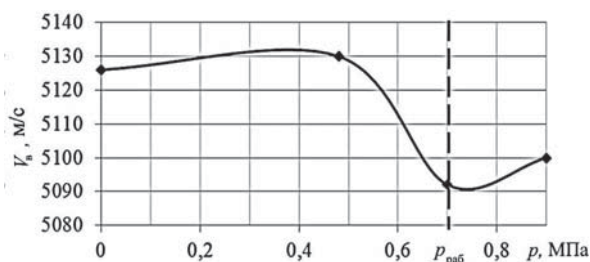


Рисунок 1. Изменение скорости ультразвуковых волн в металле  $V_{uz}$  в зависимости от давления  $p$  при гидравлическом испытании теплообменного аппарата [42]

Следует отметить, что снижение скорости распространения ультразвука наблюдается именно при рабочем давлении  $p_{раб}$ . Этот факт показывает, что в результате длительной эксплуатации в диапазоне расчетных нагрузок в анализируемой технической системе протекают сложные процессы на макро- и микроуровнях, обуславливающие накопление повреждений.

Исследования изменения скорости ультразвуковых волн при накоплении повреждений в материалах под действием различных эксплуатационных факторов отражены в работах А.К. Гурвича, Л.Б. Зуева, В.В. Муравьева, К.Л. Комарова, Б.С. Семухина, Н.Е. Никитиной, Е.А. Наумкина и др. [32, 43-52]

Результаты экспериментальных исследований изменения скорости распространения ультразвуковых объемных и поверхностных волн в сталях и алюминиевых сплавах после различных термических и механических обработок, а также в процессе эксплуатации деталей изложены в работе [43-46]. Авторами найдены основные закономерности влияния структурных факторов на скорость ультразвука. Установлено, что скорость ультразвука возрастает при уменьшении внутренних напряжений в материале и уменьшается при их увеличении.

В работах [47-49] изучены зависимости скорости распространения ультразвука в поликристаллических материалах от величины действующего при деформации напряжения. В работе [48] проанализировано изменение тонкой структуры при деформации малоуглеродистой стали на нижнем пределе текучести. Установлена взаимосвязь стадийности пластического течения и скорости распространения ультразвуковых волн при статическом растяжении низкоуглеродистой стали. Изучены структурные изменения, вызывающие изменение скорости распространения ультразвука при деформации, соответствующей площадке текучести. Установлено, что для поликристаллического материала взаимосвязь скорости ультразвука и внутренних напряжений может объясняться тем, что при малых степенях деформации происходит релаксация напряжений за счет локальных поворотов отдельных объемов материала [47, 49].

В работах [32, 50-54] рассматривались вопросы оценки технического состояния оборудования с учетом изменения физических характеристик материала, таких как скорость ультразвука, магнитные и электромагнитные параметры и поверхностная энергия, в результате накопления усталостных повреждений в сталях различных марок: 09Г2С, Ст3сп, ВСт3сп5. Полученные зависимости скорости ультразвука, действующего напряжения отклика электромагнитного сигнала, напряженности постоянного магнитного поля и поверхностной энергии от уровня накопленных повреждений показали резкое изменение характеристик при переходе через уровень накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,78 \div 0,8$ , который соответствует области предразрушения материала [32, 52-54].

Исследования изменения скорости ультразвуковых продольных волн при циклическом нагружении образцов со сварным швом в сталях 09Г2С и Ст3сп5 показали (рисунок 2), что скорость распространения продольных ультразвуковых волн в сварном шве стали 09Г2С и ВСт3сп5 ниже, чем в основном металле, а после циклического нагружения наблюдается снижение скорости ультразвука во всех зонах рабочей части образца [32, 50-51].

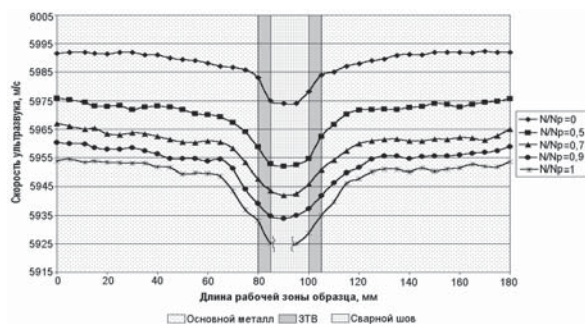


Рисунок 2. Зависимость изменения скорости ультразвуковых продольных волн по длине рабочей зоны образца со сварным швом от степени накопленных повреждений для стали 09Г2С [50]

Взаимосвязь изменения механических и электромагнитных свойств металлов, вопросы оценки напряженно-деформированного состояния оболочковых конструкций рассмотрены в работах Э.С. Горкунова, В.Ф. Мужижкого, Р.В. Загидуллина, В.В. Ключева, А.А. Абакумова, А.А. Абакумова (мл.), А.А. Дубова, В.Т. Власова, Р.В. Агинея, М.Г. Баширова, М.Х. Султанова, Р.Г. Вильданова, О.Г. Кондрашовой, А.Т. Шарипкуловой и др. [55-63].

Фундаментальные исследования взаимосвязи магнитных, электрических и механических свойств металлов и сплавов со структурой, фазой, химическим составом и режимами термообработки ведутся научной школой, возглавляемой Горкуновым Э.С. [57-58].

В работе [58] показана возможность контроля накопленной пластической деформации и оценки остаточного ресурса материала в процессе циклического нагружения по значениям магнитных параметров. Исследовано влияние малоциклового усталости на изменение магнитных характеристик отожженной стали 45, (коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции, для предельной петли и для частных петель магнитного гистерезиса), а также скорости распространения продольной звуковой волны. Авторами установлена чувствительность рассматриваемых физических величин к величине пластической деформации, накопленной при циклическом нагружении в области больших и малых деформаций, а также получены устойчивые корреляционные связи между коэрцитивной силой, измеренной на частных петлях магнитного гистерезиса в слабых полях, и остаточным удлинением.

В работах А.А. Дубова, В.Т. Власова [59-60] представлен и научно обоснован эффект – магнито-пластика, лежащий в основе метода магнитной памяти металла (МПМ). Авторами разработана диаграмма магнито-механических состояний ферромагнетика при взаимодействии силовых и магнитных полей. Рассмотрена физическая сущность усталостной поврежденности металла и предложена модель развития процесса накопления усталостной поврежденности, открывающей возможность количественной оценки состояния материала при использовании метода МПМ и других методов.

