ОЦЕНКА НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ГИБКОЙ ТРУБЕ КОЛТЮБИНГОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

ASSESSMENT OF ACCUMULATED DAMAGES IN A FLEXIBLE PIPE OF COILED TUBING TECHNOLOGY BASED ON MAGNETIC INSPECTION RESULTS

Р. Ф. Джурарев

Rustam F. Dzhuraev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Е. А. Наумкин

Evgeny A. Naumkin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И. Р. Кузеев

Iskander R. Kuzeev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Колтюбинговые технологии в настоящее время нашли широкое распространение в нефтегазодобывающей промышленности. При этом гибкие трубы, входящие в состав колтюбинговых установок, в процессе эксплуатации подвержены многочисленным факторам воздействия, негативно влияющим на срок службы. Одним из наиболее опасных факторов являются циклические изгибающие нагрузки в малоцикловой области, которые вызывают ускоренное развитие дефектов, приводящих к разрушению. В связи с этим возникает необходимость совершенствования методов и оборудования для осуществления контроля технического состояния и уровня накопленных повреждений в материале гибкой трубы. Многие исследователи показывают, что магнитные методы измерения состояния сталей являются чувствительными как к потенциальным очагам разрушения, так и к накоплению повреждений в стальных изделиях. Характер нагружения труб по периметру приводит к одностороннему накоплению повреждений в различных зонах по механизму сжатия, растяжения и изгиба. С точки зрения диагностики разрушения необходимо понимать специфику механизма накопления повреждений. Поэтому в работе проведены исследования закономерности изменения напряженности постоянного магнитного поля по поверхности испытываемых образцов плоского типа при циклическом растяжении и циклическом сжатии.

Результаты исследований показали, что при циклическом растяжении и циклическом сжатии образцов с увеличением уровня накопленных усталостных повреждений происходит повышение результирующей напряженности магнитного поля в измеряемых зонах. Однако при циклическом сжатии величина диапазона изменения результирующей напряженности значительно больше, чем при циклическом растяжении.

Интервал изменения результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений при циклическом сжатии увеличивается в большей степени, чем при циклическом растяжении. Также и результаты средней величины результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений показали аналогичный характер изменения, то есть при циклическом сжатии зарегистрировано увеличение измеряемой величины значительно в большей степени, чем при циклическом растяжении.

Ключевые слова

циклическое растяжение;
циклическое сжатие; гибкие трубы;
колтюбинговые технологии;
уровень накопленных
усталостных повреждений;
магнитные характеристики

Таким образом, результаты исследования показали, что при диагностировании необходимо учитывать характер и неравномерность распределения напряжений в исследуемом объекте. Наличие в гибкой трубе зон растяжения и зон сжатия при циклическом изгибе формирует изменения магнитных характеристик с различной интенсивностью.

Coiled tubing technologies are now widely used in the oil and gas industry. At the same time, flexible pipes, which are part of coiled tubing installations, are subject to numerous factors of influence during operation, which negatively affect the service life. One of the most dangerous factors is cyclic bending loads in the low-cycle region, which cause accelerated development of defects leading to fracture. In this regard, there is a need to improve methods and equipment for monitoring the technical condition and the level of accumulated damage in the flexible pipe material. Many researchers show that magnetic methods for measuring the condition of steels are sensitive to both potential sites of destruction and the accumulation of damage in steel products.

The nature of pipe loading along the perimeter leads to a one-sided accumulation of damage in various zones by the mechanism of compression, tension and bending. From the point of view of fracture diagnostics, it is necessary to understand the specifics of the damage accumulation mechanism. Therefore, in this work, we investigated the regularities of the change in the strength of a constant magnetic field over the surface of flat-type test specimens under cyclic tension and cyclic compression. The research results showed that during cyclic tension and cyclic compression of samples with an increase in the level of accumulated fatigue damage, an increase in the resulting magnetic field strength in the measured zones occurs. However, under cyclic compression, the magnitude of the range of variation of the resulting tension is much larger than under cyclic stretching.

