

УДК 621.644.07

Д.О. Буклешев¹, e-mail: bukleshev_dima@mail.ru; Н.Г. Яговкин¹¹ ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (Самара, Россия).

Математическое моделирование образования напряжений в околошовных зонах газопроводов и их поведения при нагрузках при помощи программного продукта ANSYS

Магистральные газопроводы относят к объектам повышенной опасности – отказы магистральных газопроводов чаще всего связаны с разрывами труб, что может привести к экологическим катастрофам и даже к гибели людей. Кроме того, остановка трубопровода на время ремонта и сам ремонт влекут за собой значительный экономический ущерб. В целях обеспечения безопасности трубопроводы с определенной периодичностью подвергаются замене, что приводит к дополнительным экономическим потерям. Для оптимизации затрат активно проводятся исследования причин отказов магистральных трубопроводов и разрабатываются методы их защиты и продления срока службы. Анализ аварий трубопроводов показывает, что разрушение чаще всего носит местный характер. Причина этого – участки локальной коррозии, а также трещины, образование которых напрямую зависит от зон концентрации напряжений (ЗКН). Определение локальных ЗКН в смонтированном газопроводе является сложной и дорогостоящей операцией. Тем не менее известно, что ЗКН в магистральном газопроводе в большинстве случаев возникают в процессе сварки труб. Поэтому изучение процесса сварки магистральных газопроводов и сопутствующего процесса образования внутренних напряжений является важной задачей для нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: магистральный газопровод, конечно-элементное моделирование, сварной шов, околошовная зона, напряжения, трещина, предел прочности, прочностной анализ.

.....

D.O. Bukleshev¹, e-mail: bukleshev_dima@mail.ru; N.G. Yagovkin¹

¹ Samara state technical university (Samara, Russia).

Mathematical modelling of pressure formation in the weld-affected zones of gas pipelines and its behaviour at loadings by means of the ANSYS software product

Gas-main pipelines are referred to the extra-hazardous facilities. Gas-main pipeline failures are most often connected with pipe breakages that can lead to the ecological collapses and to people death as well. Besides, a pipeline stop for repair time and repair itself inflict high economic damage. For safety, pipelines are subjected to replacement with a certain frequency, which leads to additional economic losses. For cost optimization the research of the reasons of gas-main pipeline failures are more and more actively carried out and methods of their protection and service life extension are developed. The analysis of pipelines failures shows that the destruction most often has a local character. The reason for it is local corrosion and cracks, the formation of which directly depends on the pressure concentration zones (PCZ). Local PCZ identification in the mounted gas pipeline is a difficult and expensive operation. Nevertheless, it is known that PCZ in the gas-main pipeline in most cases arise in the course of pipe welding. Therefore the research of gas-main pipeline welding process and the accompanying process of internal pressure formation is an important task for an oil and gas complex.

Keywords: gas-main pipeline, finite-element modeling, welding seam, weld zone, stresses, crack, limit of ultimate strength, strength analysis.

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЗКН

Для ускорения процесса исследования и сокращения затрат в современном мире используют специальные программы и программные пакеты для проведения инженерных расчетов. Одним из таких пакетов является программный продукт ANSYS.

Программный пакет ANSYS – это система конечно-элементного (КЭ) анализа, которая является одним из мировых лидеров в области инжиниринга с использованием КЭ-моделирования. На сегодняшний день программный продукт ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования и анализа, подходящий для решения задач практически во всех областях современной науки и техники. Данный программный комплекс широко и успешно применяется для решения линейных и нелинейных, стационарных и переходных задач механики деформируемого твердого тела, жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Обладая такой обширной базой, программный продукт ANSYS с легкостью справляется с междисциплинарными задачами. Как раз одной из таких задач является исследование процесса образования ЗКН в процессе сварки магистральных трубопроводов.

Программный продукт ANSYS включает различные модули. Один из них – ANSYS Workbench – представляет собой среду интеграции и унификации модулей программного комплекса ANSYS. Workbench удобен в обращении, а также имеет дружелюбный и интуитивно понятный интерфейс, облегчающий процесс моделирования задач.

