

УДК 53.082.72/.78



ФОРМИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

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

(Уфимский государственный нефтяной технический университет)

Исследования посвящены проблеме ранней диагностики зоны образования трещины при статическом разрушении внутренним избыточным давлением цилиндрической оболочки. В качестве определяющих параметров использовали распределение по образующей цилиндра вектора напряженности постоянного магнитного поля, степень затухания и среднее напряжение амплитуды отклика электрического сигнала. Показано, что, использованные диагностические параметры, однозначно позволяют предсказать зону образования разрушающей трещины. Информативность электрических сигналов связана с перераспределением электронного облака валентных электронов проводимости при порообразовании.

Ключевые слова: напряженное состояние, цилиндрическая оболочка, вектор напряженности постоянного магнитного поля, отклик электрического сигнала, твердость.

E-mail: ynaumkin@mail.ru

DOI: 10.5510/OGP20150400264

В тонких цилиндрических оболочках, нагруженных избыточным давлением, разрушение, при достижении предельного состояния, происходит с образованием трещины, ориентированной вдоль образующей.

Это связано с характерным напряженным состоянием, когда тангенциальные напряжения (σ_τ) в два раза больше меридиональных напряжений (σ_m), а радиальными напряжениями (σ_r) можно пренебречь. Тогда эквивалентные напряжения σ_s определяются как [1]:

$$\sigma_s = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_\tau - \sigma_r = \sigma_\tau$$

при этом тангенциальные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_\tau = PR/h$$

где P – внутреннее давление, МПа;

R – внутренний радиус оболочки, мм;

h – толщина стенки оболочки, мм.

Для оболочковых конструкций не допускается превышение эквивалентными напряжениями предела текучести конструкционного материала. С целью обеспечения прочности конструкции расчет толщины стенки проводится по допускаемым напряжениям, которые определяются по значениям предела текучести и предела прочности материала с применением коэффициентов запаса. По российским стандартам [2] коэффициенты запаса принимаются 1.5 и 2.4 по пределу текучести и пределу прочности соответственно. В макромасштабе эти коэффициенты погашают все неоднородности листового проката и те неоднородности, которые возникают при изготовлении конструкции. Таким образом обеспечивается прочность конструкции.

Однако исследования показывают [3-5], что очаги разрушения формируются на нано- и микроуровне организации конструкционного материала. При этом происходит перемещение механизмов адаптации к внешним воздействиям с одного масштабного уровня на другой. В связи с этим неоднород-

ности в структуре, механических характеристиках и геометрии конструкции на определенной стадии жизненного цикла начинают играть существенную роль в обеспечении прочности. Любые градиентные каналы, формирующиеся в структуре, способствуют перемещению и аккумуляции энергии внешнего воздействия в зонах возможного разрушения.

Экспериментально обнаружено [6], что в электропроводящих материалах участки, где реализуются наибольшие механические напряжения, являются «стоком» для отрицательно заряженных частиц. В сталях кристаллическая решетка основана на металлических связях за счет обобществления валентных электронов и образования «электронного газа». В связи с этим, отклик на воздействие направленного электрического сигнала вглубь металла будет зависеть от количества вакансий, пор, и может давать информацию о дефектной структуре. Поскольку электрические и магнитные поля сопутствуют друг другу, можно предположить, что изменение характеристик магнитного поля также будет давать информацию о процессе накопления повреждений, связанных с образованием пустот.

В исследованиях [7] отмечено, что относительное среднее напряжение амплитуды отклика электрического сигнала на плоских образцах при их деформировании имеет тенденцию снижения и при достижении материалом предельного состояния приобретает наименьшее значение. Относительная степень затухания амплитуды отклика электрического сигнала при усталостных испытаниях с повышением числа циклов нагружения увеличивается по линейному закону.

В работе [8] представлены исследования свидетельствуют о том, что в зоне разрушения плоских образцов практически с самого начала нагружения формируются экстремумы значений напряженности постоянного магнитного поля. Это означает, что потенциальная зона разрушения выявляется на ранних стадиях нагружения.

