

УДК 621.03.:004.9

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОБОЛОЧКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ
НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**INFLUENCE OF STRESS-STRAIN STATE OF SHELL STRUCTURE ON
MAGNETIC CHARACTERISTICS**

Хайбуллина Л.В., Васильев В.В.

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

L.V. Khajbullina, V.V. Vasilev

FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, the Russian Federation

e-mail: lyubov-khajbullina@yandex.ru

Аннотация. В статье установлено влияние напряженно – деформированного состояния оболочковой конструкции из стали 20 на напряженность постоянного магнитного поля методом магнитной памяти металла (МПМ). Метод МПМ - метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений. Затем в программном комплексе ANSYS, который позволяет решать краевые задачи практически во всех инженерных приложениях, была разработана модель и произведен расчет напряженно-деформированного состояния оболочковой конструкции под действием растяжения при наличии концентратора напряжения для сравнительного анализа распределения напряженности постоянного магнитного поля и механических напряжений. Характер распределения нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля совпадает с распределением напряжения при статическом растяжении по длине окружности оболочки в зоне отверстия, рассчитанной в программном комплексе ANSYS. При этом выявлено, что наличие концентратора напряжения изменяет распределение вектора напряженности постоянного магнитного поля. Минимальное значение напряженности постоянного магнитного поля наблюдается для тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля и вектора результирующей напряженности в зоне отверстия, а для нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля наблюдается максимальное значение напряженности постоянного магнитного поля в зоне отверстия.

Исследования, проведенные в работе, показывают, что изменение напряженно – деформированного состояния оболочки влияет на магнитные характеристики металла, что можно использовать при обследовании оборудования.

Abstract. In this paper, the influence of stress - strain state of the shell structure of steel 20 on the strength of the constant magnetic field by the metal magnetic memory method (MMM). The MMM method - a method of non-destructive testing, based on recording and analyzing the distribution of intrinsic magnetic stray fields (SMPR) on the surface of products with a view to identifying areas of stress concentration, defects , heterogeneous structure of the metal and welds . Then in the program complex ANSYS which allows solving the boundary value problems in almost all engineering applications, a model was developed and calculated the stress-strain state of the shell structure under the action of tensile stress in the presence of stress concentrator for the comparative analysis of the constant magnetic field and mechanical stresses. The distribution pattern of the normal component of the magnetic field vector with the distribution of stresses in static stretching along the length of the circumference of the shell in the area of the hole , calculated in the program complex ANSYS. It is thus revealed that existence of the stress concentrator changes distribution of a vector of intensity of a constant magnetic field. The minimum value of the tension constant magnetic field is observed for the tangential component of the vector of the tension constant magnetic field vector and the resulting tension constant magnetic field in the area of the hole, and for the normal component of the vector of the tension constant magnetic field the maximum value of the tension constant magnetic field in the area of the hole.

The researchers conducted in work show that change is of stress - strain state of the shell structure influences magnetic characteristics of metal that it is possible to use at equipment inspection.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод магнитной памяти металла, напряженность постоянного магнитного поля, оболочковая конструкция, программный комплекс ANSYS, сталь 20.

Key words: stress-strain state, the metal magnetic memory method, tension constant magnetic field, the shell structure, the program complex ANSYS, steel 20.

В целях повышения надежности эксплуатации оборудования необходимо провести оценку ресурса его безопасной эксплуатации. При этом, как известно, неизменным условием является определение фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) с выявлением зон концентрации напряжений (ЗКН). Именно максимальные напряжения в данных зонах определяют работоспособность любой конструкции, а не расчетные, средние значения рабочих напряжений [1].

Для оценки фактического состояния металла нефтегазового оборудования и трубопроводных систем положительно зарекомендовали себя магнитные методы неразрушающего контроля, которые позволяют осуществлять его раннюю диагностику. Установлено, что на основе анализа изменения магнитных свойств материала можно дать оценку напряженно-деформированного состояния металла оборудования [2].