В работе О.Г. Кондрашовой [56] исследованы изменения магнитных характеристик при малоцикловом нагружении и статическом изгибе образцов из стали 09Г2С. Получена зависимость **размаха петли магнитоупругого гистерезиса** градиента напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений. Установлено, что первоначальное нагружение образцов приводит к скачкообразному убыванию размаха градиента напряженности магнитного поля, которое при последующем нагружении переходит в плавное линейное снижение. Также в работе показаны зависимости напряженности магнитного поля от степени поврежденности стали 09Г2С при статическом и циклическом нагружении. Установлено, что в зоне потенциального разрушения образцов плоского типа, пластин и тонкостенных оболочек, параметр относительной напряженности магнитного поля принимает максимальное значение, что является диагностическим признаком для выявления потенциальных зон разрушения оборудования на разных стадиях его эксплуатации [55-56].

**В работах [32, 36-38,50] исследования процесса накопления повреждений в стали 09Г2С при циклическом режиме нагружения показали, что предельное состояние металла наступает при уровне накопленных повреждений**

$Ni/Np = 0,78 \div 0,8$ . По результатам испытаний образцов с разным уровнем накопления усталостных повреждений установлены зависимости предела прочности и предела текучести от уровня накопленных повреждений, **которые показали, что при циклическом нагружении временное сопротивление и предел текучести стали 09Г2С уменьшаются.**

В работе [63] показаны исследования, изменения механических свойств трубных сталей 19Г и 17Г1С после длительной эксплуатации в трубопроводах, которые показали, что механические свойства трубных сталей имеют тенденцию к повышению прочностных характеристик. Большинство исследований ударной вязкости по Шарпи однозначно указывают на то, что длительная эксплуатация приводит к довольно резкому падению ударной вязкости (до 30%), особенно при отрицательных климатических температурах.

Процессы деградации структуры и изменения механических свойств материала высокотемпературного технологического оборудования рассматривались в работах А.В. Рубцова, Н.Ю. Трякиной [64, 65].

В работе [64] исследованы особенности разрушения труб змеевиков реакционных печей с различной наработкой под действием внутреннего избыточного давления. Установлена корреляция между твердостью металла в основном металле и сварных соединениях с различными сроками наработки и его механическими характеристиками, а также введены поправочные коэффициенты в расчетные уравнения для определения механических характеристик.

В работе [65] экспериментально установлены закономерности старения металла пароперегревателей. Показано, что увеличение степени деградации структуры приводит к появлению неоднородности распределения твердости по поверхности пароперегревателей.

Доказано, что для металла пароперегревателей из стали 12Х1МФ происходит снижение коэффициента старения за счет накопления повреждений и деградации структуры, критическое значение которого составляет 0,85. Дальнейшее снижение коэффициента приводит к их разрушению.

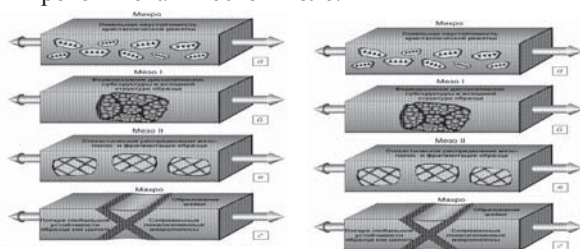
Значительный вклад в изучение процессов самоорганизации структуры материала в условиях деформирования и разрушения внесли В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев, В.Е. Панин, А.А. Шанявский и др. [66-70].

Для учета влияния на механические свойства внешних факторов (напряжение, температура, скорость и вид нагружения, размеры образца, состояние поверхности, степень агрессивности окружающей среды и т.д.) В.С. Ивановой предложено использовать идеи синергетики, учитывающей закономерности самоорганизующихся структур, так как

критические точки, контролирующие переход системы через кризис, содержат уникальную информацию о свойствах материала [66-68]. В ее подходе внешние факторы учитываются с помощью соотношений, связывающих критические параметры подобных точек бифуркаций. В работе [67] показана возможность резко повысить информативность результатов испытаний на кратковременное растяжение, усталость и ползучесть с определением степени деградации материала при заданных условиях службы на основе параметрических карт механического состояния сплава.

В.Е. Панин с сотрудниками [69-70] ввели представления о структурных мезомасштабных уровнях деформации и рассмотрели стадийность пластической деформации с учетом двух самосогласованных механизмов деформаций «сдвиг плюс поворот».

В работе [69] показано, что все типы дефектов в кристаллах следует рассматривать как локальные метастабильные структуры, возникающие в зонах концентраторов напряжений различного масштаба. Авторами установлено, что деформируемый кристалл непрерывно испытывает изменение своей исходной кристаллической структуры, формируя на различных мезомасштабных уровнях диссипативные субструктуры (рисунок 3), выполняющие функцию, адаптации пластического течения кристалла в вихревом механическом поле.



а – микро (локальная неустойчивость кристаллической решетки); б – мезо I (формирование диссипативной субструктуры в исходной структуре образца); в – мезо II (стохастическое распределение мезополос и фрагментация образца); г – макро (сопряженные локализованные макрополосы; потеря глобальной устойчивости образца как целого; образование шейки)

Рисунок 3. Схема масштабных уровней потери сдвиговой устойчивости в деформируемом твердом теле [70]

В работах [69-70] дана классификация стадийности кривой «напряжение-деформация» при одноосном растяжении поликристалла в рамках иерархии масштабов структурных уровней деформации. Показано, что стадии I и II кривой «напряжение-деформация» связаны со сдвигом в кристаллической решетке. Переход от стадии II к стадии III является точкой бифуркации на мезоуровне. К началу этой стадии образуется ячеистая структура и происходит 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 4).

Переходу от одной точки бифуркации к другой отвечает достижение критической разреженности среды (вследствие роста плотности дефектов с увеличением деформации), а каждому масштабному уровню деформации отвечает свой порог адаптивности системы к росту дефектов [68, 70].