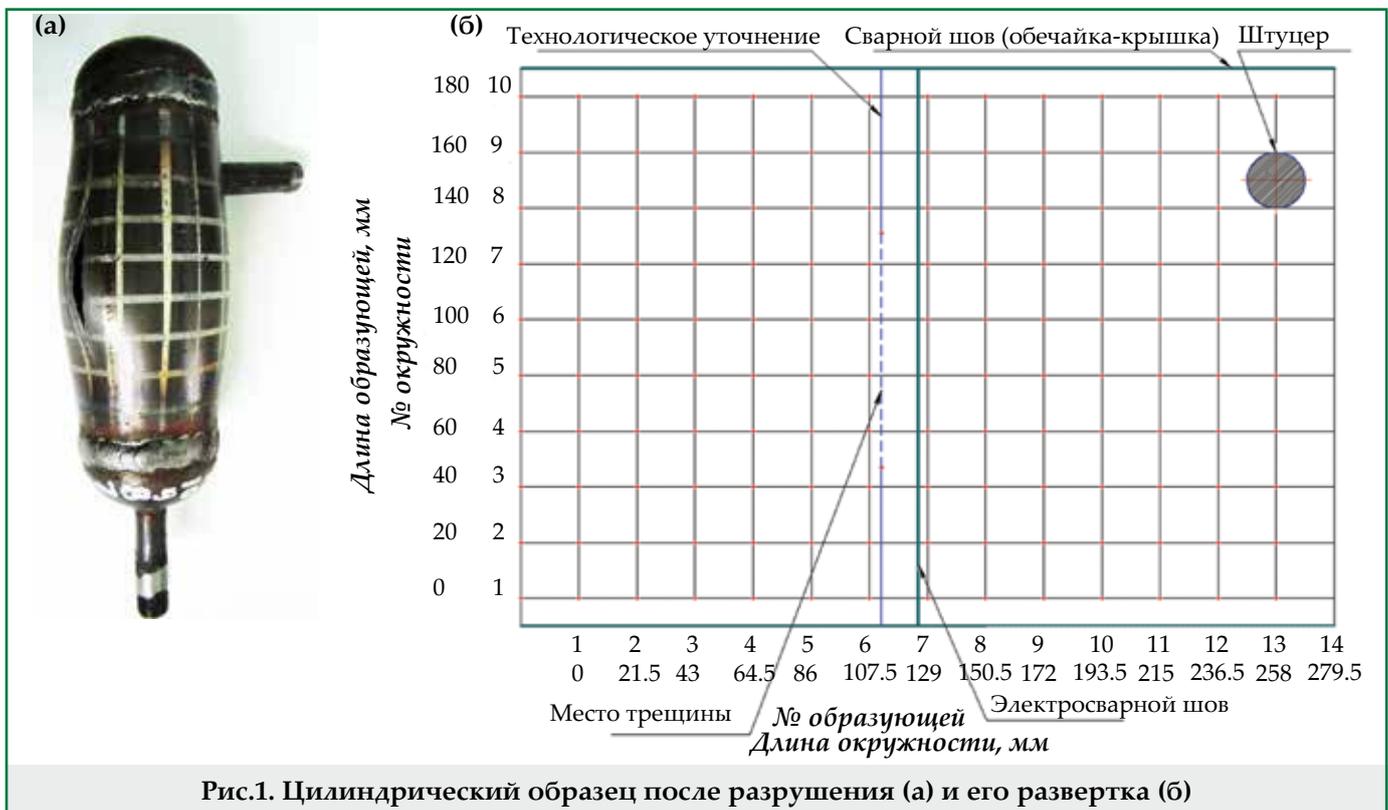


Рис.1. Цилиндрический образец после разрушения (а) и его развертка (б)

Экспериментально на стальных образцах установлено, что в качестве информативных параметров накопления повреждений и достижения материалом предельного состояния можно использовать изменение электромагнитных свойств [7,8].

На следующем этапе исследований эксперименты по изучению изменения характера электрических и магнитных сигналов проводили на цилиндрических оболочках, нагруженных внутренним давлением.

Оболочковая конструкция представляет собой сварной сосуд, состоящий из цилиндрической обечайки диаметром 89 мм и толщиной стенки 3 мм, изготовленной из электросварной трубы стали 20, эллиптических днищ, штуцеров для циркуляции рабочей среды, как это показано на рисунке 1(а).

Испытания проводились на экспериментальном стенде, где оболочковые конструкции (в количестве 5 штук) подвергались статическому нагружению внутренним давлением до разрушения, которое происходило в зоне технологического утонения стенки при давлении равном 31 ± 0.5 МПа (рис.1).

Измерения напряженности постоянного магнитного поля в материале оболочковых конструкций, подверженных статическому нагружению, выполнялись в исходном состоянии и после разрушения с помощью измерителя концентрации напряжений ИКН-2М-8.

Измерение параметров отклика электрического сигнала проводилось с помощью внешнего измерительного устройства Tie Pie SCOPE HS 801, накладного вихретокового преобразователя трансформаторного типа с сердечником с неконцентрическим расположением обмоток и персонального компьютера.