Исследованиям данного направления посвящены работы Дубова А.А., Загидуллина Р.В., Новикова В.Ф., Максимочкина В.И., Мужичко В.Ф., Кондрашовой О.Г., Ключева В.В., Гордиенко В.Е.. В работах показано, что по изменению магнитных параметров можно отслеживать динамику поврежденности материала в условиях эксплуатации. В основном в качестве магнитных характеристик используется коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитная проницаемость, уровень магнитных шумов, напряженность магнитного поля и др. Это говорит о том, что результаты исследований с применением магнитных методов могут быть положены в основу методов оценки напряженно – деформированного состояния оборудования.

В связи с этим в работе проведены исследования влияния напряженно - деформированного состояния оболочковой конструкции стали 20 при растяжении на распределение вектора напряженности постоянного магнитного поля. Напряженно – деформированное состояние создавалось на динамометрической машине ИР 5113-100, изменение напряженности магнитного поля регистрировалось прибором ИКН-2М-8, основанным на методе магнитной памяти металла [3].

В качестве исследуемых оболочек были использованы образцы из трубы диаметром 57 мм, длиной 300 мм, толщиной 3 мм трех типов: без отверстия, с надсверловкой диаметром 2 мм и со сквозным отверстием диаметром 2 мм в количестве 6 штук, по два для каждого вида. Образцы до растяжения показаны на рисунке 1.

Нагружение осуществлялось в упругой области ступенчато с шагом 5 кН и параллельно проводились замеры напряженности магнитного поля по четырем образующим снизу вверх с шагом 10 мм. Анализ напряжённо-деформированного состояния оболочки и определение зон концентраций напряжений (КН) выполнялся на основе результатов контроля, полученных по всем образующим. Зоны КН, как правило, имеют характерное распределение поля H_p , при котором расстояние между экстремальными значениями кратно толщине или диаметру оболочки [3].

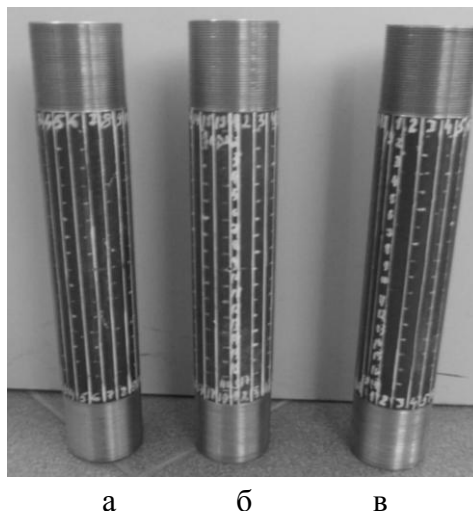


Рисунок 1. Образцы до растяжения

а – образец со сквозным отверстием; б – образец с несквозным отверстием;
в – образец без отверстия

Для образцов с отверстием локальное возрастание напряжений – концентрация напряжений, при действии нормальных напряжений (растяжение или изгиб) определяется отношением [3]:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, возникающее в зоне КН, МПа;

$\sigma_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, МПа, подсчитываемое по формуле:

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где F – нагрузка, приложенная к образцу, Н;

A – площадь поперечного сечения, $A = 502,68 \text{ мм}^2$.

Максимальное напряжение определяется из формулы (1):

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{\text{ном}}. \quad (3)$$

Коэффициенты концентрации напряжений с различными геометрическими характеристиками определяются по номограммам, в данном случае $K_t = 2,5$ [4]. В таблице 1 представлены значения напряжений при изменении нагрузки.

Поскольку в настоящее время оценка НДС оболочковых конструкций проводится по безмоментной теории, в которой учитываются только кольцевые и меридиональные напряжения, распределение всех действующих напряжений определяется без учета реального состояния материала оборудования, которое

может быть скорректировано применением измерения свойств материала существующими приборами неразрушающего контроля. Поэтому перспективным является применение численных методов расчета с целью определения реального НДС при различных уровнях нагрузок исследуемого оборудования.

В работе был проведен расчет напряженно-деформированного состояния оболочки в ПК ANSYS. Вычислительный комплекс ANSYS позволяет решать краевые задачи практически во всех инженерных приложениях. В основе любого расчета на прочность лежит расчетная схема, включающая в себя геометрию конструкции и действующие на нее нагрузки (механические и температурные). В дальнейшем в зависимости от конечных целей расчета, используя те или иные модели материала конструкции, определяются напряжения и деформации элементов конструкции. Затем на основе анализа поля напряжений устанавливается наиболее опасное сечение, при этом используются те или иные гипотезы прочности, а зависимости – от свойств материала и условий работы конструкции [5].