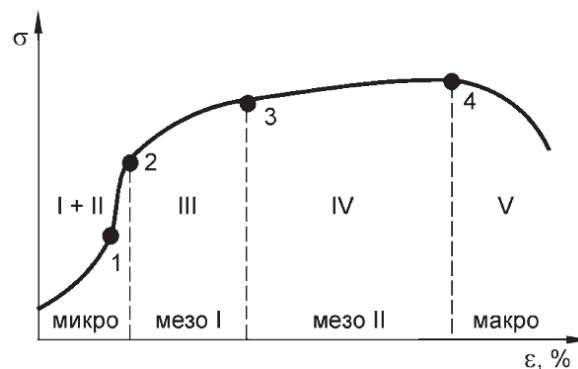


Рисунок 4. Схема стадий кривой «напряжение-деформация» при растяжении металлического поликристалла с ГЦК-решеткой с выделенными точками (1, 2, 3, 4) бифуркаций, отвечающих критической степени разреженности среды [68, 70]

В работе [68] основе анализа данных мультифрактальной параметризации структур металлов и сплавов при пластической деформации показано, что на мезоуровне переход от одной стадии деформации к другой контролируется сменой мезомасштабного уровня деформации и спонтанным изменением фрактальной размерности мезоструктуры.

Таким образом, под действием внешней нагрузки происходит непрерывное изменение кристаллической структуры конструкционных материалов. При этом поэтапно используются соответствующие механизмы адаптации материала.

**Выводы**

Анализ публикаций, посвященных исследованию техногенного риска и безопасной эксплуатации технических устройств, показывает, что, в связи с особенностями технологических процессов нефтепереработки и нефтехимии, оборудование в процессе эксплуатации подвергается нестационарному тепловому и механическому нагружению. В результате в наиболее нагруженных зонах конструкции происходит постепенное накопление необратимых повреждений в материале конструктивных элементов, которое может привести к внезапному разрушению оборудования.

Поэтому решение проблем прочности, ресурса и безопасной эксплуатации технологического оборудования и конструкций не теряет своей актуальности.

Оценка технического состояния и прогнозирования ресурса оболочковых конструкций – сложная,

многоплановая и требующая комплексного решения задача. На протяжении многих десятилетий ведутся исследования, посвященные обоснованию расчетных характеристик прочности и ресурса технологического оборудования различных отраслей, изучению механизмов накопления повреждений, разработке методов оценки предельного состояния, долговечности и прогнозирования ресурса оборудования, эксплуатируемого в условиях стационарных и циклических нагрузок.

Исследования закономерностей изменения физико-механических свойств материалов оболочковых конструкций под действием различных эксплуатационных факторов и видов нагружения показывают, что конструкционные материалы являются самоорганизованными системами, которые реагируют на изменение внешней нагрузки, путем непрерывного изменения кристаллической струк-

туры и поэтапного изменения механизма адаптации к внешнему воздействию. Изучение взаимосвязей физико-механических характеристик с изменениями структуры материала в процессе эксплуатации дает возможность установить механизмы накопления повреждений и с большей достоверностью оценить момент наступления предельного состояния оболочковой конструкции.

Таким образом, проведенный анализ исследований в области оценки ресурса технологического оборудования показывает, что одним из направлений развития методов комплексной оценки технического состояния оболочковых конструкций является исследование влияния длительного квазистатического нагружения на физические параметры (скорость ультразвуковых волн, напряженность постоянного магнитного поля и др.) и механические свойства материала.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 РД 26.260.004-91. Руководящий документ. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: утв. и введен в действие Концерном «Химнефтемаш» 01.01.1992. – Режим доступа: URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=ESU; n=23003>.

2 Махутов, Н.А. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н.А. Махутов, В.Н. Пермьяков. – Новосибирск: Наука, 2005. – С. 227-229.

3 Шубин, В.С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств: учеб. пособие для вузов / В.С. Шубин, Ю.А. Рюмин. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 359 с.

4 РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 06.09.2001 № 39. – Сер. 03. Вып. 17 – М.: ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 136 с.

5 Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических производств (ДиОР-05). – Волгоград: ВНИИКТНефтехимоборудование, 2006. – 90 с.

6 Гусенков, А.П., Малоцикловая прочность оболочечных конструкций / А.П. Гусенков, Г.В. Москвитин, В.Н. Хорошилов. – М.: Наука, 1989. – 254 с.

7 Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. –

Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. I: Критерии прочности и ресурса. – 494 с.

8 Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.

9 Исследования прочности при малоцикловом нагружении. Серия из 8 книг. Под ред. С.В. Серенсена, Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. М.: Наука, 1975-2006.

10 Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.

11 Ковшова, Ю.С. Влияние квазистатических режимов нагружения на прочность сосудов, работающих под давлением / Ю.С. Ковшова, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Н.А. Махутов, М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Том 80. – № 9. – С. 50-55.

12 Гумеров, А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов: научное издание / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. – 310 с.

13 Абдуллин, И. Г. Определение малоциклового усталостной долговечности материалов металлоконструкций по кинетике изменения микродеформации кристаллической решетки / И.Г. Абдуллин, Д.Е. Бугай, Э.М. Гутман // Известия вузов. Нефть и газ. – 1984. – № 7. – С. 83-87.

14 Абдуллин, И.Г. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности: производственно-практическое издание / И.Г. Абдуллин, А.Г. Гареев, А.В. Мостовой. – Уфа: Гилем, 1997. – 177 с.

15 Зайнуллин, Р.С. Ресурс нефтехимического оборудования с механической неоднородностью: научное издание / Р.С.

Зайнуллин, О.А. Бакши, Р.С. Абдуллин. – М.: Недра, 1998. – 268 с.

16 Зайнуллин, Р.С. Повышение ресурса нефтепроводов / Р.С. Зайнуллин, А.Г. Гумеров. – М.: Недра, 2000. – С. 380-401.

17 Бакиев, А.В. Тонкоструктурные изменения металла длительно эксплуатируемых трубопроводов системы газоснабжения: научное издание / А.В. Бакиев, В.А. Сандаков; АН РБ, Отд-ние наук о земле и природных ресурсов. – Уфа: Гилем, 2008. – 134 с.

18 Пат. 2413195 Российская федерация, МПКG01N3/00 (2006.01). Способ определения остаточного ресурса трубопроводов/ Сандаков В.А., Бакиев А.В.; заявитель и патентообладатель: негосударственное профессиональное образовательное учреждение Инженерный Центр «Техника». – № 2009127940/28; заявл. 20.07.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл.№ 6. – 7 с.

19 Кузеев, И.Р. Старение металла реакторов установок замедленного коксования/ И.Р. Кузеев, М.В. Кретинин, А.В. Грибанов и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 17-19.

20 Кузеев, И.Р. Долговечность реакторов установок замедленного коксования / И.Р. Кузеев, Е.А. Филимонов, Ю.М. Абызильдин, В.М. Кретинин. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. – 56 с.