Все исследуемые параметры были измерены до начала экспериментов по всей внешней поверхности оболочки. В последствии все полученные результаты измерения поделены на начальные значения и таким образом все распределения показаны

ны в безразмерных значениях.

На рисунке 2 представлено характерное распределение относительной величины нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля $H_{np}/H_{n_{исх}}$ (H_{np} и $H_{n_{исх}}$ – значения нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля после разрушения и в исходном состоянии соответственно) по цилиндрической обечайке одного из образцов, результаты которого показывают, что параметр $H_{np}/H_{n_{исх}}$ приобретает наибольшие значения в вершине трещины.

Анализ распределения относительной величины тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля $H_{tp}/H_{t_{исх}}$ (H_{tp} и $H_{t_{исх}}$ – значения тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля после разрушения и в исходном состоянии соответственно) по цилиндрической обечайке, который представлен на рисунке 3, показал, что максимальное изменение исследуемого параметра также наблюдается в зоне разрушения.

Полученный характер распределения параметров $H_{tp}/H_{t_{исх}}$ и $H_{np}/H_{n_{исх}}$ согласуется с теорией трансформации доменной структуры в условиях пластической деформации [9-11]. Увеличение концентрации дислокаций и образования поровой структуры приводит к измельчению доменов и блокированию их перемещения.

Характер изменения параметров электрических сигналов в процессе увеличения давления до разрушающего значения соответствует представлениям о концентрации валентных электронов проводимости в зонах наибольших механических напряжений.

На рисунке 4 представлено распределение относительной твердости $HRB_p/HRB_{исх}$ (HRB_p и $HRB_{исх}$ – значения твердости после разрушения и в исходном состоянии соответственно) по поверхности цилиндрической обечайки, которое показывает,