Для моделирования принимался конечный элемент solid185, который используется для моделирования трехмерных объектов [6], в качестве свойств расчетного материала модели по справочной литературе были заданы характеристики стали 20: плотность - 7850 кг/м^3 ; коэффициент Пуассона - 0,3; модуль упругости - $2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. В качестве исходных данных принимались следующие размеры: диаметр 57 мм, длина 300 мм, толщина 3 мм, диаметр отверстия 2 мм. Перед началом расчета были заданы нагрузки и граничные условия в виде ограничения всех перемещений с одного конца и растягивающей нагрузки с другого конца. Результаты максимальных напряжений, рассчитанных по формуле Мизеса в ПК ANSYS, представлены в таблице 1.

Для оценки состояния металла были составлены следующие зависимости:

- распределение нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля, тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля и вектора результирующей напряженности постоянного магнитного поля и максимальных напряжений по формуле Мизеса, полученных численным методом по длине окружности оболочки в зоне отверстия при растягивающей нагрузке $F = 35 \text{ кН}$ (рисунок 2);

- распределение нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля и максимальных напряжений по формуле Мизеса, полученных численным методом по длине окружности оболочки в зоне отверстия при различных нагрузках (рисунок 3).

Анализ графиков показал, что характер распределения нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля по диаметру образца в зоне отверстия, совпадает с распределением максимальных напряжений, рассчитанным в ПК ANSYS по формуле Мизеса (рисунок 2).

При этом было выявлено, что наличие концентратора напряжения изменяет распределение вектора напряженности постоянного магнитного поля.

Причем, для нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля наблюдается максимальное значение напряженности постоянного магнитного поля в зоне отверстия. Для тангенциальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля и вектора результирующей напряженности постоянного магнитного поля наблюдается минимальное значение напряженности постоянного магнитного поля в зоне отверстия, что связано с направлением приложения данных векторов к поверхности [3].