21 Закирничная, М.М. Образование фуллеренов в процессе диффузии углерода в структуру стали / М.М. Закирничная, И.Р. Кузеев, О.И. Ткаченко // Известия вузов. Нефть и газ. – 2001. – N2. – С. 112-119. – С. 2001.

22 Mukhametzyanov, I.Z. Structural organization of petroleum disperse systems/ I.Z. Mukhametzyanov, I.R. Kuzeev, V.G. Voronov, S.I. Spivak // Doklady Physical Chemistry. – 2002. – Т. 387. – № 1-3. – С. 284-286.



23 Баязитов, М.И. Формирование признаков кристаллических тел в потенциально аморфных системах / М. И. Баязитов, А.Н. Васильев, В.А. Гафарова, И.Р. Кузеев, Д.К. Никифорова // Известия вузов. Нефть и газ. - 2014. - С. 82-86.

24 Закирничная, М.М. Анализ изменения структуры и свойств стали 20 в условиях длительной эксплуатации / М. М. Закирничная, И.Р. Кузеев, В.К. Бердин, Н.Ю. Кириллова // Известия вузов. Нефть и газ. - 2006. - № 4. - С. 75-82.

25 Кузеев, И. Р. Взаимосвязь механического поведения разнородных сварных соединений с морфологией их усталостных изломов / И. Р. Кузеев, Е. В. Пояркова, Е. А. Наумкин // Нефтегазовое дело. - 2011. - Т.9. - №2. - С. 80-86.

26 Kuzeev, I.R. Wear resistance of steel 20 after thermochemical treatment in fluid petroleum pitch / I.R. Kuzeev, S.V. Popova, R.F. Fazlyakhmetov // Journal of Friction and Wear. - 2011. - Vol. 32, № 3. - P. 186-191.

27 Kuzeev, I.R. Change in mechanical properties of two-layer steel 16GS+08KH13 in the process of long-term operation / I.R. Kuzeev, G.E. Zakirnichnyi, L.F. Zakirova // Metal Science and Heat Treatment. - 2009. - Т. 51. - № 9-10. - С. 450-453.

28 Kuzeev, I.R. Estimation of 20CR23Ni18 steel properties degradation in real time / I.R. Kuzeev, A.G. Chirkova, L.G. Avdeeva, E.A. Naerlanamova // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2005. - Т. 71. - № 9. - С. 56-59.

29 Кузеев, И. Р. Изучение закономерности диффузии углерода в поверхностный слой стали 12Х18Н10Т / И. Р. Кузеев, С. В. Попова, А. Н. Васильев // Литье и металлургия. - 2012. - №3. - С. 346-348.

30 Халимов, А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.А. Особенности оценки ресурса безопасной эксплуатации оборудования для переработки нефти / А.Г. Халимов, Р.С. Зайнуллин, А.А. Халимов // Безопасность жизнедеятельности. - 2008. - № 2. - С. 6-11.

31 Халимов, А.Г. Техническая диагностика и оценка ресурса нефтегазохимического оборудования: учебное пособие / А.Г. Халимов, Р.С. Зайнуллин, А.А. Халимов. - СПб.: Недра, 2012. - 568 с.

32 Наумкин, Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Евгений Анатольевич Наумкин; УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. - 250 с.

33 Демченко, А.А. Взаимосвязь деформационного рельефа поверхности и степени поврежденности стали при малоцикловом нагружении / А.А. Демченко, М.В. Демченко, А.В. Сисанбаев, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Химическая

физика и мезоскопия. - 2012. - Т.14 - №3. - С. 426-429.

34 Кузеев, И.Р. Особенности распределения магнитных свойств в материале оболочковой конструкции на начальном этапе циклического нагружения / И. Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, А.В. Самигуллин, М.З. Зарипов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. - 2015. - № 1. - С. 261-274

35 Самигуллин, А.В. Мультифрактальная параметризация результатов твердомерии материала оболочковой конструкции, подверженной циклическому нагружению / А. В. Самигуллин, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев, А.Н. Тепсаев // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. - 2015. - № 2. - С. 323-338.

36 Кузеев, И.Р. Изменения механических характеристик материала гибких насосно-компрессорных труб в условиях циклического нагружения / И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Р.Р. Кудашев, А.А. Рябов, В.В. Коновалов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. - 2015. - Т. 2, № 2.

37 Самигуллин, А.В. Расчетно-экспериментальное определение предельного состояния материала оболочковой конструкции, подверженной малоцикловому нагружению / А.В. Самигуллин, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2014. № 5. С. 404-419.

38 Бикбулатов, Т.Р. Оценка остаточного ресурса оборудования и предельного состояния конструкционных материалов при усталостном нагружении по результатам электромагнитных измерений: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Тимур Ринатович Бикбулатов; УГНТУ. - Уфа, 2011. - 102 с.

39 Мотова, Е.А. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта / Е. А. Мотова, Н. Е. Никитина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). - 2011. - № 3-2. - С. 52-56.

40 Ультразвук. Маленькая энциклопедия / глав. ред. И. П. Голямина. - М.: «Советская энциклопедия», 1979. - 400 с.

41 Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.

42 Гайдукевич А.К. Повышение качества акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением, в нефтепереработке и нефтехимии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Александр Константинович Гайдукевич; УГНТУ. - Уфа, 2001. - 89 с.

43 Гурвич, А.К. Ультразвуковой контроль сварных швов: научное издание /

А.К. Гурвич, И.Н. Ермолов. - Киев: Техника, 1972. - 460 с.

44 Муравьев В. В. Механизм взаимосвязи скорости ультразвуковых колебаний и структуры сталей и сплавов // Неразрушающие физические методы и средства контроля. - М.: МНПО «Спектр», 1987. - Ч. 1. - С. 62.

45 Муравьев, В.В. Взаимосвязь структуры и механических свойств инструментальной углеродистой стали со скоростью распространения ультразвуковых колебаний / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, А.П. Бялуга // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1992. - № 2. - С. 69-71.

46 Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. - Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. - 184 с.

47 Зуев Л.Б. Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении поликристалла / Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И. // Журнал технической физики. - 1999. - Т. 69. - вып. 12. - С. 100-101.

48 Семухин, Б.С. Скорость ультразвука в низкоуглеродистой стали, деформируемой в нижнем пределе текучести / Б.С. Семухин, Л.Б. Зуев, К.И. Бушмелева // Прикладная механика и техническая физика. - 2000. - Т. 41. - № 3. - С. 197-201.