Анализ аварий и инцидентов на трубопроводном транспорте показывает, что основными источниками повреждений при эксплуатации магистральных газопроводов являются локальные зоны напряжений – локальная коррозия,

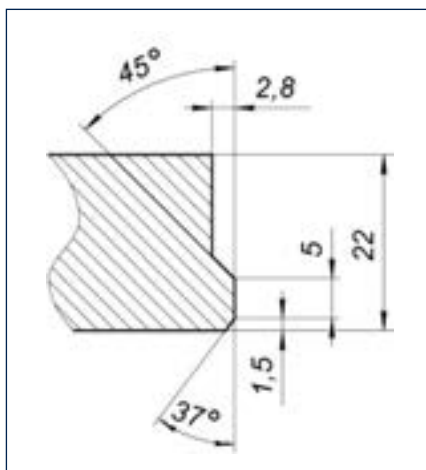


Рис. 1. Разделка торцов магистрального трубопровода под сварку

Fig. 1. Cleaning the ends of pipeline for welding

трещины по принципу коррозионного растрескивания под напряжением [1]. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для исследования процесса образования внутренних напряжений в процессе сварки магистральных трубопроводов одним из наиболее эффективных инструментов КЭ-анализа является программный продукт ANSYS Workbench [2].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашем случае КЭ-моделирование магистрального газопровода осуществляется уже после проведения физических

экспериментов в целях детального изучения картины напряженного состояния сварных соединений магистральных газопроводов.

Для КЭ-моделирования процесса сварки магистральных газопроводов выбран фрагмент трубы диаметром 1420 мм и толщиной стенки 22 мм, включающий сварной шов. Габаритные размеры фрагмента – 250 x 200 мм. Физические и геометрические параметры виртуальной модели соответствуют и реальным значениям. Для создания 3D-модели фрагмента трубопровода использовался специализированный программный продукт «КОМПАС 3D». Также смоделирована разделка кромок трубопровода с корневым и заполняющим швами под автоматическую сварку комплексом CRC-Evans (рис. 1 и 2) [3].

Для обеспечения скорости сварки 375 мм/мин разбиваем 3D-модель сварного шва на 32 равных сегмента [3]. В таком случае получаем, что каждый сегмент будет нагреваться 1 секунду. Чтобы обеспечить удобство закрепления модели фрагмента трубопровода, по углам сделаны небольшие выточки, которые не скажутся на результате анализа, так как находятся на достаточном удалении от сварного шва (рис. 2).

КЭ-моделирование данной задачи в программном продукте ANSYS Workbench начинается с задания



Рис. 2. 3D-модель фрагмента магистрального трубопровода, содержащего сварной шов

Fig. 2. 3D-model of pipeline section containing the weld seam

Ссылка для цитирования (for citation):

Буклешев Д.О., Яговкин Н.Г. Математическое моделирование образования напряжений в околошовных зонах газопроводов и их поведения при нагрузках при помощи программного продукта ANSYS // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 10. С. 88–92.

Bukleshev D.O., Yagovkin N.G. Mathematical modelling of pressure formation in the weld-affected zones of gas pipelines and its behaviour at loadings by means of the ANSYS software product (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 10, P. 88–92.