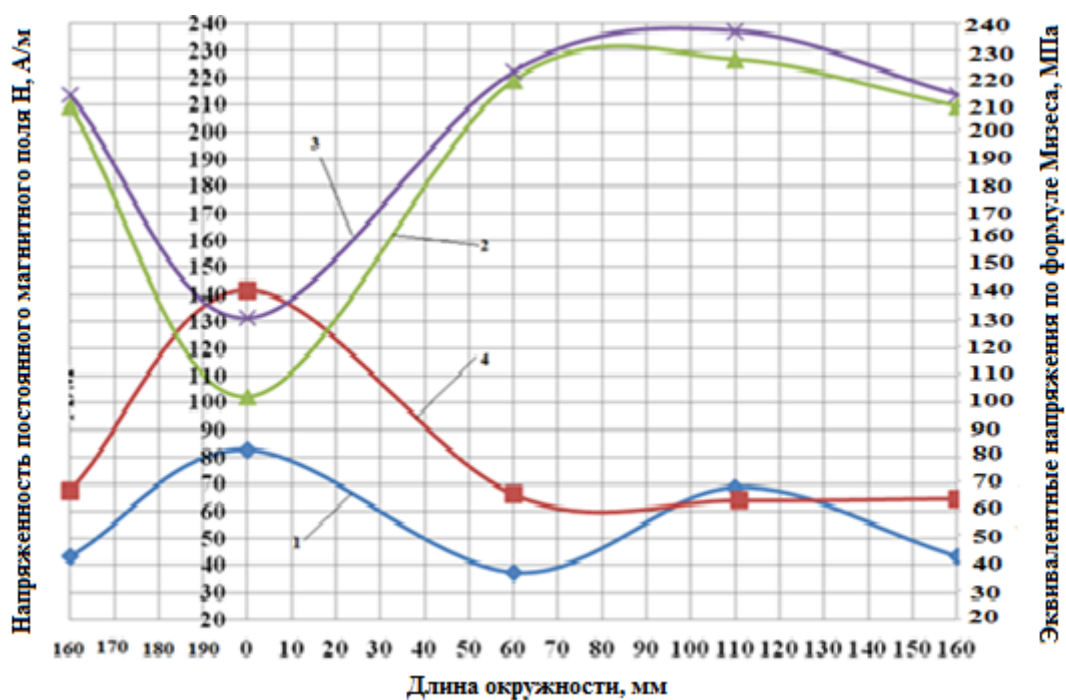


Рисунок 2. Распределение вектора напряженности постоянного магнитного поля и эквивалентных напряжений, рассчитанных по формуле Мизеса в ПК ANSYS
 1 - нормальная составляющая вектора напряженности постоянного магнитного поля; 2 - тангенциальная составляющая вектора напряженности постоянного магнитного поля; 3 - вектор результирующей напряженности постоянного магнитного поля; 4 - распределение эквивалентных напряжений по формуле Мизеса, полученных в ПК ANSYS

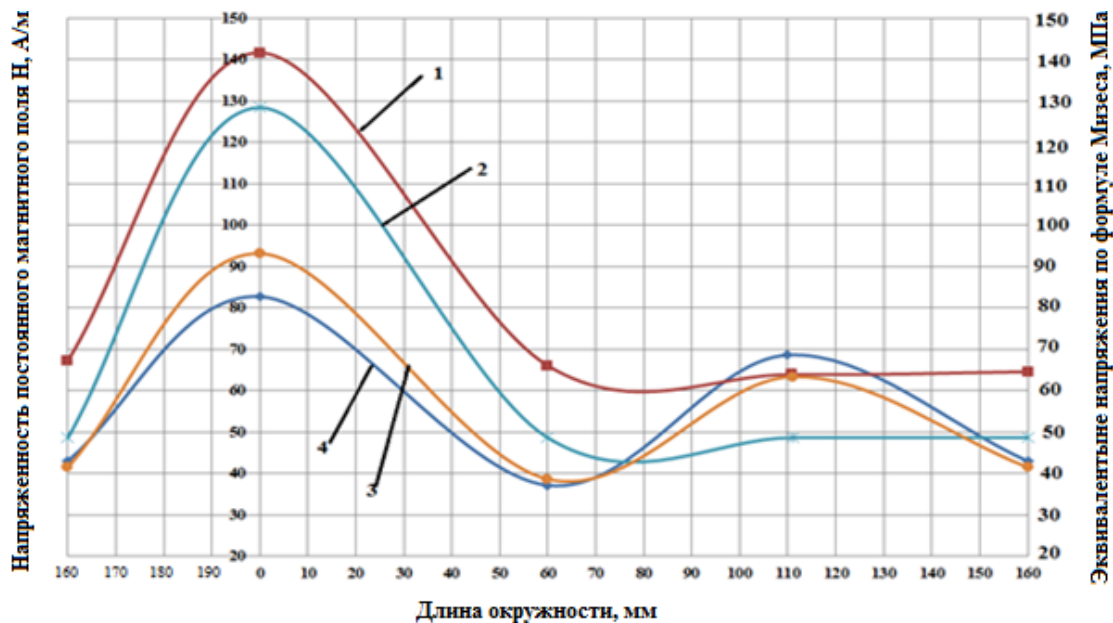


Рисунок 3. Распределение нормальной составляющей вектора напряженности постоянного магнитного поля и распределение эквивалентных напряжений, рассчитанных по формуле Мизеса в ПК ANSYS по длине окружности оболочки в зоне отверстия

- 1 - распределение эквивалентных напряжений по формуле Мизеса, полученных в ПК ANSYS при растягивающей нагрузке $F = 35$ кН;
- 2 - распределение эквивалентных напряжений по формуле Мизеса, полученных в ПК ANSYS при растягивающей нагрузке $F = 25$ кН;
- 3 - нормальная составляющая вектора напряженности постоянного магнитного поля при растягивающей нагрузке $F = 35$ кН;
- 4 - нормальная составляющая вектора напряженности постоянного магнитного поля при растягивающей нагрузке $F = 25$ кН