49 Зуев Л.Б. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации А1 / Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин, К.И. Бушмелева // Журнал технической физики, 2000. - Т. 70. - вып. 1. - С. 52-56.

50 Прохоров, А.В. Оценка долговечности аппаратов, подверженных действию циклических нагрузок по изменению акустических и магнитных свойств стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Андрей Владимирович Прохоров; УГНТУ. - Уфа, 2002. - 102 с.

51 Щипачев, А.М. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С в малоцикловой области / А.М. Щипачев, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Вестник УГАТУ. - 2012. - Т.16, №5. - С. 89-92.

52 Наумкин, Е.А. Двухпараметрический контроль различных стадий упругопластического нагружения образцов из стали 09Г2С / Е.А. Наумкин, Э.Р. Юмаева, Т.Р. Бикбулатов, М.И. Кузеев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. - 2011. - № 5. - С. 388-393.

53 Бикбулатов, Т.Р. Оценка предельного состояния стали по параметрам переменного электрического сигнала // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. - 2011. - №5. - С. 394-399. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Naumkin/Naumkin\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Naumkin/Naumkin_2.pdf).

54 Наумкин, Е.А. Оценка предельного состояния стали по параметрам переменного электрического сигнала/ Е.А. Наумкин, Т.Р. Бикбулатов, М.И. Кузеев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. - 2011. - № 5. - С. 394-399.

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

56 Кондрашова, О.Г. Определение ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования путем оценки адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03/ Оксана Геннадьевна Кондрашова; УГНТУ. - Уфа, 2006. - 107 с.

57 Михеев, М.Н. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества (физическая основа магнитного структурного анализа) / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов // Дефектоскопия. - 1981. - № 8. - С. 5-22.

58 Горкунов, Э.С. Применение магнитных и электромагнитно-акустических методов для оценки пластической деформации при циклическом нагружении отожженной среднеуглеродистой стали/ Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, С.М. Задворкин, С.В. Смирнов, С.А. Роговая, М.Н. Соломеин // Дефектоскопия. - 2006. - № 5. - С. 29-36.

59 Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла/ В.Т. Власов, А.А. Дубов. - Издательство - ЗАО «Тиссо», 2004. - 424 с.

60 Дубов, А.А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла/ А.А. Дубов // Контроль. Диагностика. - 2004. - № 1 - С. 8-16.

61 Баширов, М.Г. Обеспечение безопасности эксплуатации и оценка ресурса оборудования для переработки нефти электромагнитными методами диагностики: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Мусса Гумерович Баширов; УГНТУ. - Уфа: [б. и.], 2002. - 361 с.

62 Шарипкулова, А. Т. Разработка метода оценки предельного состояния металла технологических трубопроводов по электромагнитным параметрам: дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03, 05.02.01 / Айгуль Тимирьяновна Шарипкулова ; УГНТУ, каф. МАХП. - Уфа: [б. и.], 2009. - 110 с.

63 Пенкин, А.Г. Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической микротвердости / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, Л.И. Маслов. - М.: Интерконтакт Наука, 2004. - 70 с.

64 Рубцов, А.В. Разработка метода оценки технического состояния труб змеевиков реакционных печей: дис. ... канд. техн. наук. 05.02.13 / Алексей Вячеславович Рубцов; УГНТУ. - Уфа: 2007. - 150 с.

65 Трякина, Н.Ю. Деградация структуры и изменение механических свойств металла пароперегревателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Надежда Юрьевна Трякина; УГНТУ - Уфа, 2010. - 187 с.

66 Иванова, В.С. Количественная фратография. Усталостное разрушение: научное издание / В.С. Иванова, А.А. Шаняевский. - Челябинск: изд-во «Металлургия», Челябинское отделение, 1988. - 400 с.

67 Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении: научное издание / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. - М.: Наука, 1994. - С. 130-138.

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

69 Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, Т.Ф. Елсукова, А.Г. Иванчин // Изв. вузов. Физика. - 1982. - Т. 25. - № 6. - С. 5-27.

70 Панин, В.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле / В.Е. Панин, Л.Е. Панин // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - №4. - С. 5-23.

REFERENCES

1 RD 26.260.004-91. Rukovodyashii dokument. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tehnikeskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii: utv. i vveden v deistvie Koncernom «Himneftemash» 01.01.1992. - Rezhim dostupa: URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=ESU; n=23003>.

2 Mahutov, N.A. Resurs bezopasnoi ekspluatatsii sudov i tubo-provodov / N.A. Mahutov, V.N. Permyakov. - Novosibirsk: Nauka, 2005. - S. 227-229.

3 Shubin, V.S. Nadezhnost' oborudovaniya himicheskikh i neftepererabatyvayushih proizvodstv: ucheb. posobie dlya vuzov / V.S. Shubin, Yu.A. Ryumin. - M.: Himiya, KolosS, 2006. - 359 s.

4 RD 03-421-01. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu diagnostirovaniya tehnikeskogo sostoyaniya i opredeleniyu ostatochnogo sroka sluzhby sudov i apparatov: utv. postanovleniem Gosgortehnadzora Rossii ot 06.09.2001 № 39. Ser. 03. Vyp. 17 - M.: FGUP «Nauchno-

tehnikeskii centr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortehnadzora Rossii», 2002. - 136 s.

5 Metodika diagnostirovaniya tehnikeskogo sostoyaniya i opredeleniya ostatochnogo resursa tehnikeskogo oborudovaniya neftepererabatyvayushih, neftehimicheskikh proizvodstv (DiOR-05). - Volgograd: VNIKTneftehimoborudovanie, 2006. - 90 s.

6 Gusenkov, A.P., Malociklovaya prochnost' obolocheknykh konstruktsii / A.P. Gusenkov, G.V. Moskvitin, V.N. Horoshilov. - M.: Nauka, 1989. - 254 s.

7 Mahutov, N.A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tehnogennaya bezopasnost': V 2 ch. / N.A. Mahutov. - Novosibirsk: Nauka, 2005. - Ch. I: Kriterii prochnosti i resursa. - 494 s.

8 Mahutov, N.A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tehnogennaya bezopasnost': V 2 ch. / N.A. Mahutov. - Novosibirsk: Nauka, 2005. - Ch. 2: Obosnovanie resursa i bezopasnosti. - 610 s.