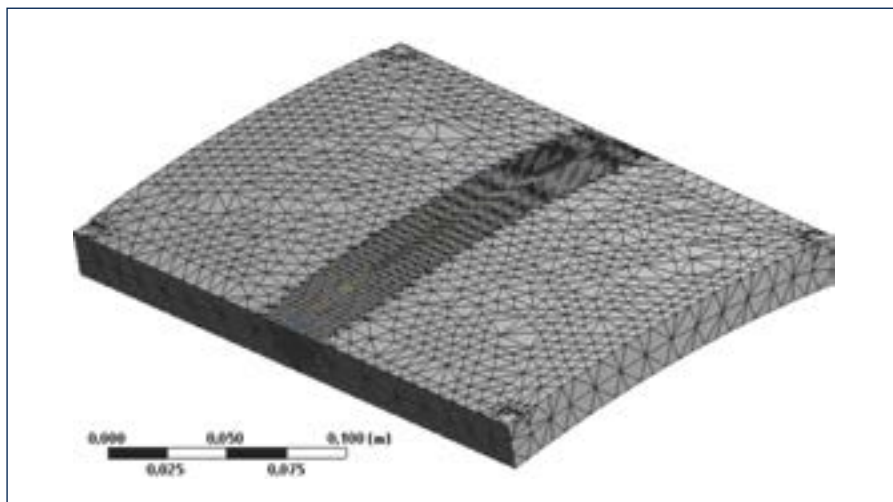


Рис. 3. Сетка конечных элементов фрагмента магистрального трубопровода
Fig. 3. Finite Element Mesh of pipeline section

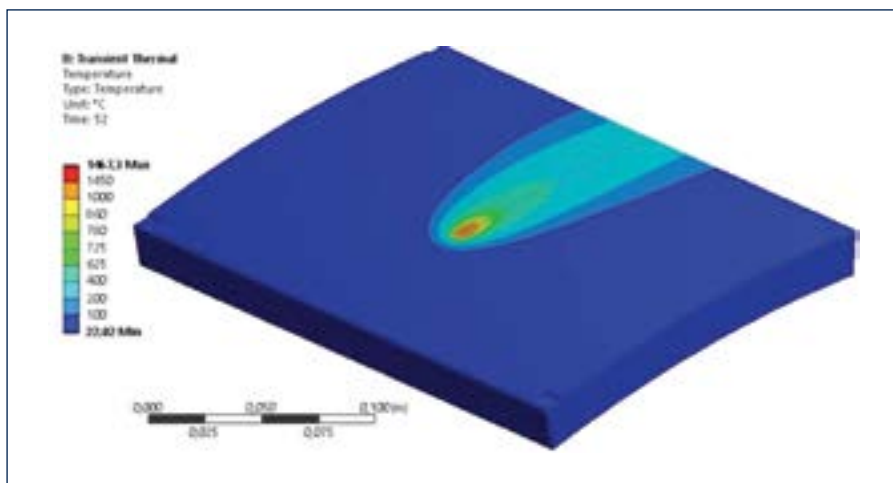


Рис. 4. Распределение температурных полей для времени t = 52 с
Fig. 4. Temperature fields distribution for the time t = 52 sec.

свойств материала в разделе проекта Engineering Data. По умолчанию в ANSYS Workbench автоматически задаются свойства материала среднестатистической конструкционной стали. В нашем случае материал трубопровода – сталь 09ГСФ. Соответственно, предел текучести данного материала равен 353 МПа, предел прочности – 510 МПа, а относительное удлинение – 20 % [4]. Для определения остаточных внутренних напряжений с учетом пластичности материала по вышеприведенным значениям свойств материала строится билинейная диаграмма деформирования.

В разделе проекта Design Modeler производится импорт 3D-модели нашего фрагмента трубопровода. Затем все

элементы 3D-модели «склеиваются» между собой.

КЭ-моделирование процесса сварки состоит из двух последовательных анализов: Transient Thermal и Static Structural.

Transient Thermal – переходный тепловой анализ. На данном этапе к элементам сварного шва прикладывалась плотность мощности энергии, соответствующая выделяемой в процессе сварки. Все элементы нагреваются последовательно, причем сначала моделируется процесс сварки корневого шва, а затем – заполняющего. Каждый элемент сварного шва нагревался в течение 1 секунды, после чего тепловое воздействие снималось и накладывалось на следующий элемент. Плотность мощности энергии,

прикладываемой к элементам сварного шва, рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{0,24\eta_{и} U_{д} I_{д}}{V}, \text{ Вт/м}^3,$$

где 0,24 – тепловой эквивалент; $\eta_{и}$ – эффективный КПД процесса нагрева металла сварочной дугой; $U_{д}$ – напряжение сварочной дуги, В; $I_{д}$ – сварочный ток, А; V – объем нагреваемого материала, м³ [5].