The range of changes in the resulting magnetic field strength from the level of accumulated fatigue damage during cyclic compression increases to a greater extent than during cyclic tension. Also, the results of the average value of the resulting magnetic field strength from the level of accumulated fatigue damage showed a similar nature of the change, that is, an increase in the measured value was recorded during cyclic compression to a much greater extent than during cyclic tension.

Thus, the results of the study showed that when diagnosing, it is necessary to take into account the nature and uneven distribution of stresses in the object under study. The presence of tension zones and compression zones in a flexible pipe during cyclic bending forms changes in magnetic characteristics with different intensities.

Введение

Колтубинговые технологии с применением гибких труб (ГТ) в основном используются в нефтегазовой промышленности для капитального ремонта, интенсификации притока, каротажа скважин, бурения и других применений. При эксплуатации ГТ подвергается многократным механическим нагрузкам, таким как растяжение, сжатие, усталость, а также химическому износу из-за агрессивной среды, особенно в нефтегазовой промышленности.

Характер разворачивания и свертывания гибких труб, которые хранятся намотанными на катушках, приводит к возникновению циклического накопления повреждений в пла-

Keywords

cyclic tension; cyclic compression;
flexible pipes;
coiled tubing technology;
accumulated fatigue damage rate;
magnetic characteristics

стической области нагружения. При этом по верхней образующей происходит отнулевое растяжение, а по нижней образующей — отнулевое сжатие по механизму изгиба. В промежутке между этими циклами труба находится в рабочем состоянии растяжения под действием веса оборудования и собственного веса. Специальные приспособления позволяют выпрямлять трубу для спуска в скважину и, после завершения технологического процесса, наматывать на катушку. При использовании труб наблюдается шесть стадий изгиба: по три в прямом и обратном направлениях. Первая стадия реализуется при снятии трубы с катушки с помощью инжектора. Вторая стадия завершается в верхней точке

траектории движения трубы, а третья — в момент выпрямления трубы перпендикулярно поверхности земли для опускания в скважину. После завершения процесса деформирования трубы происходит в обратном порядке. Шесть последовательных актов изгиба рассматриваются как один цикл нагружения. Если операция бурения или ремонта происходит в наклонной скважине, то необходимо рассматривать еще два акта изгиба.

Кроме того, ГТ также подвергается действию собственного веса, веса оборудования и внутреннего давления. Эти факторы приводят к малоцикловому усталостному повреждению ГТ и ограничивают их использование в пределах нескольких десятков циклов [1].

Из экспериментальных исследований и опыта работы с ГТ можно сделать вывод, что наиболее опасным разрушающим фактором является циклическое нагружение материала в упруго-пластической области под действием изгиба [2, 3]. Обеспечение безопасной эксплуатации ГТ вызывает необходимость разработки новых методов измерения и создания новых приборов для контроля технического состояния трубы. Для разработки новых методов диагностики требуется наличие информации о закономерностях изменений измеряемых физических характеристик в процессе нагружения. Ранее в работе [4] было показано изменение магнитных характеристик при циклическом нагружении материала, где показана чувствительность как к уровню накопленных усталостных повреждений, так и к регистрации предельного состояния материала. Также в работах [5, 6] показано, что измерение напряженности магнитного поля свидетельствует о наличии зон с наибольшими значениями параметра при различных уровнях накопленных повреждений.

Учитывая различие схем нагружения в стенке по периметру трубы при изгибе, возникает задача о фиксации изменений, происходящих в стенке трубы ГТ при эксплуатации.