9 Issledovaniya prochnosti pri malociklovom nagruzenii. Seriya iz 8 knig. Pod red. S.V. Serensena, N.A. Mahutova, M.M. Gadenina. M.: Nauka, 1975-2006.

10 Mahutov, N.A. Prochnost' i bezopasnost': fundamentalnye i prikladnye issledovaniya. - Novosibirsk: Nauka, 2008. - 528 s.

11 Kovshova, Yu.S. Vliyanie kvazistaticheskikh rezhimov nagruzeniya na prochnost' sudov, rabotayushih pod davleniem / Yu.S. Kovshova, I.R. Kuzeev, E.A. Naumkin, N.A. Mahutov, M.M. Gadenin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. - 2014. - Tom 80. - № 9. - S. 50-55.

12 Gumerov, A.G. Bezopasnost' dlitel'no ekspluatiruemykh magi-stral'nykh nefteprovodov: nauchnoe izdanie / A.G. Gumerov, R.S. Gumerov, K.M. Gumerov. - M.: Nedra-Biznescentr, 2003. - 310 s.

13 Abdullin, I. G. Opredelenie malociklovoi ustalostnoi dolgovechnosti materialov metallokonstruktsii po kinetike izmeneniya mikrodeformatsii kristallicheskoj reshetki / I.G. Abdullin, D.E. Bugai, E.M. Gutman // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. -1984. - № 7. - S. 83-87.

14 Abdullin, I.G. Korrozionno-mehanicheskaya stoikost' neftegazovykh truboprovodnykh sistem: diagnostika i prognozirovanie dolgovechnosti: proizvodstvenno-prakticheskoe izdanie / I.G. Abdullin, A.G. Gareev, A.V. Mostovoi. - Ufa: Gilem, 1997. - 177 s.

15 Zainullin, R.S. Resurs neftehimicheskogo oborudovaniya s mehanicheskoi neodnorodnost'yu: nauchnoe izdanie / R.S. Zainullin, O.A. Bakshi, R.S. Abdullin. - M.: Nedra, 1998. - 268 s.

16 Zainullin, R.S. Povyshenie resursa nefteprovodov / R.S. Zainullin, A.G. Gumerov. - M: Nedra, 2000. - S. 380-401.

17 Bakiev, A.V. Tonkostrukturnye izmeneniya metalla dlitel'no ekspluatiruemih truboprovodov sistemy gazosnabzheniya: nauchnoe izdanie / A.V. Bakiev, V.A. Sandakov; AN RB, Otd-nie nauk o zemle i prirodnyh resursov. - Ufa: Gilem, 2008. - 134 s.

18 Pat. 2413195 Rossiiskaya federaciya, MPKG01N3/00 (2006.01). Sposob opredeleniya ostatocnogo resursa truboprovodov/ Sandakov V.A., Bakiev A.V.; zayavitel' i patentoobladatel': negosudarstvennoe professional'noe obrazovatel'noe uchrezhdenie Inzhenerniy Centr «Tehnika». - № 2009127940/28; zayavl. 20.07.2009; opubl. 27.02.2011, Byul. № 6. - 7 s.

19 Kuzeev, I.R. Starenie metalla reaktorov ustanovok zamedlennogo koksovaniya/ I.R. Kuzeev, M.V. Kretinin, A.V. Gribanov i dr. // Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. - 1984. - № 1. - S. 17-19.

20 Kuzeev, I.R. Dolgovechnost' reaktorov ustanovok zamedlennogo koksovaniya / I.R. Kuzeev, E.A. Filimonov, Yu.M. Abyzgil'din, V.M. Kretinin. - M.: CNIITeneftchim, 1986. - 56 s.

21 Zakirnichnaya, M.M. Obrazovanie fullerenov v processe diffuzii ugleroda v strukturu stali / M.M. Zakirnichnaya, I.R. Kuzeev, O.I. Tkachenko // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. - 2001. - № 2. - S. 112-119.

22 Mukhametzyanov, I.Z. Structural organization of petroleum disperse systems/ I.Z. Mukhametzyanov, I.R. Kuzeev, V.G. Voronov, S.I. Spivak // Doklady Physical Chemistry. - 2002. - T. 387. - № 1-3. - S. 284-286.

23 Bayazitov, M.I. Formirovanie priznakov kristallicheskih tel v potencial'no amorfnyh sistemah / M. I. Bayazitov, A.N. Vasil'ev, V.A. Gafarova, I.R. Kuzeev, D.K. Nikiforova // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. - 2014. - S. 82-86.

24 Zakirnichnaya, M.M. Analiz izmeneniya struktury i svoystv stali 20 v usloviyah dlitel'noi ekspluatsii / M. M. Zakirnichnaya, I.R. Kuzeev, V.K. Berdin, N.Yu. Kirillova // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. - 2006. - № 4. - S. 75-82.

25 Kuzeev, I. R. Vzaimosvyaz' mehanicheskogo povedeniya raznorodnyh svarnykh soedinenii s morfologiei ih ustalostnykh izlomov / I. R. Kuzeev, E. V. Poyarkova, E. A. Naumkin // Neftegazovoe delo. - 2011. - T.9. - № 2. - S. 80-86.

26 Kuzeev, I.R. Wear resistance of steel 20 after thermochemical treatment in fluid petroleum pitch / I.R. Kuzeev, S.V. Popova, R.F. Fazlyakhmetov // Journal of Friction and Wear. - 2011. - Vol. 32, № 3. - P. 186-191.

27 Kuzeev, I.R. Change in mechanical properties of two-layer steel 16GS+08KH13 in the process of long-term operation / I.R. Kuzeev, G.E. Zakirnichnyi, L.F. Zakirova // Metal Science and Heat

Treatment. - 2009. - T. 51. - № 9-10. - C. 450-453.

28 Kuzeev, I.R. Estimation of 20CR23Ni18 steel properties degradation in real time / I.R. Kuzeev, A.G. Chirkova, L.G. Avdeeva, E.A. Haerlanamova //

Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. - 2005. - T. 71. - № 9. - S. 56-59.

29 Kuzeev, I. R. Izuchenie zakonomernosti diffuzii ugleroda v po-verhnostnyy sloi stali 12H18N10T / I. R. Kuzeev, S. V. Popova, A. N. Vasil'ev // Lit'e i metallurgiya. - 2012. - № 3. - S. 346-348.

30 Halimov, A.G., Zainullin P.S., Halimov A.A. Osobennosti ocenki resursa bezopasnoi ekspluatsii oborudovaniya dlya pererabotki nef'ti / A.G. Halimov, P.S. Zainullin, A.A. Halimov // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. □ 2008. - № 2. - S. 6-11.

31 Halimov, A.G. Tehnicheskaya diagnostika i oценка resursa neftegazohimicheskogo oborudovaniya: uchebnoe posobie / A.G. Halimov, R.S. Zainullin, A.A. Halimov. - SPb.: Nedra, 2012. - 568 s.

32 Naumkin, E.A. Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyah ciklicheskogo nagruzheniya, na stadii proektirovaniya i ekspluatsii: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.02.13 / Evgenii Anatol'evich Naumkin; UGNTU. - Ufa: Izdvo UGNTU, 2011. - 250 s.

33 Demchenko, A.A. Vzaimosvyaz' deformacionnogo rel'efa poverhnosti i stepeni povrezhdennosti stali pri malociklovom nagruzhenii / A.A. Demchenko, M.V. Demchenko, A.V. Sisanbaev, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev // Himicheskaya fizika i mezoskopiya. - 2012. - T.14. - №3. - S. 426-429.

34 Kuzeev, I.R. Osobennosti raspredeleniya magnitnykh svoystv v ma-teriale obolochkovoi konstrukcii na nachal'nom etape ciklicheskogo nagruzheniya / I. R. Kuzeev, E.A. Naumkin, A.V. Samigullin, M.Z. Zaripov // Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurnal. - 2015. - № 1. - S. 261-274

35 Samigullin, A.V. Mul'tifraktal'naya parametrizatsiya rezul'tatov tverdometrii materiala obolochkovoi konstrukcii, podverzhenoii ciklicheskomu nagruzheniyu / A. V. Samigullin, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev, A.N. Tepsaev // Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurnal. - 2015. - № 2. - S. 323-338.

36 Kuzeev, I.R. Izmeneniya mehanicheskikh karakteristik materiala gibkikh nasosno-kompressornykh trub v usloviyah ciklicheskogo nagruzheniya / I.R. Kuzeev, E.A. Naumkin, R.R. Kudashev, A.A. Ryabov, V.V. Kononov // Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR. - 2015. - T. 2. - № 2.

37 Samigullin, A.V. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie rezul'tatov sostoyaniya materiala obolochkovoi konstrukcii, podverzhenoii malociklovomu

nagruzheniyu / A.V. Samigullin, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev // Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftegazovoe delo. - 2014. - № 5. - S. 404-419.

38 Bikbulatov, T.R. Ocenka ostatocnogo resursa oborudovaniya i predel'nogo sostoyaniya konstrukcionnykh materialov pri ustalostnom nagruzhenii po rezul'tatam elektromagnitnykh izmerenii: dis. kand. tehn. nauk: 05.26.03 / Timur Rinatovich Bikbulatov; UGNTU. - Ufa, 2011. - □ 102 s.

39 Motova, E.A. O vozmozhnosti ul'trazvukovogo kontrolya kompres-sornykh lopatok posle ekspluatsii i remonta/ E. A. Motova, N. E. Nikitina // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta). - 2011. - № 3-2. □ S. 52-56.

40 Ul'trazvuk. Malen'kaya enciklopediya / glav. red. I. P. Golyamina. - M.: «Sovetskaya enciklopediya», 1979. - 400 s.

41 Nerazrushayushii kontrol': spravochnik: V 7 t. Pod obsh. red. V.V. Klyueva. T. 3: Ul'trazvukovoi kontrol' / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. - M.: Mashinostroenie, 2004. - 864 s.

42 Gaidukevich A.K. Povyshenie kachestva akustiko-emissionnogo kontrolya sudosudov, rabotayushih pod davleniem, v neftepererabotke i neftehimii: dis. kand. tehn. nauk: 05.02.13 / Aleksandr Konstantinovich Gaidukevich; UGNTU. - Ufa, 2001. - 89 s.

43 Gurvich, A.K. Ul'trazvukovoi kontrol' svarnykh shvov: nauchnoe izdanie / A.K. Gurvich, I.N. Ermolov. - Kiev: Tehnika, 1972. - 460 s.

44 Murav'ev V. V. Mehanizm vzaimosvyazi skorosti ul'trazvukovykh kolebaniy i struktury staley i splavov // Nerazrushayushie fizicheskie metody i sredstva kontrolya. - M.: MNPO «Spektr», 1987. - Ch. 1. - S. 62.-45

45 Murav'ev, V.V. Vzaimosvyaz' struktury i mehanicheskikh svoystv instrumental'noi ugl'erodistoi stali so skorost'yu rasprostraneniya ul'trazvukovykh kolebaniy/ V.V. Murav'ev, L.B. Zuev, A.P. Byaluga // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushii kontrol'. - 1992. - № 2. - S. 69-71.

46 Murav'ev, V.V. Skorost' zvuka i struktura staley i splavov / V.V. Murav'ev, L.B. Zuev, K.L. Komarov. - Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izda-tel'skaya firma RAN, 1996. - 184 s.

47 Zuev L.B. Zavisimost' skorosti ul'trazvuka ot deistvuyushogo napryazheniya pri plasticheskom techenii polikristalla / Zuev L. B., Semu-hin B. S., Bushmeleva K. I. // Zhurnal tehnicheckoi fiziki. - 1999. - T. 69. - vyp. 12. - S. 100-101.

48 Semuhin, B.S. Skorost' ul'trazvuka v nizkouglerodistoi stali, deformiruemoi na nizhnem predele tekuchesti / B.S. Semuhin, L.B. Zuev, K.I. Bushmeleva // Prikladnaya

механика i tehnikeskaya fizika. - 2000. - T. 41. - № 3. - S. 197-201.

49 Zuev L.B. Izmenenie skorosti ul'trazvuka pri plasticheskoi de-formacii Al / L.B. Zuev, B.S. Semuhin, K.I. Bushmeleva // Zhurnal tehnikeskoj fiziki, 2000. - T. 70. - vyp. 1. - S. 52-56.

50 Prohorov, A.V. Ocenka dolgovechnosti apparatov, podverzhennykh deistviyu ciklicheskih nagruzok po izmeneniyu akusticheskikh i magnitnykh svoystv stali: dis. kand. tehn. nauk: 05.02.13 / Andrei Vladimirovich Prohorov; UGNTU. - Ufa, 2002. - 102 s.