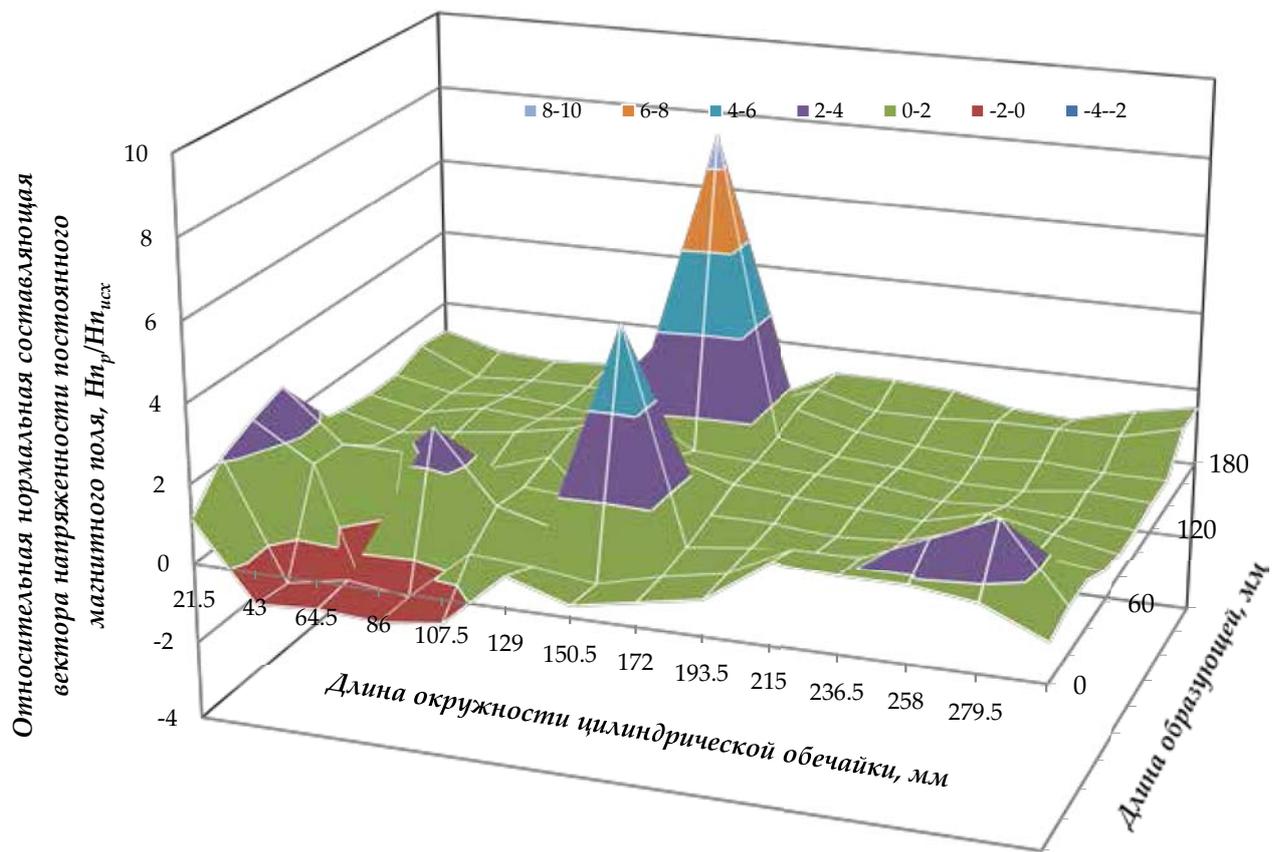


Рис.2. Распределение относительного значения нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля по цилиндрической обечайке

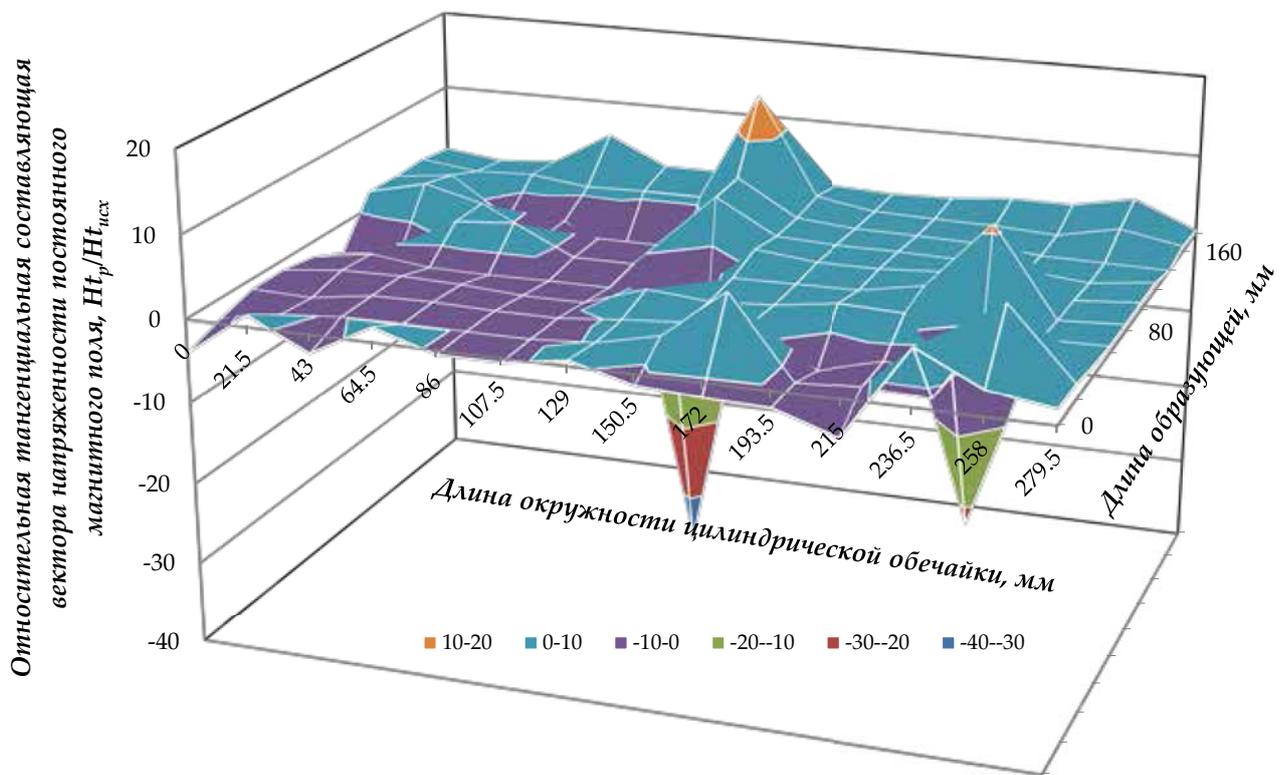


Рис.3. Распределение относительного значения тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля по цилиндрической обечайке

что параметр $HRB_p/HRB_{исх}$ имеет максимальное изменение в области образования трещины, что свидетельствует об упрочнении конструкционного материала при статическом нагружении внутренним давлением до разрушения.

Анализ электрических характеристик материала оболочковой конструкции базировался на результатах измерения степени затухания и среднего напряжения амплитуды отклика электрического сигнала. Распределение относительной степени затухания амплитуды отклика электрического сигнала $\psi_{раз}/\psi_{исх}$ свидетельствует о том, что наибольшие изменения параметра $\psi_{раз}/\psi_{исх}$ проявляются в центральной области цилиндрического образца, которая соответствует зонам с наибольшей пластической деформацией металла. В качестве иллюстрации на рисунке 5 представлено распределение параметра $\psi_{раз}/\psi_{исх}$ по образующим с порядковыми номерами № 4, 8, 12.

Распределение по образующим цилиндрической обечайки № 4, 8, 12 показывает, что параметр $U_{ср.раз}/U_{ср.исх}$ имеет наименьшие значения в центральной области образца (рис.6).

Эксперименты показали, что в момент разрушения оболочки степень затухания амплитуды отклика электрического сигнала $\psi_{раз}/\psi_{исх}$ и относительная величина среднего напряжения амплитуды отклика электрического сигнала $U_{ср.раз}/U_{ср.исх}$ достигают критических значений: $(4.5 \pm 0.4)\%$ и $(3.8 \pm 0.4)\%$ соответственно.

Полученные результаты согласуются с предположением о экстремальном изменении электрических и магнитных параметров в зоне формирования трещины. В зоне, где реализуются наибольшие пластические деформации, наблюдаются мак-

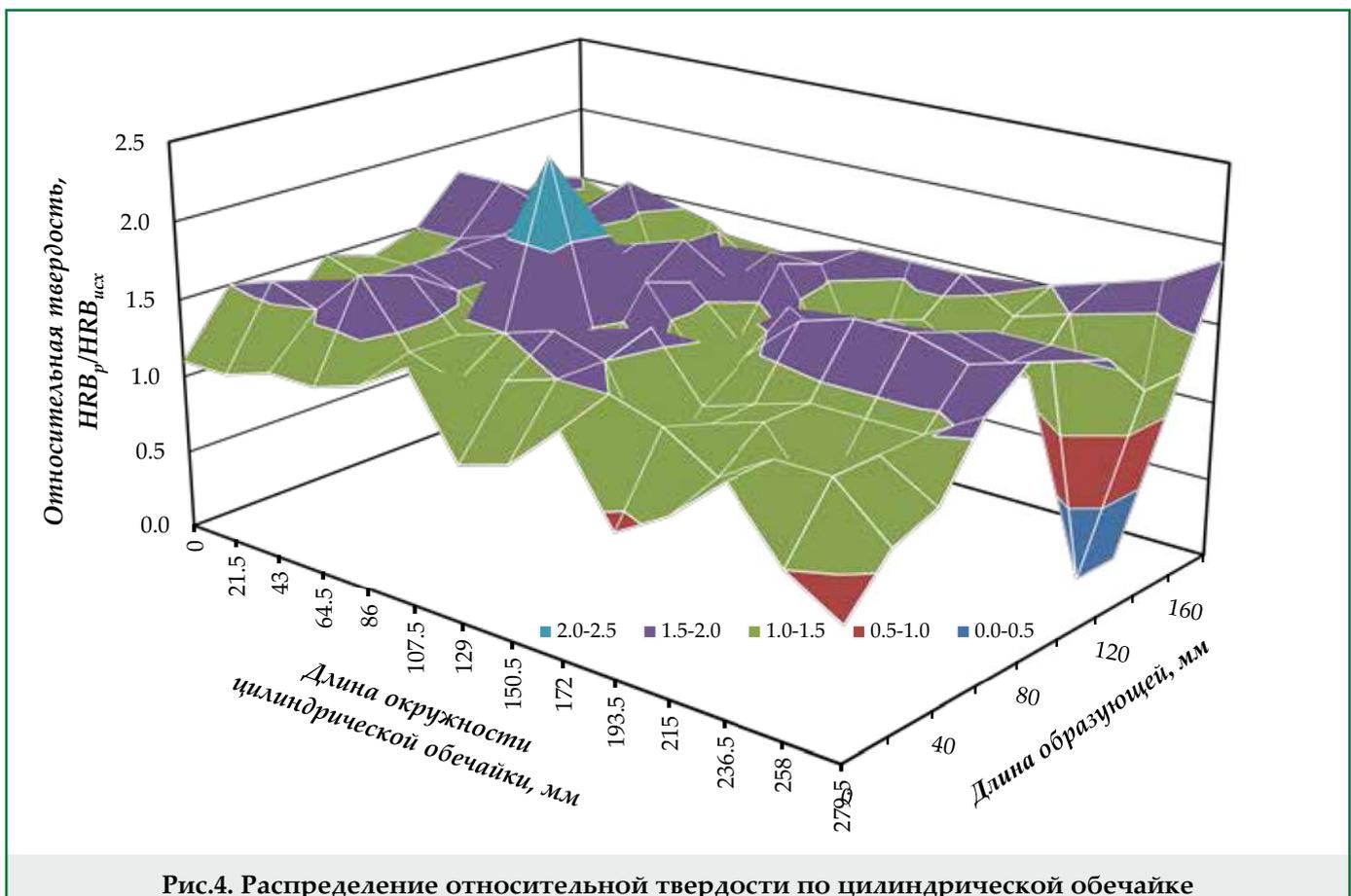
симальные изменения электромагнитных свойств конструкционного материала. Относительное среднее напряжение ($U_{ср.раз}/U_{ср.исх}$) и относительная степень затухания ($\psi_{раз}/\psi_{исх}$) амплитуды отклика электрического сигнала, относительная нормальная составляющая ($H_{n_p}/H_{n_{исх}}$) и относительная тангенциальная составляющая ($H_{t_p}/H_{t_{исх}}$) вектора напряженности постоянного магнитного поля в зоне разрушения оболочковой конструкции имеют экстремальные значения.