Оборудование и методика проведения эксперимента

Нефтегазодобывающие предприятия в России, помимо зарубежного оборудования для ГТ, используют оборудование отечественных производителей. Изготовление ГТ осуществляется на предприятии ООО «Завод гибких труб «Уралтрубмаш», которое для производства труб применяет сталь 10ГМФ и углеродистые стали повышенного качества 10 и 20. На предприятии ООО «Энгельс-спецтрубмаш» для изготовления ГТ используют штрипсы, которые поставляются французскими производителями. Специальная сталь для изготовления ГТ в настоящее время отечественными предприятиями не выпускается [7, 8].

В качестве объекта исследования была выбрана сталь 20 как наиболее часто используемая отечественными производителями. Из этой стали были изготовлены плоские образцы для циклического нагружения толщиной $h = 4$ мм и рабочей зоной $l = 50$ мм согласно ГОСТ 25502-79 [9]. Испытания образцов на циклическое сжатие и циклическое растяжение было проведено по схеме «отнулевого цикла» с применением разрывной машины ИР 5113-100-11.

Измерения напряженности постоянного магнитного поля проводились в каждой зоне образца, где предварительно была нанесена сетка с шагом 10 мм (рисунок 1), в исходном состоянии перед проведением эксперимента и далее через каждые 500 циклов нагружения.

Измерения напряженности постоянного магнитного поля на образцах выполнялись измерителем концентрации напряжений ИКН-2М-8.

Результаты и их обсуждения

На рисунке 2 представлены результаты измерения в испытуемых образцах результирующей напряженности постоянного магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений при циклическом сжатии.

Рисунок 1. Схема расположения измеряемых зон на образце

Величина результирующей напряженности определялась путем алгебраического сложения квадратов нормальной и тангенциальной составляющих вектора напряженности постоянного магнитного поля под квадратным корнем $H_R = \sqrt{H_n^2 + H_t^2}$ [10]. Величина уровня накопленных усталостных повреждений определялась как отношение количества циклов нагружения в момент измерения к количеству циклов до разрушения (N_i/N_p). Аналогичные результаты для циклического растяжения приведены на рисунке 3.

Результаты показали, что величина результирующей напряженности с увеличением

уровня накопленных усталостных повреждений имеет тенденцию к увеличению в процессе нагружения и при циклическом растяжении, и при циклическом сжатии. Однако характер изменения различный с точки зрения неопределенности. Особенно это проявляется при циклическом сжатии. За пределами зоны разрушения зависимость обладает большой волатильностью. В зоне разрушения разброс значений существенно меньше и проявляется зона «А» увеличения разброса в области накопления повреждений 0,7–0,9 (область предразрушения), что является привлекательным с диагностической точки зрения. При цикли-

Рисунок 2. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля при изменении уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом сжатии в 1, 2, 5 зонах образцов (а) и в 3 и 4 зонах (б), на границе которых произошло разрушение

Рисунок 3. Распределение результирующей напряженности постоянного магнитного поля при изменении уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом растяжении

ческом растяжении такая зона увеличения разброса не проявляется.

На зависимостях средней величины результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом сжатии и при циклическом растяжении (рисунки 4, 5) проявились те же закономерности, что и на рисунках 2 и 3.

Измерения показали, что разброс данных при циклическом сжатии значительно выше,

чем при растяжении, и при этом при сжатии наблюдается отчетливая тенденция роста величины результирующей напряженности при увеличении уровня накопленных усталостных повреждений. Такие же зависимости проявляются на зависимостях интервалов изменения результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений (рисунки 6 и 7).

Рисунок 4. Зависимость средней величины результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом сжатии

Рисунок 5. Зависимость средней величины результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом растяжении

Рисунок 6. Зависимость интервала изменения результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом сжатии

Рисунок 7. Зависимость интервала изменения результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений в образцах при циклическом растяжении

Различие в поведении испытанной стали при циклическом растяжении и циклическом сжатии заключается в том, что интервалы циклов испытания на растяжение и сжатие отличаются на порядок величины. При циклическом сжатии формируется поровое пространство, которое эволюционирует в сторону слияния и образования микротрещин.