Таблица 1. Сравнение результатов численного расчета с аналитическим решением

Растягивающие нагрузки F , кН	Номинальные напряжения $\sigma_{\text{ном}}$, МПа, формула (2)	Максимальные напряжения в зоне отверстия, рассчитанные аналитически σ_{max} , МПа, формула (3)	Максимальные напряжения по формуле Мизеса, полученные в ПК ANSYS, МПа	Погрешности численного решения, %
5	9,95	24,87	25,7	3,22
10	19,89	49,73	51,3	3,06
15	29,84	74,60	77,0	3,11
20	39,79	99,47	102,7	3,15
25	49,73	124,33	128,4	3,17
30	59,68	149,20	154,0	3,12
35	69,63	174,07	179,7	3,13

Также анализ показал, что в упругой области при повышении статических нагрузок, прикладываемых к оболочковым конструкциям, напряженность постоянного магнитного поля снижается, что связано с изменением микроструктуры стали при растяжении [7].

Затем проведен сравнительный анализ результатов численного расчета с аналитическим решением (таблица 1). Сравнение значений напряжений, полученных расчетными методами с учетом коэффициентов концентрации напряжений, и рассчитанными в ПК ANSYS показало разницу, в среднем, 3,13 %.

Выводы

Таким образом, проведенные расчеты оболочки на растяжение в ПК ANSYS показали, что наличие концентратора напряжений приводит к увеличению напряжений в материале оболочки и максимальное напряжение фиксируется рядом с отверстием, что нужно учитывать при назначении точек контроля неразрушающими методами и при оценке остаточного ресурса оборудования.

Анализ графиков (рисунки 2,3) показал, что для стали 20 в упругой области при повышении статических нагрузок, прикладываемых к оболочковым конструкциям, напряженность постоянного магнитного поля снижается, что связано с изменением микроструктуры стали при растяжении.

Проведенные в работе исследования показывают связь напряженности постоянного магнитного поля и напряженно-деформированного состояния металла, что можно использовать при обследовании оборудования.

Исследования выполнялись при поддержке лаборатории «Механика твердых, жидких и газообразных сред» Межвузовского Центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс «Недра»» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Список используемых источников

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. М., Машиностроение. 1978. 240с.
2. Кузеев И.Р., Пояркова Е.В., Наумкин Е.А. Влияние усталостной повреждаемости на магнитные характеристики разнородных сварных соединений нефтегазовых трубопроводов// Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. (Курск). 2008. № 5. С. 200-203.
3. Измеритель концентраций напряжений ИКН-2М-8. Паспорт и инструкция по эксплуатации. 2010. 82 с.
4. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.

5. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал. УРСС, 2003. 272 с.
6. Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS. Казань. 2001. 102 с.
7. Гордиенко В. Е. Пассивный феррозондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК. СПб ГАСУ. СПб., 2010.83 с.

References

1. Birger I.A. Tehnicheskaja diagnostika. M., Mashinostroenie.1978, 240 s. [in russian].
2. Kuzeev I.R., Pojarkova E.V., Naumkin E.A. Vlijanie ustalostnoj povrezhdaemosti na magnitnye harakteristiki raznorodnyh svarnyh soedinenij neftegazovyh truboprovodov. Zhurnal nauchnyh publikacij aspirantov i doktorantov.-Kursk, 2008. № 5, S. 200-203. [in russian].
3. Izmeritel' koncentracij naprjazhenij IKN-2M-8. Pasport i instrukcija po jekspluatacii. 2010. 82 s. [in russian].
4. Peterson R. Kojefficienty koncentracii naprjazhenij. M.: Mir, 1977. 302 s.
5. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukah inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo. M.: Editorial URSS, 2003. 272 s. [in russian].
6. Konjuhov A. V. Osnovy analiza konstrukcij v ANSYS. Kazan'. 2001. 102 s. [in russian].
7. Gordienko V. E. Passivnyj ferrozondovyj kontrol' struktury metalla i vnutrennih naprjazhenij v jelementah svarnyh МК; SPbGASU. SPb., 2010. 83 s. [in russian].

Сведения об авторах

Information about author

Хайбуллина Л.В., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудования», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

L.V. Khajbullina, Post-Graduate of the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI of HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Васильев В.В., магистрант кафедры «Технологические машины и оборудования», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.V. Vasilev, Undergraduate of the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI of HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: lyubov-khajbullina@yandex.ru