Для автоматической дуговой сварки в нашем случае имеем следующие значения составляющих формулы: $\eta_{и} = 0,8$; $U_{д} = 35$ В; $I_{д} = 500$ А [6]. Поскольку моделируется непосредственный нагрев шва, то в формулу подставляются значения объема элементов: $V_{к} = 1,36 \cdot 10^{-8}$ м³ – для элементов корневого шва, $V_{з} = 4,89 \cdot 10^{-7}$ м³ – для элементов заполняющего шва. Значения объемов элементов определяются посредством инструментов программного продукта «КОМПАС 3D». Соответственно, плотность мощности тепловой энергии для корневого шва равна $W_{к} = 2,47 \cdot 10^{11}$ Вт/м³, для заполняющего $W_{з} = 6,87 \cdot 10^{11}$ Вт/м³. Процесс сварки сопровождается охлаждением поверхностей посредством конвекции. В данном случае осуществляется сварка в среде защитных газов. Коэффициент конвекции при обдувке газом берем 2,1 [7]. Сетка КЭ строится автоматически со средним размером элементов, при этом сварной шов и околошовная зона разбиваются на упорядоченные элементы с максимальным размером 0,5 мм (рис. 3). Процесс решения разбивается на 66 шагов, каждый шаг состоит из 5 подшагов. При этом на 64 первых шагах продолжительностью по 1 секунде производится нагрев, а все оставшееся время занимает охлаждение посредством конвекции. Весь процесс занимает 6 минут.

В результате расчета переходного теплового анализа получаем распределение температурных полей для каждого интервала времени (рис. 4). Изолинии температур не превышают 1530 °С, при том что температура плавления стали приблизительно равна 1450–1500 °С. Полученные температурные поля импортируются в раздел Static Structural – статический прочностной анализ. Для улучшения сходимости решения

разбивка на КЭ, время анализа и шаги задаются такими же, как и в тепловом переходном анализе. Выбор количества подшагов задается автоматически. Закрепление модели жесткое по всему периметру на протяжении 64 секунд, что соответствует состоянию магистрального трубопровода до вырезания из него фрагмента. Далее жесткое закрепление снимается и прикладывается ограничение перемещения одной грани по оси X и одной – по Y. Проточки, сделанные на модели, закрепляются по оси Z. Таким образом, моделируется закрепление фрагмента трубопровода на универсальной испытательной машине. На последнем шаге решения моделируется исследование на универсальной испытательной машине. К фрагменту газопровода прикладывается сила, распределенная по площади квадратной формы 20 x 20 мм и направленная от центра трубопровода. Прикладываемая сила возрастает линейно в течение 1 секунды до значения 200 кН. Сила прикладывается в области околошовной зоны, как и при эксперименте на универсальной испытательной машине [1].

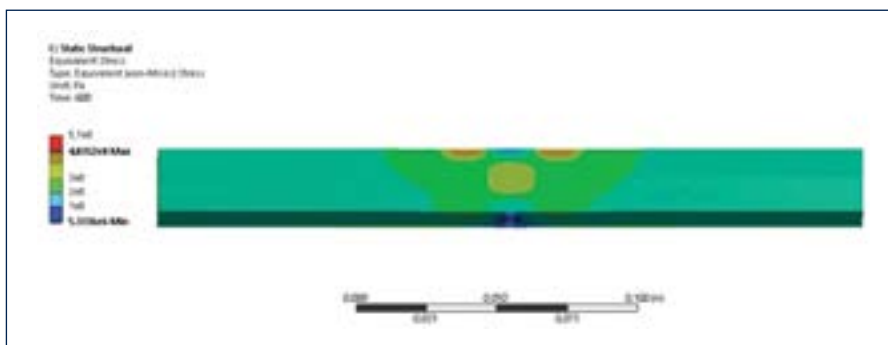


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по Мизесу в разрезе фрагмента магистрального трубопровода в момент времени $t = 600$ с

Fig. 5. Mises equivalent stresses in pipeline sectional fragment at the moment of time $t = 600$ sec.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В итоге статического прочностного анализа получаем изолинии эквивалентных напряжений по теории напряженности Мизеса. Поскольку напряжения по Мизесу носят эквивалентный характер, их нельзя разделить на напряжения растяжения или сжатия.