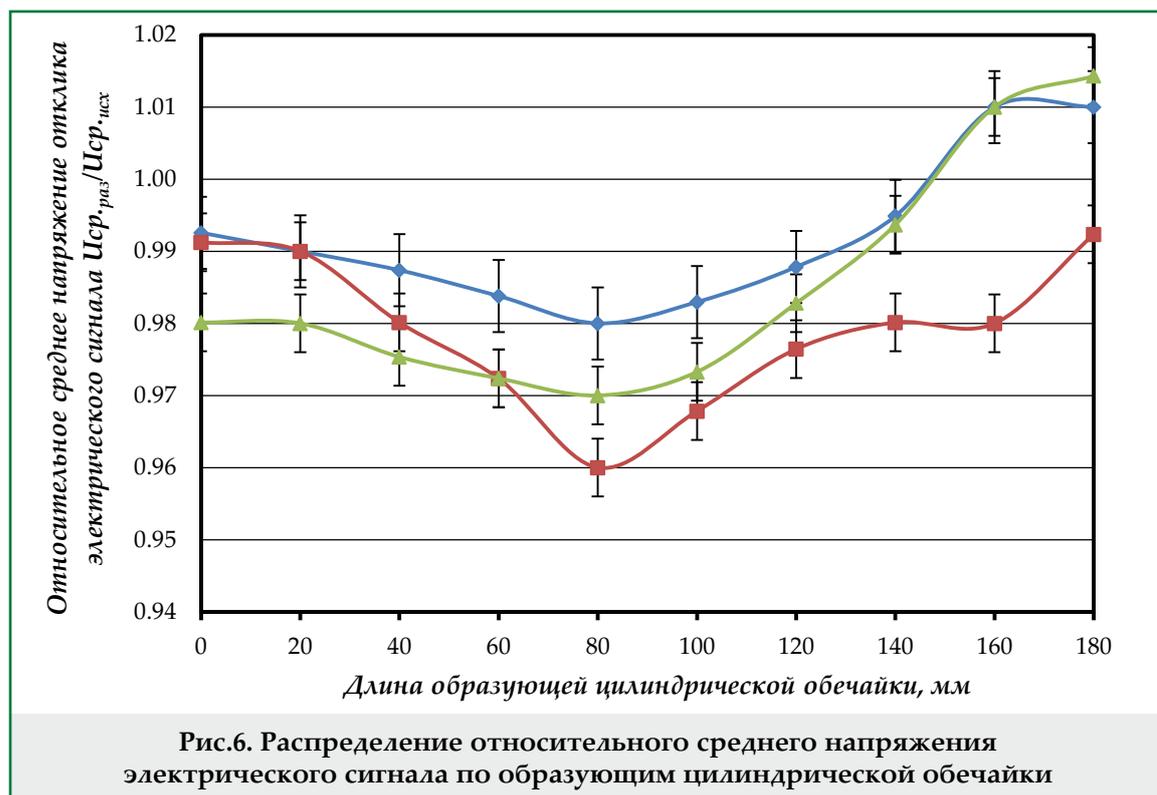
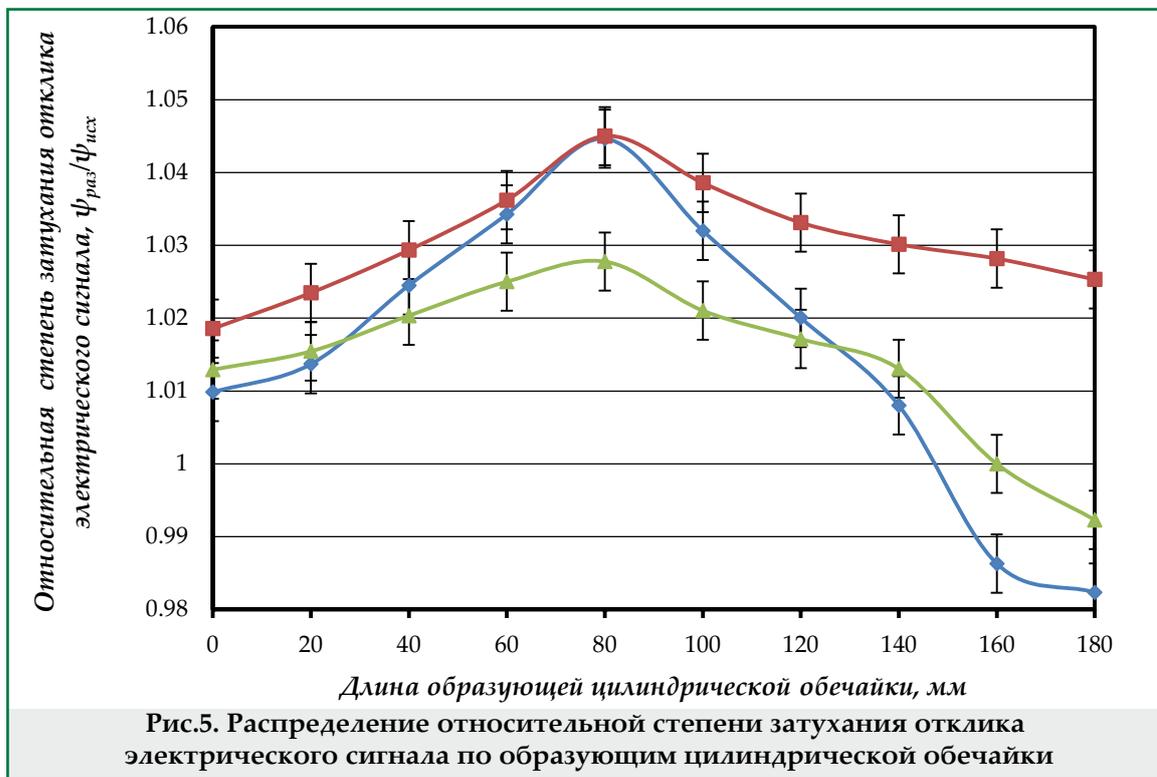
Выводы

Результаты исследования свидетельствуют о том, что изменения механических характеристик и напряжений коррелируют с изменением электромагнитных свойств материала оболочковой конструкции из стали 20 при статическом разрушении. Поэтому по результатам измерения напряженности собственного магнитного поля материала, степени затухания и среднего напряжения отклика электрического сигнала можно установить распределение механических напряжений по цилиндрической обечайке и определить зону потенциально го разрушения оболочковой конструкции.

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

Работа выполнялась в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (Проект №1721, тема «Статическое и динамическое разрушение металлов с модифицированными поверхностными слоями»).





Литература

1. Н.А.Махутов. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 1. Новосибирск: Наука, 2005.
2. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008.
3. А.А.Демченко, М.В.Демченко, А.В.Сисанбаев и др. Взаимосвязь деформационного рельефа поверхности и степени поврежденности стали при малоцикловом нагружении //Химическая физика и мезоскопия. -2012. -Т.14. -№3. -С.426-429.

References

1. N.A.Makhutov. Structural strength, resource and technogenic safety. Part 1. Novosibirsk: Nauka, 2005.
2. GOST P 52857.1-2007. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. General requirements. M.: Standartinform, 2008.
3. A.A.Demchenko, M.V.Demchenko, A.V.Sisanbaev, et al. Relationship deformation relief and degree of damage to steel under low-cycle loading //Chemical Physics and Mesoscopics. -2012. -Vol.14. -№3. -P.426-429.

4. А.А.Демченко, М.В.Демченко, А.В.Сисанбаев, И.Р.Кузеев. Исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали лазерным сканирующим методом // Химическая физика и мезоскопия. -2012. -Т.14. -№4. -С.569-573.

5. А.А.Демченко, М.В.Демченко, А.В.Сисанбаев и др. Исследование взаимосвязи деформационного рельефа и степени поврежденности стали //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2013. -Т.79. -№2. -С.42-44.

6. Дж.Волф. Термодинамика экситонов в полупроводниках. В сборнике «Физика за рубежом». М.: Мир, 1983. -С.125-153.

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

8. И.Р.Кузеев, Е.А.Наумкин, О.Г.Кондрашова. Оценка адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». -2006. -Т.1. -№4. -С.124-133.

9. С.В.Вонсовский, Я.С.Шур. Ферромагнетизм. М.-Л.: ОГИЗ, 1948.

10. R.Becker, W.Doring. Ferromagnetismus. Berlin: Springer Verlag, 1939.

11. С.Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. М.: Мир, 1983.

4. A.A.Demchenko, M.V.Demchenko, A.V.Sisanbaev, I.R.Kuzeev. Research fractal dimension deformation steel surface by laser scanning methods //Chemical Physics and Mesoscopics. -2012. -Vol.14. -No.4. -P.569-573.

5. A.A.Demchenko, M.V.Demchenko, A.V.Sisanbaev, et al. Issledovanie vzaimosvjazi deformacionnogo relefa i stepeni povrejdennosti stali //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. -2013. -T.79. -№2. -S.42-44.

6. J.Wolfe. Thermodynamics of excitons in semiconductors. In the collection «Physics abroad». M.: Mir, 1983. -P 125-153.

7. E.A.Naumkin, T.R. Bikbulatov, M.I. Kuzeev. The estimate of limit state of steel with use parameters of alternating electric signal //Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». -2011. -№5. P.394-399.

8. I.R.Kuzeev, E.A.Naumkin, O.G.Kondrashova. Ocenka adaptivnyh svojstv metalla po izmeneniju ego magnitnyh karakteristik dlja opredelenija resursa bezopasnoj ekspluatatsii neftegazovogo oborudovanija //Elektronniy nauchniy jurnal «Neftegazovoe delo». -2006. -T.1. -№4. -S.124-133.

9. S.V.Vonsovsky, J.S.Shur. Ferromagnetism. M.-L.: OGIZ, 1948

10. R.Becker, W.Doring. Ferromagnetismus. Berlin: Springer Verlag, 1939.

11. S.Chikazumi. Physics of ferromagnetism. Magnetic properties of matter. M.: Mir, 1983.

Generation of the response electromagnetic signal in the process of destruction of shell structures

*I.R.Kuzeev, E.A.Naumkin, A.N.Tepsaev,
A.V.Samigullin, V.A.Gafarova*
(Ufa State Petroleum Technological University)

Abstract

The research is devoted to the problem of preliminary detection of the zone of crack formation under static destruction caused by internal excessive pressure of cylindrical shell. Distribution of continuous magnetic-field vector along the generating line of the cylinder, damping degree and average voltage of electric signal response range were used as the controlling parameters. It was proved that used diagnostic parameters allow predicting the zone of destructing crack formation. Informational content of electric signals is connected with the redistribution of the electron cloud of valence conduction electrons during pore formation process.

Örtük konstruksiyasının dağılması prosesində elektromaqnit siqnalının əks cavabının formalaşması

*İ.R.Kuzeev, E.A.Naumkin, A.N.Tepsaev,
A.V.Samiqullin, V.A.Qafarova*
(Ufa Dölət Neft Texniki Universiteti)

Xülasə

Tədqiqat silindrik örtüyün daxili izafi təzyiqlə statik dağılması zaman çat əmələgəlmə zonasının erkən diaqnostikası probleminə həsr edilmişdir. Təyinedici parametrlər qismində daimi maqnit sahəsinin gərginlik vektorunun silindr əmələ gətirəni boyunca paylanmasından, sönmə dərəcəsiindən, elektrik siqnalının əks cavab amplitudasının orta gərginliyindən istifadə edilmişdir. Göstərilmişdir ki, istifadə edilmiş diaqnostik parametrlər, birmənalı olaraq, dağıdıcı çatın əmələgəlmə zonasını qabaqcadan müəyyən etməyə imkan verir. Elektrik siqnallarının informativliyi məsələ əmələgəlmədə keçiriciliyin valent elektronlarının elektron buludunun yenidən paylanması ilə bağlıdır.