Развитая внутренняя поверхность существенно влияет на изменение напряженности магнитного поля. В процессе циклического растяжения не наблюдается формирование порового пространства. Зона разрушения локализуется с образованием трещины.

Проведенные исследования показали, что параметр напряженности магнитного поля

можно использовать в качестве диагностического признака для зон ГТ, испытывающих циклическое сжатие. Для диагностирования участков, подвергнутых циклическому растяжению, необходимо использовать измерение других физических параметров, например скорость распространения ультразвуковой волны.

Выводы

В связи со сложными условиями эксплуатации гибкой трубы колтюбинговой технологии в материале происходит ускоренное накопление повреждений, которое вызывает формирование дефектов и последующее разрушение. Учитывая ускоренное дефектообразование в гибкой трубе, возникает необходимость совершенствования методов контроля технического состояния и уровня накопленных повреждений. Одним из чувствительных методов определения уровня накопленных повреждений является магнитный контроль, который был использован в данной работе. В качестве измеряемой характеристики использована напряженность постоянного магнитного поля.

Анализ распределения нагрузок в гибкой трубе показал, что имеются зоны растягивающих и сжимающих напряжений, вызывая неравномерность накопления повреждений.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Behenna F.R., Myrick D.D., Stanley P.K., Tipton S.M., Hammond W.A. Field Validation of a Coiled Tubing Fatigue Model // Coiled Tubing: Materials of SPE/ICoTA Conference and Exhibition. Houston, Texas, USA. 2003. SPE-81726-MS. DOI: 10.2523/81726-ms.
2. Брылкин А.В., Буксбаум В.Б., Колесников К.И., Порошин В.Б., Усова М.В. К оценке долговечности длинномерных гибких труб // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2012. № 34. С. 75-80
3. Ньюман К. Рабочий ресурс непрерывной трубы (колтюбинга) // Время колтюбинга. Время ГРП. 2004. № 10. С. 48-52.
4. Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Кондрашова О.Г., Прохоров А.Е. Изменение магнитных параметров при накоплении усталостных повреждений в стали 09Г2С // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. ст. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. С. 106-111.
5. Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. 244 с.
6. Кондрашова О.Г. Определение ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования путем

Поэтому проведены исследования магнитных характеристик материала при циклическом растяжении и циклическом сжатии.

Результаты показали, что изменения результирующей напряженности в пяти измеряемых зонах как при циклическом растяжении, так и при циклическом сжатии повышаются с увеличением уровня накопленных усталостных повреждений, но при циклическом сжатии диапазон значительно шире.

Средняя величина результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений при сжатии увеличивается в большей степени, чем при растяжении. Аналогичный характер имеют и зависимости интервалов изменения результирующей напряженности магнитного поля от уровня накопленных усталостных повреждений, то есть при циклическом сжатии увеличение больше, чем при циклическом растяжении.

Отсюда следует, что магнитный контроль является чувствительным к накоплению усталостных повреждений в материале гибкой трубы, поэтому его можно рекомендовать в качестве диагностического признака контроля зон, подвергнутых циклическому сжатию. При разработке приборного оборудования необходимо учитывать различия свойств в зонах растяжения и зонах сжатия.

оценки адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. 117 с.

7. Козловский А.М., Пыхов С.И., Кочетков И.М., Кривихин И.М., Пыхов Л.М., Байбулатов С.Р. Длинномерные сварные трубы из стали 10ГМФ. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. 74 с.

8. Колтюбинговый узел разрубили в «Узловой». ООО «ESTM» запустило первое в стране производство гибких насосно-компрессорных труб // Бурение и нефть. 2018. № 2. С. 3-6.

9. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1985. 32 с.

10. Прибор магнитоизмерительный феррозондовый комбинированный Ф-205.30А: руководство по эксплуатации. МКИЯ. 427633.001-30А. Екатеринбург: 1992. 24 с.