Предел прочности стали 09ГСФ равен 510 МПа. При превышении данного значения начинается критическое разрушение металла и образование трещины с последующим ее ростом.

На рис. 5 представлены изолинии напряжений по Мизесу в момент времени $t = 600$ с. Это время соответствует состоянию фрагмента магистрального газопровода, остывшего и вырезанного из трубопровода.

Таким образом, напряжения по Мизесу в фрагменте трубопровода, обусловленные тепловым воздействием, не превосходят предела прочности материала газопровода. Из рисунка видно, что максимальные значения имеют напряжения в околошовной зоне.

ВНИМАНИЕ!

Открыта подписка на журналы «ТЕРРИТОРИЯ «НЕФТЕГАЗ» и «КОРРОЗИЯ «ТЕРРИТОРИИ «НЕФТЕГАЗ»!

Журналы можно получать в России и в любой стране мира.

Подписка оформляется с любого месяца!

ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ ВЫ МОЖЕТЕ:

- в редакции – по адресу 142784, г. Москва, Киевское ш., БП «Румянцево», корп. Б, под. 5, эт. 5, оф. 505Б, издательство «Камелот Паблишинг», редакция журнала «Территория «НЕФТЕГАЗ», Тел./факс: +7 (495) 240-54-57, e-mail: info@neftegas.info
- по каталогу Роспечати – подписной индекс 36129

СТОИМОСТЬ ПОДПИСКИ

по России:

для стран СНГ:

(печатной версии) (в электронной версии) (в печатной версии)

1 номер любого журнала	2200 руб.	1900 руб.	2400 руб.
6 номеров ТНГ	13200 руб.	11400 руб.	14400 руб.
12 номеров ТНГ	26400 руб.	22800 руб.	28800 руб.
15 номеров ТНГ+КТНГ	33000 руб.	28500 руб.	36000 руб.



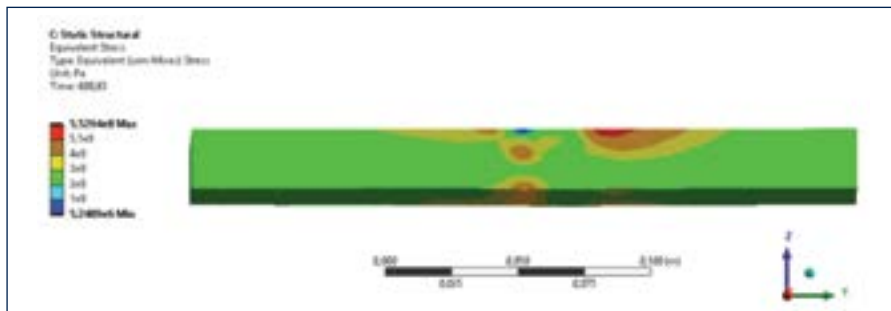


Рис. 6. Эквивалентные напряжения по Мизесу в разрезе фрагмента магистрального трубопровода под нагрузкой в момент времени $t = 600,63$ с

Fig. 6. Mises equivalent stresses in pipeline sectional fragment under the load at the moment of time $t = 600.63$ sec.

К тому же эти напряжения расположены на поверхности трубопровода. Часто магистральные трубопроводы прокладывают в агрессивных средах. Поэтому повышенные значения напряжений способствуют преждевременному выходу трубопровода из строя за счет увеличения скорости разрушения металла посредством коррозии.

На рис. 6 представлены изолинии напряжений по Мизесу для фрагмента трубопровода под нагрузкой на универсальной испытательной машине. Изолинии показаны для времени $t = 600,63$ с. На этом значении времени напряжения по Мизесу превысили предел прочности. Следовательно, в этот момент на физической модели

произошло бы разрушение материала и образовалась трещина. Превышение предела прочности произошло в околошовной зоне в зоне действия накопленного универсальной испытательной машины, как и образование трещины при испытании реального фрагмента магистрального трубопровода [1].

Сила давления универсальной испытательной машины прикладывается линейно на протяжении 1 секунды, поэтому можно определить силу, при которой произошло разрушение в материале, т. е. образование дефекта. Таким дефектом является продольная трещина в околошовной зоне:

$$F = 0,63 \cdot 200 = 126 \text{ кН.}$$

При проведении эксперимента на реальном фрагменте трубопровода трещина появилась при 120 кН [1].

Относительная погрешность результатов, полученных с помощью программного продукта ANSYS Workbench, составила 5 %. Это обусловлено тем, что при математическом моделировании берутся идеальные условия. На практике же существует неоднородность структуры и свойств металла, а также другие случайные факторы.

ВЫВОДЫ

При разработке КЭ-модели процесса сварки магистральных трубопроводов получена картина изолиний напряжений для сварного шва и околошовной зоны. Анализ расположения изолиний показал, что наиболее опасные участки концентрации напряжений располагаются в околошовной зоне. Расчет КЭ-моделирования приложения силы к околошовной зоне показал образование трещины на поверхности материала при достижении значения $F = 126$ кН. Расчетная величина силы, приводящей к разрушению металла трубопровода, больше фактической на 6 кН. Наиболее высокая величина напряжений в околошовной зоне наблюдается вблизи сварного шва, что может привести к образованию дефектов при нагрузке.

Литература:

1. Буклешев Д.О. Образование дефектов в околошовных зонах сварных стыков магистральных газопроводов при воздействии рабочих нагрузок // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. 2016. № 1 (53). С. 2–5.
2. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособ. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.: ил.
3. Мустафин Ф.М., Блехерова Н.Г., Квятковский О.П. и др. Сварка трубопроводов: Учеб. пособие. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 350 с.
4. Беккерев И.В. Металлы и сплавы. Ч. 2: Марки, химический состав. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 630 с.
5. Матюхин В.И., Корытов М.С. Оборудование и технология монтажной сварки мостовых конструкций: Курс лекций для специальности «Мосты и транспортные тоннели». Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. 80 с.
6. Наумов В.Г. Сварка в среде защитных газов. М.: Госстройиздат, 1961. 224 с.
7. Горяинов Д.С., Балакиров С.Н., Гусев А.А. Моделирование и исследование процесса лазерной сварки стали У10А // Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы трибологии». Самара, 2015. С. 153–156.

References:

1. Bukleshev D.O. Formation of defects in the heat-affected zones of welded joints of the main gas pipelines under the influence of workloads. *Truboprovodnyy transport [teoriya i praktika] = Pipelines [Theory and Practice]*, 2016, No. 1 (53), P. 2–5. (In Russian)
2. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldatov Ye.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.Ye. *Engineering analysis in Ansys Workbench. Manual*, Samara State Technical University, 2010, 271 pp. with ill. (In Russian)
3. Mustafin F.M., Blekherova N.G., Kvyatkovskiy O.P. and etc. *Pipelines welding. Manual*, Moscow, Nedra-Businesscenter LLC, 2002, 350 pp. (In Russian)
4. Bekkerov I.V. *Metals and alloys. Part. 2: Grades and chemical composition*. Ulyanovsk, UlGTU, 2007, 630 pp. (In Russian)
5. Matyuhin V.I., Ritov M.S. *Equipment and technology of on-site welding of bridge structures: Lectures for the speciality «Bridges and transport tunnels»*. Omsk, Publishing house SibADI, 2006, 80 pp. (In Russian)
6. Naumov V.G. *Welding in protective gases*. Moscow, Gosstroizdat, 1961, 224 pp. (In Russian)
7. Goryainov D.S., Balakirov S.N., Gusev A.A. *Simulation and research of the laser welding process of U10A steel*. Proceedings of the International scientific-technical conference «Actual problems of tribology». Samara, 2015, P. 153–156. (In Russian)