51 Shipachev, A.M. Izmenenie zakona raspredeleniya skorosti ul'trazvukovykh voln pri ciklicheskom nagruzhении stali 09G2S v malociklovoi oblasti / A.M. Shipachev, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev // Vestnik UGATU. - 2012. - T.16. - №5. - S. 89-92.

52 Naumkin, E.A. Dvuhparametricheskii kontrol' razlichnykh stadii uprugoplasticheskogo nagruzheniya obrazcov iz stali 09G2S / E.A. Naumkin, E.R. Yumaeva, T.R. Bikbulatov, M.I. Kuzeev // Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftegazovoe delo. - 2011. - № 5. - S. 388-393.

53 Bikbulatov, T.R. Ocenka predel'nogo sostoyaniya stali po parametram peremennogo elektricheskogo signala // Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurn. - 2011. - № 5. - S. 394-399. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Naumkin/Naumkin\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Naumkin/Naumkin_2.pdf).

54 Naumkin, E.A. Ocenka predel'nogo sostoyaniya stali po parametram peremennogo elektricheskogo signala / E.A. Naumkin, T.R. Bikbulatov, M.I. Kuzeev // Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftegazovoe delo. - 2011. - № 5. - S. 394-399.

55 Kuzeev, I.R. Ocenka adaptivnykh svoystv metalla po izmeneniyu ego magnitnykh harakteristik dlya opredeleniya resursa bezopasnoi ekspluatatsii neftegazovogo oborudovaniya / I.R. Kuzeev, E.A. Naumkin, O.G. Kondrashova // Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn. 2006. - T.1, - № 4. S. 124-133.

56 Kondrashova, O.G. Opredelenie resursa bezopasnoi ekspluatatsii

neftegazovogo oborudovaniya putem ocenki adaptivnykh svoystv metalla po izmeneniyu ego magnitnykh harakteristik: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.26.03 / Oksana Gennad'evna Kondrashova; UGNTU. - Ufa, 2006. - 107 s.

57 Miheev, M.N. Svyaz' magnitnykh svoystv so strukturnym sostoyaniem veshstva (fizicheskaya osnova magnitnogo strukturnogo analiza) / M.N. Miheev, E.S. Gorkunov // Defektoskopiya. - 1981. - № 8. - S. 5-22.

58 Gorkunov, E.S. Primenenie magnitnykh i elektromagnitno-akusticheskikh metodov dlya ocenki plasticheskoi deformatsii pri ciklicheskom nagruzhении otzhdhennoi sredneuglerodistoi stali / E.S. Gorkunov, R.A. Savrai, A.V. Makarov, S.M. Zadvorkin, S.V. Smirnov, S.A. Rogovaya, M.N. Solomein // Defektoskopiya. - 2006. - № 5. - S. 29-36.

59 Vlasov, V.T. Fizicheskie osnovy metoda magnitnoi pamyati me-talla / V.T. Vlasov, A.A. Dubov. - Izdatel'stvo ZAO «Tisso», 2004. - 424 s.

60 Dubov, A.A. Sposob opredeleniya predel'nogo sostoyaniya metalla i resursa oborudovaniya s ispol'zovaniem parametrov magnitnoi pamyati metalla / A.A. Dubov // Kontrol'. Diagnostika. - 2004. - № 1 - S. 8-16.

61 Bashirov, M.G. Obespechenie bezopasnosti ekspluatatsii i ocenka resursa oborudovaniya dlya pererabotki nefte elektromagnitnymi meto-dami diagnostiki: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.26.03 / Mussa Gumerovich Bashirov; UGNTU. - Ufa: [b. i.], 2002. - 361 s.

62 Sharipkulova, A. T. Razrabotka metoda ocenki predel'nogo sostoyaniya metalla tehnologicheskikh truboprovodov po elektromagnitnym parametram: dis. ... kand. tehn. nauk : 05.26.03, 05.02.01 / Aigul Timiryazovna Sharipkulova ; UGNTU, kaf. MAHP. - Ufa: [b. i.], 2009. - 110 s.

63 Penkin, A.G. Ocenka ostatochnogo resursa rabotosposobnosti trubnykh staley s ispol'zovaniem metodov akusticheskoi emissii i kineticheskoi mikrotverdosti / A.G. Penkin, V.F. Terent'ev, L.I. Maslov. - M.: Interkontakt Nauka, 2004. - 70 s.

64 Rubcov, A.V. Razrabotka metoda ocenki tehnikeskogo sostoyaniya trub zmeevikov reakcionnykh pechei: dis. kand. tehn. nauk. 05.02.13 / Aleksei Vyacheslavovich Rubcov; UGNTU. - Ufa: 2007. - 150 s

65 Tryakina, N.Yu. Degradatsiya struktury i izmenenie mehanicheskikh svoystv metalla paroperegrevatelei: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.16.09 / Nadezhda Yur'evna Tryakina; UGNTU - Ufa, 2010. - 187 s.

66 Ivanova, V.S. Kolichestvennaya fraktografiya. Ustalostnoe razru-shenie: nauchnoe izdanie / V.S. Ivanova, A.A. Shanyavskii. - Chelyabinsk: izd-vo «Metallurgiya», Chelyabinskoe otdelenie, 1988. - 400 s.

67 Ivanova, V.S. Sinergetika i fraktaly v materialovedenii: nauchnoe izdanie / V.S. Ivanova, A.S. Balankin, I.Zh. Bunin, A.A. Oksogoev. - M.: Nauka, 1994. - S. 130-138.

68 Ivanova, B.C. O svyazi stadiinosti processov plasticheskoi deformatsii s fraktal'noi strukturoi, otvchayushei smene masshtabnogo urovnya deformatsii / V.S. Ivanova, A.A. Oksogoev // Fizicheskaya mezomehanika. - 2006. - T.9. - № 6. - S. 17-27.

69 Panin, V.E. Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel / V.E. Panin, Yu.V. Grinyaev, T.F. Elsukova, A.G. Ivanchin // Izv. vuzov. Fi-zika. - 1982. - T. 25. - № 6. - S. 5-27.

70 Panin, V.E. Masshtabnye urovni gomeostaza v deformiruemom tverdom tele / V.E. Panin, L.E. Panin // Fizicheskaya mezomehanika. - 2004. - T. 7. - №4. - S. 5-23.

*Ковшова Ю.С., канд. техн. наук, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация*  
Yu.S. Kovshova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant of Chair «Technological Machines and Equipment», FSBEI USPTU, Ufa, the Russian Federation  
e-mail: [july52008@yandex.ru](mailto:july52008@yandex.ru)