REFERENCES

1. Behenna F.R., Myrick D.D., Stanley P.K., Tipton S.M., Hammond W.A. Field Validation of a Coiled Tubing Fatigue Model. *Materials of SPE/ICoTA Conference and Exhibition «Coiled Tubing»*. Houston, Texas, USA, 2003, SPE-81726-MS. DOI: 10.2523/81726-ms.

2. Brylkin A.V., Buksbaum V.B., Kolesnikov K.I., Poroshin V.B., Usova M.V. K otsenke dolgovechnosti dlin-nomernykh gibkikh trub [Estimation of Long Coiled Tubing Durability]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 2012, No. 34, pp. 75-80. [in Russian].

3. Nyuman K. Rabochii resurs nepreryvnoi truby (koltyubinga) [Working Life of a Continuous Pipe (Coiled Tubing)]. *Vremya koltyubinga. Vremya GRP — Coiled Tubing Times Journal*, 2004, No. 10, pp. 48-52. [in Russian].

4. Naumkin E.A., Kuzeev I.R., Kondrashova O.G., Prokhorov A.E. Izmenenie magnitnykh parametrov pri nakoplenii ustalostnykh povrezhdenii v stali 09G2S [Changes in Magnetic Parameters Upon Accumulation of Fatigue Damage in 09G2S Steel]. *Sbornik statei «Mirovye soobshchestvo: problemy i puti resheniya»* [Collection of Articles «World Community: Problems and Solutions»]. Ufa, UGNTU Publ., 2004, pp. 106-111. [in Russian].

5. Naumkin E.A. *Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya, na stadii proektirovaniya i ekspluatatsii: dis. d-ra tekhn. nauk* [Methodology for Predicting the Resource of Oil and Gas Equipment Operated under Cyclic Loading at the Design and Operation Stage: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2011. 244 p. [in Russian].

6. Kondrashova O.G. *Opreделение ресурса bezopasnoi ekspluatatsii neftegazovogo oborudovaniya putem otsenki*

adaptivnykh svoystv metalla po izmeneniyu ego magnitnykh kharakteristik: dis. kand. tekhn. nauk [Determination of the Resource of Safe Operation of Oil and Gas Equipment by Assessing the Adaptive Properties of the Metal by Changing its Magnetic Characteristics: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2006. 117 p. [in Russian].

7. Kozlovskii A.M., Pykhov S.I., Kochetkov I.M., Krivikhin I.M., Pykhov L.M., Baibulatov S.R. *Dlinnomernye svarnye truby iz stali 10GMF* [Long-Length Welded Pipes Made of Steel 10 GMF]. Chelyabinsk, TsNTI Publ., 2003. 74 p. [in Russian].

8. Koltyubingovyi uzel razrubili v «Uzlovoy». OOO «ESTM» zapustilo pervoe v strane proizvodstvo gibkikh nasosno-kompressornykh trub [Coiled Tubing Knot was Cut in the «Uzlovaya». «ESTM» LLC are Launched the Country's First Production of Flexible Tubing]. *Burenie i neft' — Drilling and Oil*, 2018, No. 2, pp. 3-6. [in Russian].

9. GOST 25.502-79. *Raschety i ispytaniya na proch-nost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniy na ustalost'* [State Standard 25.502-79. Strength Analysis and Testing in Machine Building. Methods of Metals Mechanical Testing. Methods of Fatigue Testing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1985. 32 p. [in Russian].

10. *Pribor magnitoizmeritel'nyi ferrozondovyi kombinirovanniy F-205.30A: rukovodstvo po ekspluatatsii. MKIYa. 427633.001-30A* [Combined Magnetic Fluxgate Device F-205.30A: Operation Manual. MKIA. 427633.001-30A]. Yekaterinburg, 1992. 24 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Джуряев Рустам Фатхудинович, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rustam F. Dzhusraev, Post-graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: jurayev-rustam@mail.ru

Наумкин Евгений Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Evgeny A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ynaumkin@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация,

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru