

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное
 учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 130501.65 «Надежность нефтепроводов и газонефтехранилищ»
 Кафедра Транспорта и хранения нефти и газа

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема
Исследование напряженно-деформированного состояния нефтепровода при наличии дефектов

УДК 622.692.4:620.19:539.376-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	Тафинцев Д.С.		01.06.17

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Веревкин А.В.	к.т.н., доцент		01.06.17

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Шарф И.В.	к.э.н., доцент		01.06.17

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
доцент	Маланова Н.В.	к.т.н.,		01.06.17

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТХНГ	Бурков П.В.	к.т.н., доцент		01.06.17

Томск – 2017 г.

Оглавление

Введение	4
1. Характеристика линейного участка.....	6
2. Характеристика объекта исследования.	7
2.1. Типы трубопроводов.	7
2.2. Виды дефектов трубопроводов.	14
3. Особенности эксплуатационного разрушения нефтепровода.	23
3.1. Инженерные методы оценки сопротивления нефтепроводов разрушению.....	25
4. Исследование напряженно-деформированного состояния	27
линейной части магистрального нефтепровода.	27
4.1. Программы и возможности конечно-элементного анализа.	27
4.2. Создание расчетной модели нефтепровода.	34
4.3. Тест программы.	37
4.4. Результаты расчета модели нефтепровода.....	38
5. Оценка прочности и устойчивости нефтепровода.	41
5.1. Определение толщины стенки нефтепровода.	42
5.2. Проверка на прочность в продольном направлении.....	44
5.3. Проверка на предотвращение недопустимых пластических деформаций.	45
5.4. Проверка общей устойчивости нефтепровода в продольном направлении.	46
Заключение	51
Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review.....	53
1 Introduction	53
2 FEA in Magnetic Flux Leakage NDT	56
2.1 Static MFL.....	56
2.2 MFL(V): Velocity Effects	59
2.3 MFL(f): Frequency Effects	61
3.1 Methods Involving Electromagnetic Waves.....	68
3.2 ENDT Involving Static Electric Potential	69
3.3 Passive MFL (MMM)	70

3.4	Research Trends.....	71
3.5	Solutions of Inverse Problems.....	72
3.6	Perspectives of Further Research.....	74

Введение

Магистральные нефтепроводы (МН) включают в себя различные сооружения, такие как линейная часть, нефтеперекачивающая станция, резервуарные парки. Так же линейная часть МН имеет протяженность тысячи километров, тем самым проходит в различных климатических и гидрогеологических условиях, пересекает множество искусственных и естественных преград.

На данный момент Россия имеет надежную систему трубопроводного транспорта для нефти, газа и продуктов их переработки и самую протяженную в мире, но с другой стороны, системы трубопроводного транспорта не подвергались каким-либо модернизациям в течении последних лет и состояния некоторых систем оставляет желать лучшего.

Для оценки прочности и дальнейшей оценки остаточного ресурса трубопроводных систем, нам необходимо, знать развивающийся уровень эксплуатационных напряжений и деформаций в нефтепроводе. Информация о НДС является ключевой для анализа прочности и долговечности элементов конструкций, в том числе систем трубопроводного транспорта. Исходя из этого, следует что, для правильности оценки работоспособности любой системы, в первую очередь зависит от точности информации о напряженно-деформированном состоянии данной системы. Анализ НДС реально существующих конструкций с механической разновидностью, и со сложной геометрической формой, возможно осуществить только при помощи численных методов.

В качестве метода исследования НДС нефтепровода используем аналитический метод, а также метод конечных элементов (МКЭ). Метод конечных элементов лишен недостатков присущих другим численным методам, которые используются для расчета НДС. Данный метод можно использовать независимо от геометрии исследуемой области. Поэтому когда создаем универсальный метод расчета НДС, не ориентированный на конкретный класс конструкции или вид

нагрузки, МКЭ обладает бесспорным преимуществом по отношению к альтернативным численным методам. Для решения типовых задач по исследованию НДС нефтепровода будем использовать пакет ANSYS, с помощью которого осуществляется моделирование необходимого нам нефтепровода.

Из выше изложенного следует, что задача, оценка прочности и ресурса трубопроводных систем при наличии дефектов, актуальна на данный момент.

1. Характеристика линейного участка

МН “Александровское-Анжеро-Судженск”.

Линейный участок МН “Александровское-Анжеро-Судженск” 259-379км расположен в Каргасокском районе Томской области и эксплуатируется ЛЭС “Каргасок” с 1972г.

Большую часть участка МН составляет трубопровода диаметром 1220мм с толщиной стенки $\delta=12\div 19,1$ мм, а с 318 по 329 км диаметр трубопровода равен 1020мм с толщиной стенки $\delta=13,5\div 16$ мм.

Таблица 1.1

Пропускная способность нефтепровода

Год	Пропускная способность, млн. т/год		Загрузка МН, %				Плотность при 20°C, кг/м ³		
	По проекту	Фактическая	кварталы				Проектная	макс	мин
			1	2	3	4			
2006	55,5	38,5	79	75,5	90,2	90,2	839	831	
2007	55,5	48,9	70,2	71	74,9	68			
2008	55,5	49,2	77,2	78,3	80	79,2	849,1	820,4	

На своем протяжении участок МН “Александровское-Анжеро-Судженск” пересекает различные преграды в виде рек, автомобильных дорог, озер, болот.

Рассматриваемый участок МН находится на 318-329 км, диаметр нефтепровода 1020 мм, выполнен из стали 17Г1С прямошовный (ЧТПЗ ЧМТУ 1-655-69).

2. Характеристика объекта исследования.

2.1. Типы трубопроводов.

Стальные трубы являются основным видом труб для нефтепроводов. Благодаря улучшению технологии их изготовления и введения в нее всевозможных испытаний, например, 100% неразрушающий контроль качества сварных швов и металла, были достигнуты такие свойства как большая несущая способность, высокая стабильность технологических и механических, что позволило достаточно сильно увеличить надежность и долговечность труб.

Раскисление сталей является одним из самых существенных факторов металлургического производства, влияющих на их качество. Раскислением сталей называют снижение концентрации растворенного в них кислорода. Снижение концентрации достигается путем внедрения в жидкую сталь раскислителей - элементов, которые реагируют с кислородом: марганца, алюминия, кремния и т.д. В итоге их взаимодействия образуются неметаллические включения, удаляющиеся из стали при технологическом процессе. [17].

Спокойной (СП) называют хорошо раскисленную сталь. Такая сталь содержит не более 0,003% кислорода.

Еще один вид стали – кипящая сталь (КП). Здесь содержание кислорода увеличивается до 0,025 – 0,035%. Это достигается путем введения по ходу плавки только марганца (без применения кремния и других раскислителей) при выплавке. Производство кипящей стали дешевле чем спокойной, но при этом её свойства хуже. Применяют кипящую сталь чаще всего для конструкций с ненагруженными элементами.

Кроме спокойных и кипящих есть еще и полуспокойные стали (ПС), занимающие промежуточные положения между спокойной и кипящей сталями по

технологии выплавки и разливки.

По структуре слиток полуспокойной стали больше похож на слиток спокойной стали. Содержание в ней кислорода до 0,012 %.

С помощью химического состава сталей определяют качество и свойства труб, а также техническую и экономическую полезность их применения.

Если известен химический состав стали, то можно ориентировочно оценить её свариваемость, при этом учитывая, что углерод, в сравнении с другими элементами, значительно ухудшает свариваемость. Свариваемость можно оценить посредством углеродного эквивалента C_0 , причём его значение должно быть ниже 0,46 %. Углеродный эквивалент для каждой стали определяется вычислительным путем по разным формулам:

- для углеродистых сталей (а также для низколегированных кремнемарганцевых - 17ГС, 17Г1С, 09Г2С и др.)

$$C_0 = C + \frac{Mn}{6}$$

- для низколегированных

$$C_0 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V + Ti + Nb}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} + B$$

где С, Cr, Mn, V, Mo, Ti, Nb, Ni, Cu, B - содержание углерода, хрома, марганца, ванадия, молибдена, титана, ниобия, никеля, меди, бора соответственно в % массы в составе металла трубной стали.

По химическому составу стали делятся на две группы: углеродистые и легированные.

Легированная сталь – это сталь, в составе которой помимо обычных примесей содержатся специальные легирующие элементы, вводимые в определенных комбинациях (молибден, никель, хром, вольфрам, алюминий, ванадий, титан и т.д.), а также кремний и марганец в количествах, которые намного больше их обычного содержания (1 % и выше).

Легированную сталь в зависимости от содержания в ней легирующих элементов можно разделить на:

1. низколегированную (не более 2,5 %)
2. высоколегированную (свыше 10 %).

Поставляться сталь может в следующих состояниях: ковальной, горячекатаной, нагартованной и термически обработанной.

Углеродистую сталь в зависимости от содержания в ней углерода можно разделить на:

1. низкоуглеродистую (менее 0,25 %)
2. среднеуглеродистую (0,25 - 0,6 %)
3. высокоуглеродистую (0,6-2%).

Углеродистая сталь может делиться еще на следующие группы, используемые для строительных конструкций и деталей машин:

- углеродистая сталь обыкновенного качества (группы А, Б и В в горячекатаном состоянии);

Маркируется эта сталь следующим образом: группа (А, Б и В), затем маркировка (Ст), затем условный номер (от 0 до 6), увеличение которого указывает на повышение прочности и уменьшение пластичности, затем степень раскисления и категория по гарантируемым характеристикам.

Примечание: если в составе стали повышенное содержание марганца, то в марку стали вводится буква Г.

Применение: группа А - для несварных нагруженных деталей машин и конструкций; группа Б - для кованных, термически обрабатываемых, сварных и других неотчетственных деталей машин и конструкций; группа В — для сварных ответственных строительных конструкций.

- сталь углеродистая качественная конструкционная (в горячекатаном и кованом состоянии);

Качественная конструкционная углеродистая сталь поставляется в виде

листового и полосового проката из кованой и горячекатаной стали следующих марок: спокойная — 08, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 70Г; кипящая и полуспокойная — 05кп, 08кп, 10пс, 10кп, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс.

Двузначное число в марке указывает на среднее количество углерода, которое содержит сталь.

Применение: чем больше номер у стали, тем больше содержится углерода, а значит увеличивается прочность. Такие стали применяют для более ответственных деталей. Например, сталь марок 05, 08, 10 – это сталь с маленьким содержанием углерода, её применяют для производства лент, проволоки, листов и неответственных конструкций, а сталь марок 10, 15, 20 и 25 - для бесшовных горячекатаных труб диаметром до 500 мм, а также муфт, поршней насосов и др. Из стали марок 30, 35 изготавливают вертлюги, стропы, талевые блоки, крюки и т.д., а из стали марок 40 и 45 — муфты, валы насосов, шестерни и т.д.

- сталь углеродистая обыкновенного качества термически упрочненная.

Изготавливается из углеродистой стали обыкновенного качества путем закалки (до 930-950 °С) и отпуска. В этом случае в марке стали добавляется буква Т., например, БСтЗТсп2.

Низколегированная конструкционная сталь применяется для изготовления и ремонта газгольдеров, резервуаров, газонефтепроводов. Она имеет ряд преимуществ перед углеродистой сталью обыкновенного качества: её предел текучести более чем на 50 % выше, склонность к хладноломкости и чувствительность к старению меньше, она лучше сваривается, её коррозионная стойкость в 1,5 раза выше.

Марки легированных сталей отличаются большим разнообразием. Обозначается каждая марка стали конкретными буквами, которые соответствуют определенным элементам по классификации металлургического производства. Все элементы по их процентному содержанию в стали делятся на несколько групп:

1. первая Г — марганец, Х — хром, Н — никель и С — кремний. Цифирные

обозначения после этих букв показывают процент содержания данного элемента в стали (при отсутствии цифр содержание элемента менее 1 %). Пример: 09Г2, 14ХГС и др.

2. вторая Т – титан, Ц — цирконий, Ф — ванадий. И — фосфор, Ю — алюминий, Ч - редкоземельные металлы, Д - медь, М - молибден. Медь и молибден содержатся примерно в количестве до 0,6 %, остальные элементы этой группы до 0,2 %.

3. третья Л — азот (до 0,015 %), Б — ниобий (до 0,05 %).

4. четвертая Р — бор, (до 0,006 %).

Процентное содержание углерода в стали показывают цифры, стоящие перед маркой. Пример: марка стали 09Г2С, значит сталь содержит 0,09 % углерода, 2 % марганца и около 1 % кремния.

Получение низколегированной стали высокой прочности происходит посредством нормализации, закалки или микролегирования, т.е. внедрения в незначительных количествах карбидообразующих элементов, таких как ванадий, ниобий и др.

Трубы по способу изготовления разделяются на горячекатаные и сварные с продольным прямым швом, спиральным швом, бесшовные, многослойные и т.д.

По назначению и гарантируемым характеристикам стальные трубы поставляются по группам А, Б, В, Г и Д. У каждой из этих групп есть свои определенные гарантируемые характеристики: У группы А — механические свойства; у группы Б — химический состав; у группы В — механические свойства и химический состав; у группы Г — контроль механических свойств на термически обработанных образцах и химический состав; а прочность при испытании гидравлическим давлением имеют все группы.

Наличие тех или иных характеристик у каждой из групп представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Гарантируемые характеристики трубных сталей

--	--

Гарантируемые характеристики	Группа				
	А	Б	В	Г	Д
Химический состав	-	+	+	+	-
Механические свойства	+	-	+	Контроль за механическими свойствами на термически обработанных образцах	-
Прочность при гидравлических испытаниях	+	+	+	+	+

При строительстве магистральных трубопроводов применяются электросварные прямошовные, спиральношовные, стальные бесшовные трубы и трубы других специальных конструкций. Трубы, диаметр которых менее 500 мм изготавливают из спокойных и полуспокойных углеродистых сталей; менее 1020 мм - из спокойных и полуспокойных низколегированных сталей, менее 1420 мм – из низколегированных сталей в термически или термомеханически упрочненном состоянии [17].

Для каждой трубы существует ГОСТ, в соответствии с которым их следует применять. Например, для бесшовных труб это ГОСТ 8731-74, ГОСТ 8732-78 и ГОСТ 8733-74; для стальных электросварных прямошовных труб это ГОСТ 10704-91 и т.д.

Бесшовные горячекатаные трубы изготавливаются в два этапа: изготовление заготовки трубы в виде прошитой гильзы (стакана); формирование трубы горячей прокаткой до заданной формы и размеров.

Изготовление сварных прямошовных труб диаметром 500 - 1400 мм осуществляется прессованием или вальцеванием (гибкой) из листовой заготовки. Трубы, диаметр которых больше или равен 1000 мм собирают из двух полуцилиндрических заготовок, сформированных на тех же гидравлических прессах, абсолютно так же, как и цилиндрические заготовки, меняя только формирующий инструмент, а листы подготавливают прежним способом.

Спиральношовные трубы производят путем сворачивания стальной рулонной ленты по спирали в непрерывную трубу. Спиральношовные трубы мелких (до 500 мм) и средних (500-800 мм) диаметров формуют с двухсторонним сварным швом на специальном трубном стане, который включает в себя линию подготовки полосы и формовочно-сварочное устройство, в котором сварочные головки и формовочная машина смонтированы вместе.

Спиральношовные трубы дешевле чем прямошовные, потому что стальная лента на 20-35 % дешевле чем широколиствая сталь. Так же благодаря снижению расхода металла на обрезку после прокатки, уменьшения допусков по толщине и отходов при обрезке концов труб примерно на 10% происходит его экономия. Спиральный шов способствует ужесточению трубы и лучшему сохранению цилиндрической формы при транспортировке. Следует заметить, что работоспособность металла повышается вследствие того, что при эксплуатации трубопровода из спиральношовных труб главные напряжения располагаются под углом к направлению прокатки ленты.

Спиральношовные трубы превосходят прямошовные еще потому, что металл труб в процессе их изготовления практически не меняет свои пластические и вязкие свойства, а сам процесс изготовления труб свободно поддается автоматизации и механизации. Помимо этого, металл, из которого сделаны спиральношовные трубы, так как волокна его катаной структуры направлены под углом навивки к продольной оси трубы, работает в более благоприятных условиях, чем металл прямошовных

труб.

Но есть и то, в чем спиральношовные трубы уступают прямошовным. Их недостатком считают большую протяженность сварных швов, а потому их нельзя гнуть, они плохо копируют местность.

Дефекты технологического, строительного и металлургического характера, которые повышают склонность металла к хрупкому разрушению, могут способствовать ослаблению толщины стенки труб, пропорционально которому снижается несущая способность металла [25].

Существуют разные исполнения труб, в зависимости от климатических условий, в которых происходит строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов.

Для трубопроводов, которые прокладывают в средней полосе и южных районах России с характерной температурой эксплуатации от 0 °С и выше и температура строительства - 40 ° и выше, трубы изготавливают в *обычном исполнении*. Трубы, температура эксплуатации для которых принимается от -20 до -40 °С, а температура строительства - 60 °С и выше, изготавливают в *северном исполнении*.

Температура эксплуатации — это минимальная температура стенок труб при эксплуатации под рабочим давлением; температурой строительства называют температуру стенок труб или воздуха, определяемую в соответствии со СНиП по строительной климатологии и геофизике при остановке нефтепровода или монтажно-строительных работах.

2.2. Виды дефектов трубопроводов.

Согласно РД-23.040.00-КТН-090-07 дефектом нефтепровода называется каждое отдельное несоответствие нормативным документам. Сварные швы, стенки, геометрические формы труб, конструктивные и соединительные детали, приварные

элементы, которые не соответствуют нормативным документам, являются дефектами.

Секция, выполненная с дефектами, должна быть отремонтирована соответственно взаимному расположению всех имеющихся дефектов, которые подлежат ремонту и согласно методам и ограничениям. Дефектными секциями, которые ремонтируются только вырезкой, считаются секции с коррозионными повреждениями и секции с двумя муфтами (тройниками), кроме случая, когда две муфты установлены на сварные стыки между секцией и муфтой (тройником) по телу трубы.

По отраслевому стандарту ОСТ 23.040.00-КТН-574-06 проводится расчет долговечности и прочности, а также рассчитывается предельный срок эксплуатации труб и сварных соединений, имеющих дефекты и особенности.

Дефектами геометрии труб называют дефекты, которые связаны с изменением формы трубы. К таким дефектам относятся:

1. *Вмятина.* Вмятиной называют явление местного уменьшения проходного сечения трубы, происходящего без излома оси нефтепровода, которое возникает в результате поперечного механического воздействия (рисунок 2.1).

Максимальное расстояние между образующей трубой и поверхностью трубы во вмятине называется глубиной вмятины.

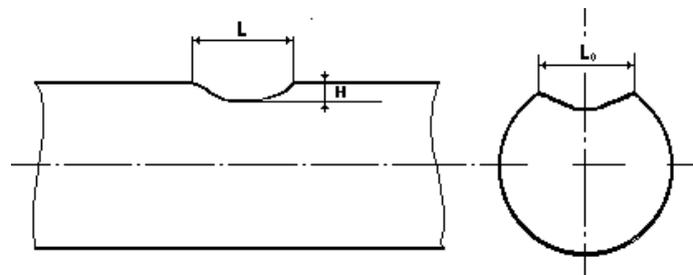


Рисунок 2.1 Вмятина.

2. *Гофр.* Гофром называется явление уменьшения проходного сечения

трубы, которое сопровождается периодически повторяющимися поперечными выпуклостями и вогнутостями стенки. Гофр вызвал потерей устойчивости от поперечного изгиба с изломом оси нефтепровода (рисунок 2.2).

Глубину гофра определяют, как сумму высоты выпуклости и глубины вогнутости, которые измеряют от образующей трубы.

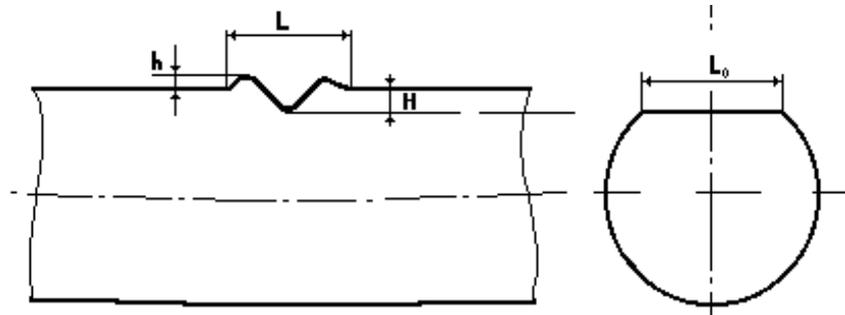


Рисунок 2.2 Гофр.

3. *Сужение (овальность)*. Сужением называют явление уменьшения проходного сечения трубы, при этом наблюдается расхождение сечения трубы с окружностью (рисунок 2.3).

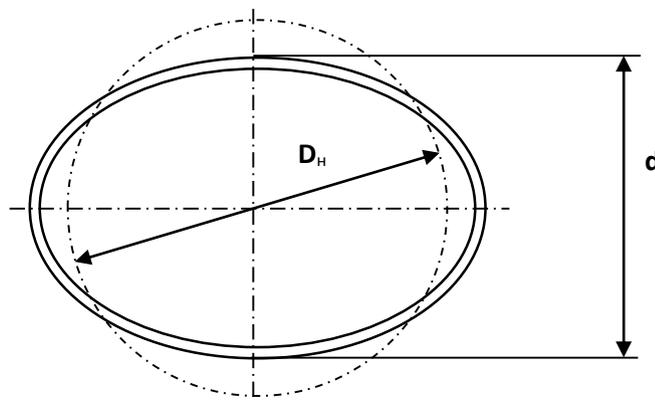


Рисунок 2.3 Измерение параметров дефекта "сужение".

Фактический центр сужения может быть смещен от центра трубы с номинальным диаметром.

К дефектам стенок труб относятся:

1. *коррозионная потеря металла.* Потерей металла называется локальное уменьшение толщины стенки трубы в результате коррозионного повреждения (рисунок 2.4).

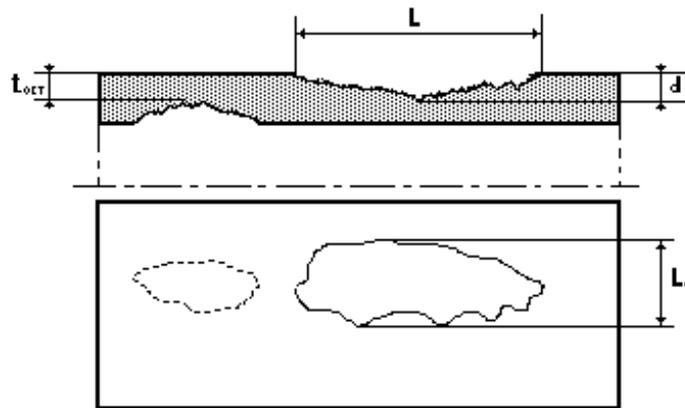


Рисунок 2.4 Внутренняя и внешняя коррозия.

Потеря металла может быть двух типов: одиночная и объединенная.

Группа, состоящая из двух и более коррозионных дефектов, которые объединены в один целый дефект, при условии, что два соседних дефекта находятся друг от друга на расстоянии меньше или равному значению в четыре раза больше, чем толщина стенки трубы в районе дефектов, называется объединённой потерей металла. Габаритная площадь потери, характеризующая металл, определяется крайними точками дефектов из состава группы и равна произведению длины объединенного дефекта L вдоль оси трубы на ширину объединенного дефекта W по окружности трубы. Дефекты, сгруппированные по указанным критериям, в технических отчетах по диагностике, базе данных «Дефект» и актах ДДК описываются как «объединенные потери металла» [9].

Одиночной потерей металла называется один дефект потери металла, расстояние от которого до ближайших потерь металла превышает значение 4-х толщин стенки трубы в районе дефекта.

2. Уменьшение толщины стенки технологическое - плавное утонение стенки, образовавшееся в процессе изготовления горячекатанной трубы или технологический дефект проката.

3. Механическими повреждениями типа «риска» называются механические повреждения стенок труб, например, царапины, продеры, риски, задиры, в виде углубления с уменьшением толщины стенок труб, которое образовано твердым телом, перемещающимся по поверхностям труб. (рисунок 2.5).

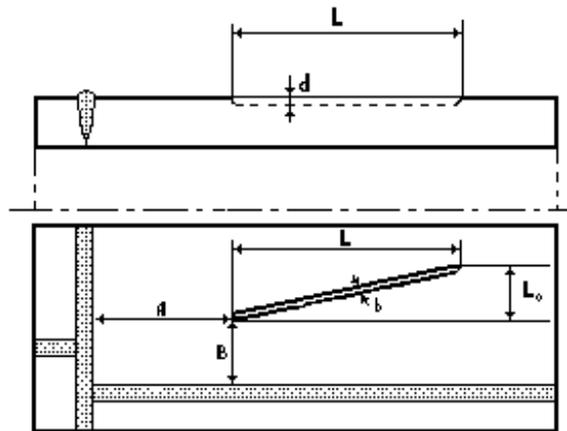


Рисунок 2.5 Риска.

Механические повреждения поверхностей стенок труб, классифицируемые по ГОСТ 21014-88 как «риска», «царапина», «задир», «продер», «поверхностная вмятина», идентифицируются по данным ВИП как «риска».

4. Расслоением называется внутреннее нарушение сплошности металла трубы в продольном и поперечном направлении, которое разделяет металл стенок труб на слои технологического происхождения (рисунок 2.6).

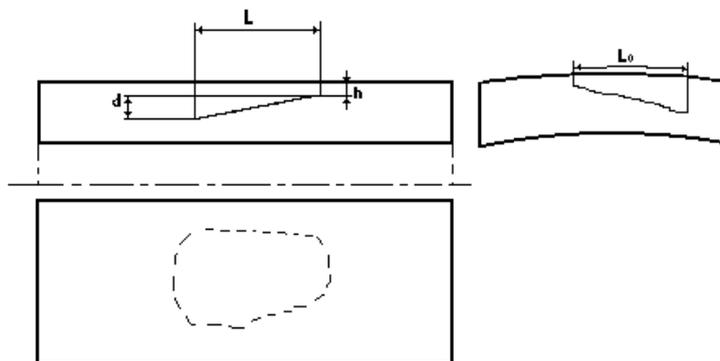


Рисунок 2.6 Расслоение.

5. *Расслоением с выходом на поверхность* называется *расслоение*, которое выходит на поверхность трубы (внешнюю или внутреннюю) (рисунок 2.7).

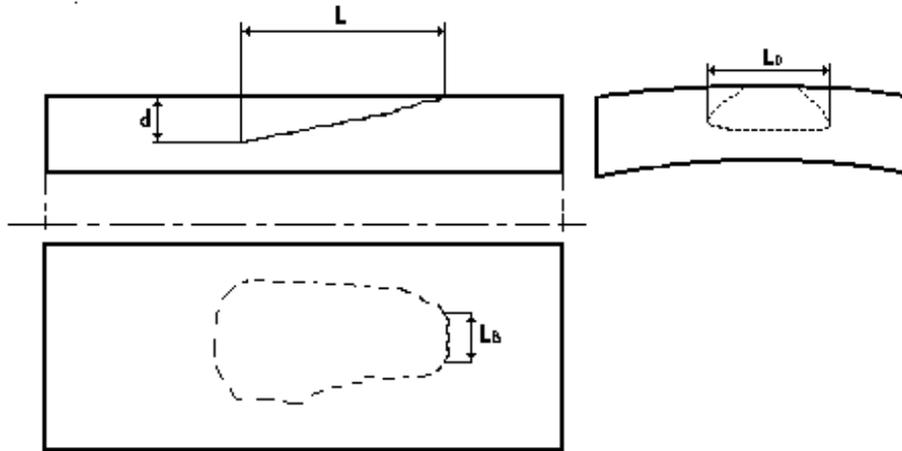


Рисунок 2.7 Расслоение с выходом на поверхность.

6. *Расслоением в околошовной зоне* называется расслоение, которое примыкает к сварному шву. Расстояние от линии перехода шва к основному металлу до края расслоения должно быть меньше или равно значению в 4 раз превышающему толщину стенки трубы. (рисунок 2.8).

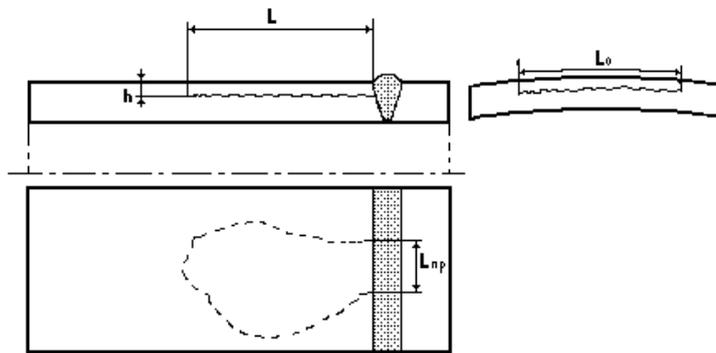


Рисунок 2.8 Расслоение в околошовной зоне.

7. *Трещиной* называется дефект в виде несплошности металла (разрыва). Геометрию разрыва определяют двумя размерами – протяженностью и глубиной. (рисунок 2.9).

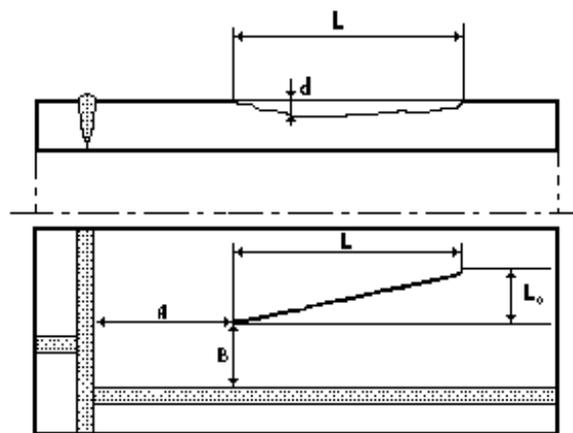


Рисунок 2.9 Трещина.

8. *Трещиноподобным коррозионно-механическим дефектом* называется трещина или группа трещин, скорость роста которых определяют действием напряжений, т.е. коррозионного растрескивания под напряжением, и коррозионной среды на металл.

Дефектами сварного шва называются дефекты непосредственно в самом сварном шве или в около шовной зоне. К ним относятся: трещина, непровар, несплавление. Существуют соответствующие нормативные документы, которыми регламентируются параметры и типы дефектов сварных соединений.

Шлаковые включения, поры, подрез, утяжина, превышение проплава, чешуйчатость, наплывы, отклонения размеров шва от требований, предусмотренных нормативными документами, а также особенности и дефекты сварного шва, точное классифицирование которых по данным ВТД невозможно, называются «аномалией» поперечного, спирального, продольного сварного шва.

Смещением кромок называется разное расположение уровней наружных и внутренних поверхностей стенок сваренных труб (для поперечного сварного шва) или листов (для спиральных и продольных швов) в стыковых сварных соединениях,

идентифицируемого по данным ВИП как «смещение» спирального, продольного, поперечного сварного шва [6].

Косым стыком называется сварное стыковое соединение трубы с трубой, катушкой или соединительной деталью, при котором продольные оси труб расположены под углом друг к другу.

За исключением стыков, которые выполнены на основе особых технических условий, дефектом являются стыкуемые трубы с отношением толщин стенок более 1,5.

Сварным дефектным стыком называется кольцевой сварной шов, который содержит более одного дефекта. В базах данных, которые содержат сведения о дефектах, «дефектные сварные стыки» подлежат учету без указания количества дефектов в них.

Нефтепровод может быть сконструирован с дефектами. Такими дефектами можно назвать:

- недопустимые соединительные детали;
- недопустимые конструктивные детали и приварные элементы.

Детали заводского изготовления, например, тройники, отводы, заглушки, переходники, являются *недопустимыми соединительными* деталями.

Выполненные не по ТУ 102-488-05 сварные секторные отводы заводского изготовления считаются дефектами и подвергаются ДДК. Классификация отвода устанавливается по результатам ДДК.

Недопустимым конструктивными деталями и приварными элементами нефтепровода можно назвать следующие детали:

- 1) накладные и вварные заплаты всех размеров и видов;
- 2) ремонтные конструкции, к которым не разрешено применять НД, действовавшее на момент установки;
- 3) ремонтные конструкции, внутри которых находятся дефекты параметров, рост которых увеличился на 10% и более.

- 4) нерегулярные ремонтные конструкции с закончившимся предельный сроком эксплуатации;
- 5) сделанные из частей труб накладные детали;
- 6) отборы давления; вантузы; «чопики»; бобышки; места, к которым приварены шунтирующие перемычки и контакты контрольно-измерительной аппаратуры с закончившимся предельным сроком эксплуатации;

Бобышкой называют заглушенный резьбовой пробкой патрубков с вентилем для отбора давления или с внутренней резьбой, служащий для отвода нефти.

«*Чопиком*» называют стальную пробку, обваренную по контуру, которая служит для того, чтобы устранять сквозные отверстия.

- 7) кожухи, которые касаются стенок труб;
- 8) присоединения сварные, которые не соответствуют НД.

Приварные элементы и конструктивные детали, не имеющие характеристики в техническом задании, обнаруженные ВИП, включаются в состав дефектов и подвергаются ДДК. Классификация этих деталей и их предельный срок эксплуатации устанавливается по результатам ДДК [18].

В состав дефектов включается тот участок на трубе, на котором при проходах через искусственные и естественные препятствия происходит касание с кожухом.

Капитальный и выборочный ремонт стенок труб с заменой изоляции нужно проводить с ДДК всех дефектов на ремонтируемом участке.

В состав технического отчета включаются особенности нефтепровода. Изменение параметров особенностей контролируется при повторных инспекциях. Так же в состав отчета включаются отложения, такие как загрязнения стенок труб, в результате которых происходят потери сигналов; металлические предметы, которые находятся рядом с трубопроводом, а также инородные предметы, находящиеся в трубопроводах.

3. Особенности эксплуатационного разрушения нефтепровода.

Трещины являются самыми опасными дефектами. Место расположения трещин – это обычно сварной шов, зона сплавления или основной металл. Трещины могут быть разветвленными, поперечными или по-другому - кольцевыми, продольными или объединёнными в сетку трещин по отношению к оси трубопровода. Трещины делятся на поверхностные, подповерхностные и сквозные. Интервал линейных размеров трещин в трубопроводах довольно велик: есть трещины размером как доля миллиметра, так и несколько десятков или даже сотен миллиметров; глубина трещин ограничивается толщиной трубопровода.

Так как трещина является наиболее опасным дефектом, то, обнаружив любую несплошность, её нужно охарактеризовать именно как трещина, потому что всегда есть вероятность, что она имеет заострения вплоть до трещин, даже если по данным неразрушающего контроля несплошность объёмна. При систематизации из всех возможных вариантов нужно выбрать самый опасный с точки зрения статической или циклической трещиностойкости. Самым опасным является вариант, когда трещина расположена так, что сечение элемента конструкции максимально ослабляется, а ее плоскость нормальна к направлению действия максимальных растягивающих напряжений (разрушение I типа). Если же известно, что трещина ориентирована нормально ко второму главному напряжению, то в расчет принимают эту ориентацию [26].

Для систематизации всех видов несплошностей, таких как трещины, поры, включения, непровары и др. используют эллиптические трещины. Направленный в любом направлении поверхностный дефект будем представлять в виде полуэллиптической трещины, размеры которой определим длиной $2c$ по поверхности оболочки и глубиной a , при этом, a деленное на c должно быть меньше или равно единице ($a/c \leq 1$), где c и a - большая и малая полуоси эллипса соответственно. Вершина трещины – это точка контура, соответствующая концу малой полуоси a . Внутренний дефект – это дефект, расстояние между ближайшей

свободной поверхностью оболочки и кромкой дефекта которого больше, чем $a/9$, где $2a$ - это глубина дефекта. В противном случае его считают поверхностным, т.е. внешним.

Разрушение трубопровода происходит в несколько следующих этапов:

- сдвигание трещины с места и ее медленный докритический рост. На этом этапе трещина увеличивается до переломных размеров под воздействием некоторых факторов;
- возбуждение разрушения. Под действием влияющих факторов, таких как температура, напряжение и т.д., когда ориентация и размер трещины достигают определенного соединения, дефект становится нестабильным и вызывает стремительно развивающееся разрушение;
- процесс, когда трещина неустойчиво распространяется;
- остановка трещины. Из-за наличия тех или иных обстоятельств разрушение трещины может приостановиться;

Изучение каждого этапа разрушения обычно проводится отдельно.

С позиции оснащения безопасной эксплуатации трубопроводов максимальное внимание уделяется этапу докритического развития трещины, а точнее определение момента начала разрушения, то есть неустойчивого распространения трещины [13].

Разрушение в зависимости от степени действующего напряжения σ делится на хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение.

σ_T – это предел текучести.

- при $\sigma < 0,8\sigma_T$ пластичные изменения в объёме элемента конструкции не прогрессируют, в таком случае речь идёт о хрупком разрушении трещины. Она растёт при небольших размерах пластической зоны, а скорость роста высока и практически равна скорости звука в материале, в котором она развивается;
- при $\sigma \approx \sigma_T$ в элементе конструкции появляются пластичные деформации около 0,2%, а в вершине трещины зона пластических деформаций достигает

макроскопических размеров. Здесь имеет место быть квазихрупкое разрушение. Скорость нестабильного развития трещины снижается из-за пластичного изменения материала;

- вязкое разрушение наблюдается при напряжении $\sigma > \sigma_T$. полное разрушение элемента конструкции наступает из-за развития пластичной деформации по всему объёму элемента. Скорость разрушения уменьшается еще сильнее, но при этом остается довольно высокой [15].

3.1. Инженерные методы оценки сопротивления нефтепроводов разрушению.

Во многих странах разработаны стандарты и методики определения допускаемых и критических дефектов на этапе проектирования и эксплуатации ответственных конструкций. Все стандарты и методики разработаны исходя из условий разрушения и имеющихся экспериментальных данных по трещиностойчивости материалов.

Ключевые позиции разработанных методик:

- расчет проводится при несплошностях, т.е. дефектах, которые выявляются во время неразрушающего контроля при эксплуатациях. Несплошности характеризуются соответствующими показателями и схематизируются в соответствии с методическими рекомендациями;

- Считаются допустимыми и не подлежат расчету дефекты размером, не выходящим за пределы норм по правилам контроля сварных соединений, и соответствующие документам по оценке качества основного металла после изготовления;

- Дефекты считаются допустимыми если их размеры с учетом кинетики их развития к концу эксплуатации не превышают допускаемые значения, определяемые положениями данной методики;

- Критические размеры дефектов рассчитываются с помощью

методов механики разрушения - линейной или нелинейной, учитывая их максимальное пластическое состояние: при хрупком разрушении расчет осуществляют методами *линейной механики разрушения*, используя коэффициент интенсивности напряжений K_I и температурную зависимость вязкости разрушения K_{Ic} от приведенной температуры $(T-T_{кр})$, где $T_{кр}$ - критическая температура хрупкости; при квазихрупких и вязких разрушениях расчет осуществляют методами нелинейной механики разрушения, используя коэффициент интенсивности деформаций K_{Ie} и их критическое значение K_{Iec} ;

- предельно допустимый размер дефекта рассчитывают почти как критический, за исключением того, что вместо значений K_{Ic} и K_{Iec} используют соответствующие значения;

- При расчете квазихрупкой и вязкой областей проводят оценку пластических предельных состояний;

- при циклических нагружениях расчет кинетики дефектов проводят методом линейной механики разрушения. Критерий нагружения определяется числом циклов нагружения N , размахом коэффициента асимметрии цикла r и коэффициентом интенсивности напряжений ΔK . Сопротивление разрушению определяют графиком усталостного разрушения, устанавливающего зависимость скорости роста трещины dl/dN от ΔK при заданном значении коэффициента асимметрии цикла r [13].

Вышеперечисленные позиции методик создают довольно точное понятие о процессе расчета элементов конструкций, в частности трубопроводов при наличии в них трещин.

4. Исследование напряженно-деформированного состояния

линейной части магистрального нефтепровода.

4.1. Программы и возможности конечно-элементного анализа.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) при анализе конструкций в настоящее время является практически мировым стандартом для различных расчетов конструкций. Благодаря универсальности МКЭ, которая позволяет единым способом рассчитать различные конструкции с разными свойствами материалов, все выше сказанное имеет место быть.

Решая, можно ли использовать вышедшей из строя трубопровод, а также создавая критерии, определяющие вывод в ремонт, либо контроль за трубопроводом, либо выполнение дополнительных действий для обеспечения эксплуатационной надежности, особое внимание, учитывая реально действующие нагрузки и разработки критериев устойчивости и прочности, уделяют анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) [11].

Для анализа таких разнородных задач необходимо проводить исследования, которые включают в себя реальные измерения НДС, применение теории вероятностей, оценку надежности трубопровода как механической системы. Так мы можем видеть связь между использованием трубопровода, его проектированием и строительством. Только натурное исследование нагрузок при эксплуатации даст возможность на стадии проектирования научно аргументировать выбор материалов, размеров и конструктивных решений. Решение этих задач разрешает задание оптимальных технологических режимов эксплуатации и прогнозирование изменения механических свойств и целостности трубопровода.

Конструкторские бюро и научно – исследовательские организации нуждались в удобных, быстрых, универсальных и надежных для пользователей программах, которые бы могли реализовать большой спектр расчетов. Это и послужило стимулом к созданию прикладных программ конечно-элементного анализа различными фирмами. Это известные программные продукты ANSYS и DesignSpace фирмы ANSYS Corporation; Cosmos/M Designer, Cosmos/DesignStar, Cosmos/Works фирмы Structural Reseach & Analysis Corporation; Design Works фирмы CADSI; АПИМ WinMachine Центра программного и научного обеспечения АПИМ и др.

Вышеперечисленные программы делятся на два вида [10].

1) программы конечно – элементного анализа, такие как MSC/InCherck Design Space, Cosmos/Works, которые встраиваются на уровне меню в известные пакеты САПР и располагают необходимым инструментарием для экспресс-анализа сборочных единиц или элементов непосредственно в сфере их разработки. Чтобы пользователям было удобно использовать такие программы, в них выполняется алгоритм автоматического разделение конструкции на конечные элементы.

У данных программ, помимо вышеперечисленных плюсов, существуют и недостатки, такие как ограниченный набор возможностей для создания и расчета моделей с усложненными свойствами по функциональным схемам, граничным условиям, нагрузкам, геометрическим особенностям и др.

Построенные в этих программах расчетные алгоритмы не всегда решают поставленные задачи, заставляя пользователей обратиться к более полной программе.

2) В эту группу входят программы, которые в первую очередь ориентированы на разработку полновесной конечно–элементной модели, в которой максимально будут учитываться особенности геометрического и силового характера, так же будет возможность моделировать, для выполнения различных типов расчета. В таких программах имеются нужны для геометрического моделирования конструкций

инструменты, а также прогрессивные ресурсы импорта/экспорта геометрических моделей из других САПР – программ.

К этой группе программ относят рассматриваемую систему моделирования конечно – элементного анализа конструкций ANSYS.

Отличительные особенности, благодаря которым достигнут успех программного продукта ANSYS представлены ниже:

- ANSYS – это уникальная конечно-элементная система, которая охватила многие явления разной физической природы, такие как гидрогазодинамика, прочность, электромагнетизм и теплофизика. Она имеет возможность решать связанные задачи, объединяющие все перечисленные виды явлений;

- Самая широкая интеграция и возможность двухстороннего обмена данными со всеми CAM / CAE / CAD – системами;
- Пополняемость и модифицируемость, т.е. полная открытость;
- ANSYS первый и пока единственный из многих программных комплексов разработан и сертифицирован согласно международным стандартам ISO 9000 и ISO 9001;
- показатель «эффективность-стоимость» у ANSYS самый высокий;
- ANSYS дает самую обширную и уникальную модернизированную систему помощи, доступной в интерактивном режиме online, в основе которой гипертекстовое представление.

Представители нефтегазовой отрасли активно пользуются технологией численного моделирования (далее ТЧМ), для этого есть ряд причин:

- 1) Каждый входящий ресурс требует учета принятого и отданного сырья,
- 2) Точность измерительного процесса зависит от технического состояния прибора.
- 3) Знать о напряженно-деформированном состоянии каждого прибора очень важно, потому как от неиспорченности конструкции и сохранения

присоединительных размеров зависит стабильность эксплуатационных характеристик оборудования.

В газовой отрасли ТЧМ играет особую роль при решении проблемы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) при различных нагрузках, а также согласования с промышленными стандартами.

Организации, занимающиеся проектированием сооружений и объектов трубопроводного транспорта, обычно используют программный комплекс ANSYS. Раньше новые методы и разработки проверки учетных приборов опирались на высокие производственные затраты. Теперь же, из-за увеличения конкуренции, требуется модернизация процессов исследования, то есть переход компьютерного моделирования на новый уровень, что позволит проводить анализ сложной конструкции без особых затрат времени и средств, к тому же это позволит проводить испытания конструкции при изменениях внешних и внутренних факторах.

Метод конечных элементов считают эффективным и широко используемым средством по достижению поставленных целей. Сущность этого метода заключается в аппроксимировании исследуемого тела той или иной модели, представляющую собой группу элементов с конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов.

Плюс этого метода в том, что существенно сокращаются объёмы дорогостоящих материалов, это даёт возможность намного уменьшить затраты при создании новых изделий. Кроме того, метод конечных элементов позволяет в кратчайшие сроки оценить характеристики различных конструкций и выбрать самую лучшую.

Концепция расчетных процедур программы ANSYS

Процедура стандартного расчета разделяется на три этапа:

- построение модели;
- приложение нагрузок и получение решения;
- просмотр и анализ результатов.

Построение модели: на этом этапе определяем типы конечных элементов, их константы, свойства материала и геометрию модели.

Задаём типы элементов: в библиотеке конечных элементов программы ANSYS содержится более чем 80 типов. Каждый тип определяет, возможно ли применить элемент к той или иной области расчетов, например, магнитный, тепловой, прочностной другие расчеты; характерную форму элемента: в виде бруска, плоскую, линейную и т.д.; двухмерность (2D) или трехмерность (3D) элемента как геометрического тела.

Задаём константы элементов: константа элемента - это свойство, специфичное для данного типа элемента, например, параметры поперечного сечения балочного элемента.

Создаём геометрическую модели: создание соответственной конечно-элементной модели, которая состоит из элементов и узлов, является основной задачей на этапе создания геометрической модели. При разработке конечно-элементной модели используют две технологии: твердотельное моделирование и прямая генерация сетки. В первом методе происходит описание геометрических границ модели, а уже потом программа генерирует сетки с элементами и узлами; при этом размеры и форма элементов контролируются. Во втором случае положение каждого узла задаётся "вручную" и происходит соединение элементов между собой.

Задание нагрузок и получение решения: на этом этапе выбираем тип анализа и устанавливаем его опции, прикладываем нагрузки, определяем опции для выбора шага по нагрузке и инициируем решение.

Выбор типа анализа и его опций: выбираем тип анализа, основой которого являются условия нагружения и реакция системы, предположительно полученная

ранее. Программа ANSYS предлагает такие виды расчетов, как спектральный, статический, гармонический, динамический, модальный, и расчет устойчивости.

Возможность уточнять параметры проводимых расчетов нам дают опции анализа. Типичным является выбор метода решения, учет или отказ от учета влияния напряженного состояния конструкции на ее жесткость, а также опций применения метода Ньютона-Рафсона. Большинство этих нагрузок может быть приложено или к твердотельной модели (в ключевых точках, по линиям и поверхностям), или к конечно-элементной модели (в узлах и к элементам).

Просмотр результатов: просмотр результатов возможен использованием двух постпроцессоров программы ANSYS. Общий постпроцессор обеспечивает получение оценки погрешности счета, линий уровня, листинг результатов, картину деформированного состояния, проведение вычислений, на основе полученных данных, объединение расчетных случаев и используется для анализа результатов одного шага решения. Постпроцессор процесса нагружения используют с целью просматривать результаты в указанных точках расчетной модели на каждом шаге её решения; возможно получение графика результатов как функцию времени или частоты, на основе графика листинг результатов и выполнение арифметических и алгебраических вычислений.

Прочностной анализ конструкций:

Самым распространенным приложением метода конечных элементов считается прочностной анализ конструкций. Узловые перемещения являются базовыми неизвестными, которые определяют во всех типах прочностного анализа конструкций. По этим перемещениям вычисляют остальные величины, такие как усилия, напряжения, деформации [14].

В программе ANSYS доступны следующие виды прочностного анализа:

– статическим анализом называется вычисление напряжений и перемещений при условии статического нагружения;

- модальным анализом называется определение собственных частот и форм колебаний;
- гармоническим анализом называется проверка, откликается ли конструкции на гармонические составляющие возмущающей нагрузки;
- динамическим анализом называется проверка, откликается ли конструкция на действие произвольных нагрузок;
- спектральным анализом называется расширение модального анализа, служащего для вычисления напряжения и деформации при действии спектра частот или случайной вибрации;
- анализом устойчивости называется расчёт критических нагрузок и определение форм потери устойчивости.

Помимо этого, возможно проведение специальных видов расчета в области усталостных разрушений, прочности композитных материалов и механики разрушений.

По существующим нормативным документам запас прочности трубопроводов определяется с учетом нагружения трубопровода внутренним давлением при условии однородного распределения напряжений по периметру и длине трубы. Но за всю практику эксплуатации трубопроводных систем были зафиксированы неоднократные случаи, когда трубопроводы разрушались и при рабочих давлениях ниже допускаемых. Причина в том, что в большинстве случаев имеются дефекты геометрии трубопроводов в трубопроводе, такие как стыки, изгибы, сопряжения труб, имеющих разные размеры (рисунок 5.1), а также местные повреждения металла в зонах сварных стыков трубопровода.

Включения, поры, трещины и другие дефекты (рисунок 5.2) представляют собой трехмерные объекты, которые ориентированы в объеме сварного шва различным способом. Поэтому использовать для анализа НДС модель сквозной трещины, которая находится в условиях напряженного однородного состояния, иногда невозможно.

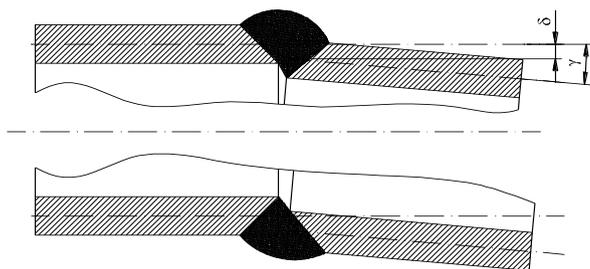


Рисунок 5.1 Параметрическое представление сечения сварного шва для труб, повернутых и смещённых относительно друг друга.



Рисунок 5.2 Разрез реального сварного шва с микро- и макродефектами.

Возможности современной вычислительной техники и алгоритмы численного анализа, прежде всего метода конечных элементов, позволяют исследовать проблему детальнее, учитывая её специфические особенности.

Вероятность возникновения погрешностей монтажа, характеризующихся величинами несносности δ и угловой погрешностью γ , существует при сравнительно большом диаметре и тонкими по сравнению с ним стенками трубы. На первом этапе численно анализировалось влияние этих параметров на НДС трубопровода при его нагружения внутренним давлением заданной интенсивности.

Беря во внимание всё выше сказанное, приходим к выводу, что программа ANSYS используется для анализа напряженного состояния линейных участков магистральных нефтепроводов.

4.2. Создание расчетной модели нефтепровода.

Создание модели производим в следующей последовательности:

1. Задаются свойства используемого в расчетах материала (рисунок 5.3.). В качестве материала используется сталь 17Г1С.

The screenshot displays the ANSYS Workbench interface for defining material properties. The main window shows the 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' table, which includes various mechanical properties such as Density (7850 kg m⁻³), Tensile Yield Strength (360 MPa), and Tensile Ultimate Strength (510 MPa). A specific property, 'Alternating Stress Mean Stress', is highlighted with a 'Tabular' data source. To the right, a 'Table of Properties Row 12: Alternating Stress Mean Stress' provides the S-N curve data, showing Alternating Stress (Pa) versus Cycles (Log₁₀). Below the table, a 'Chart of Properties Row 12: Alternating Stress Mean Stress' visualizes this data as a line graph with a mean stress of 0 Pa. The graph shows alternating stress decreasing from approximately 4.0E+09 Pa at 1 cycle to 8.62E+07 Pa at 6 cycles. A messages pane at the bottom indicates errors related to geometry and solution updates.

Cycles	Alternating Stress (Pa)
1	3,999E+09
2	2,827E+09
3	1,896E+09
4	1,413E+09
5	1,069E+09
6	4,41E+08
7	2,62E+08
8	2,14E+08
9	1,38E+08
10	1,14E+08
11	8,62E+07
12	8,62E+07

Рисунок. 5.3. Окно задания материала.

2. Далее создается модель линейного участка магистрального нефтепровода (рисунок 5.4.).

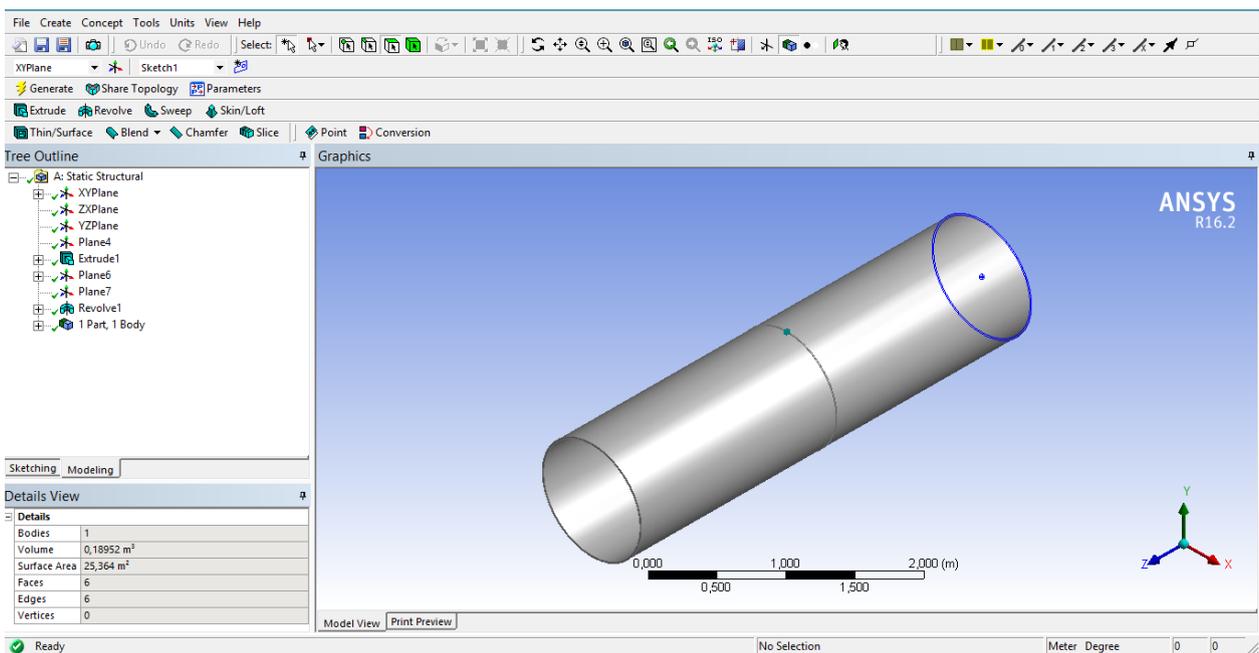


Рисунок. 5.4. Модель исследуемого участка.

3. Производится разбиение модели на конечные элементы (рисунок 5.5.).

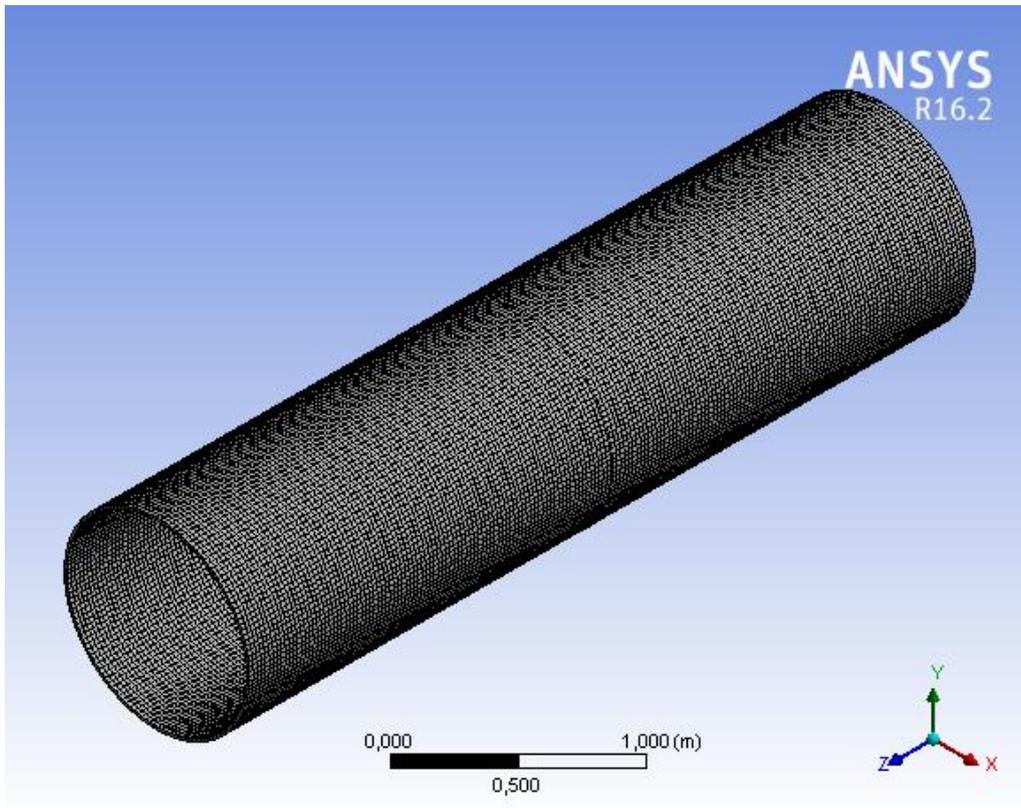


Рисунок 5.5. Конечно – элементная сетка.

4. Закрепляем модель и прикладываем необходимые силы (рисунок 5.6.).

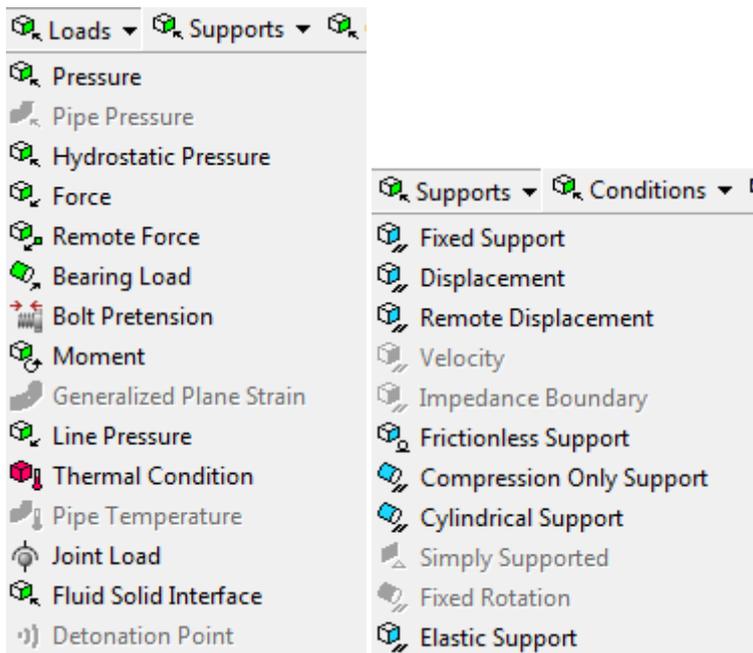


Рисунок 5.6. Закрепление модели и приложение к ней сил.

4.3. Тест программы.

Тест основан на сравнении расчетных величин, полученных классическим методом расчета по учебникам и их же – по методу конечных элементов.

Для определения соответствия расчету модели по методу конечных элементов общепринятым расчетам рассмотрим расчетную конструкцию под действием только внутреннего давления и давления грунта на тело нефтепровода.

Рассчитав трубопровод, проверим соответствие расчета модели в Ansys общепринятой, рассчитанной классическим образом. Для этого используем созданную модель трубопровода. Приложим действие внутреннего давления, равного 4,8 Мпа и произведем расчет.

Результаты расчета приведены на (рисунок 5.7.).

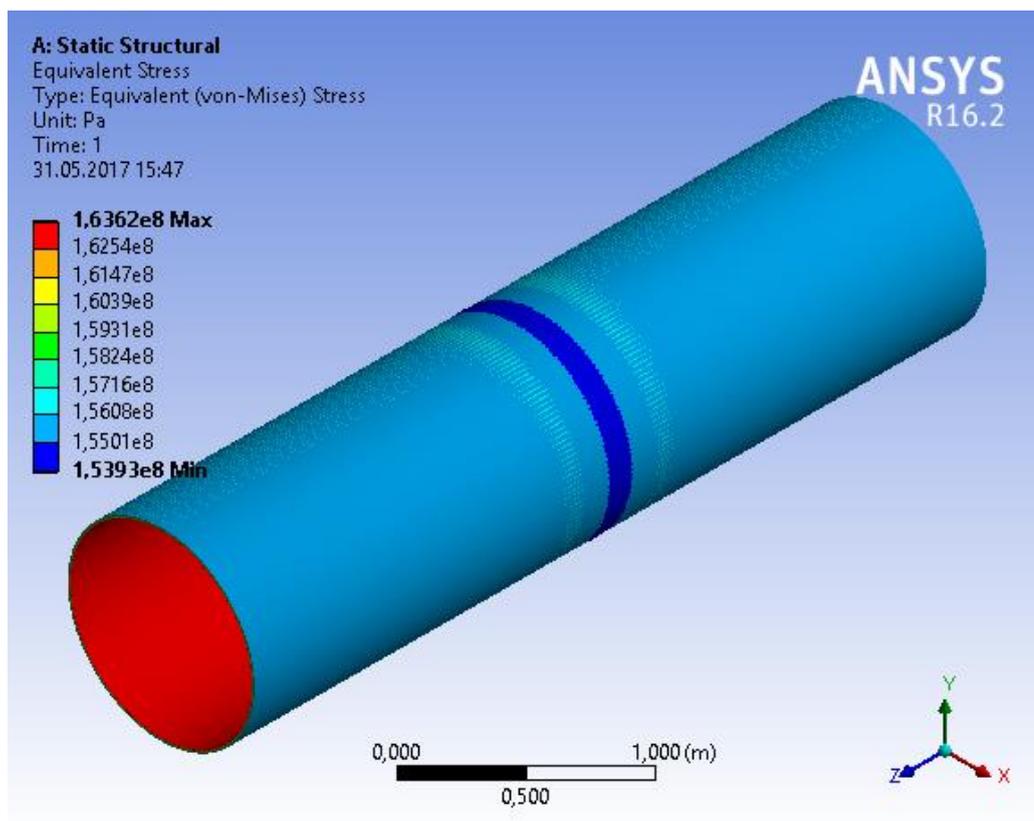


Рисунок 5.7. Расчетные напряжения по Мизесу на исследуемом участке.

Максимальные напряжения в главной балке под действием приложенных сил по методу конечных элементов $\sigma_{эксн} = 163,6 \text{ МПа}$.

Расчетное напряжение в средней части $\sigma_{эксн} = 163 \text{ МПа}$.

Погрешность расчета:

$$\Delta = \frac{\sigma_{эксн} - \sigma_{расч}}{\sigma_{эксн}} \cdot 100\% = \frac{163,6 - 163}{163,6} \cdot 100\% = 0,36\% . \quad (154)$$

Таким образом, принятая модель дает адекватный результат.

4.4. Результаты расчета модели нефтепровода

в программном комплексе Ansys.

Диаметр исследуемого нефтепровода 1020 мм, рабочее давление 4,8 МПа. Характеристика материала трубы: сталь 17Г1С со следующими механическими характеристиками $\sigma_{сп} = 510 \text{ МПа}$, $\sigma_m = 360 \text{ МПа}$. На нефтепровод, кроме рабочего давления, действуют следующие нагрузки: распределенная нагрузка от веса самой трубы с изоляцией и перекачиваемой нефти. В расчетах приняты допущения об отсутствии нагрузок, действующих в зимний период и температурного влияния на нефтепровод. Расчетная схема представлена на рисунке 5.8.

В исследовательской части рассматривался случай влияния дефектов в сварном шве на прочностные характеристики участка нефтепровода. В качестве дефектов была смоделирована пористость в сварном шве (рисунок 5.8.), а так же трещина в сварном шве (рисунок 5.9.). Результаты представлены ниже.

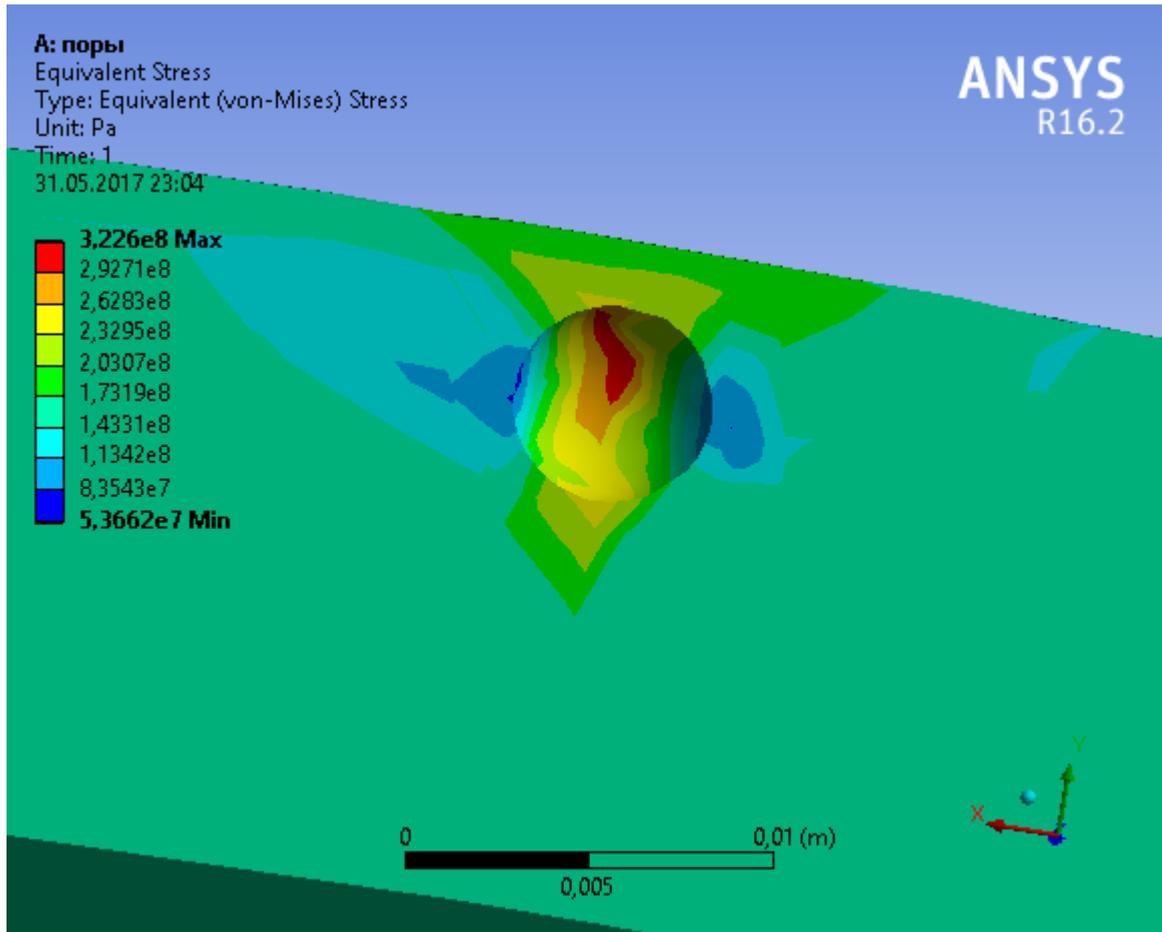


Рисунок 5.9. Расчетные напряжения по Мизесу на исследуемом участке при дефекте поры.

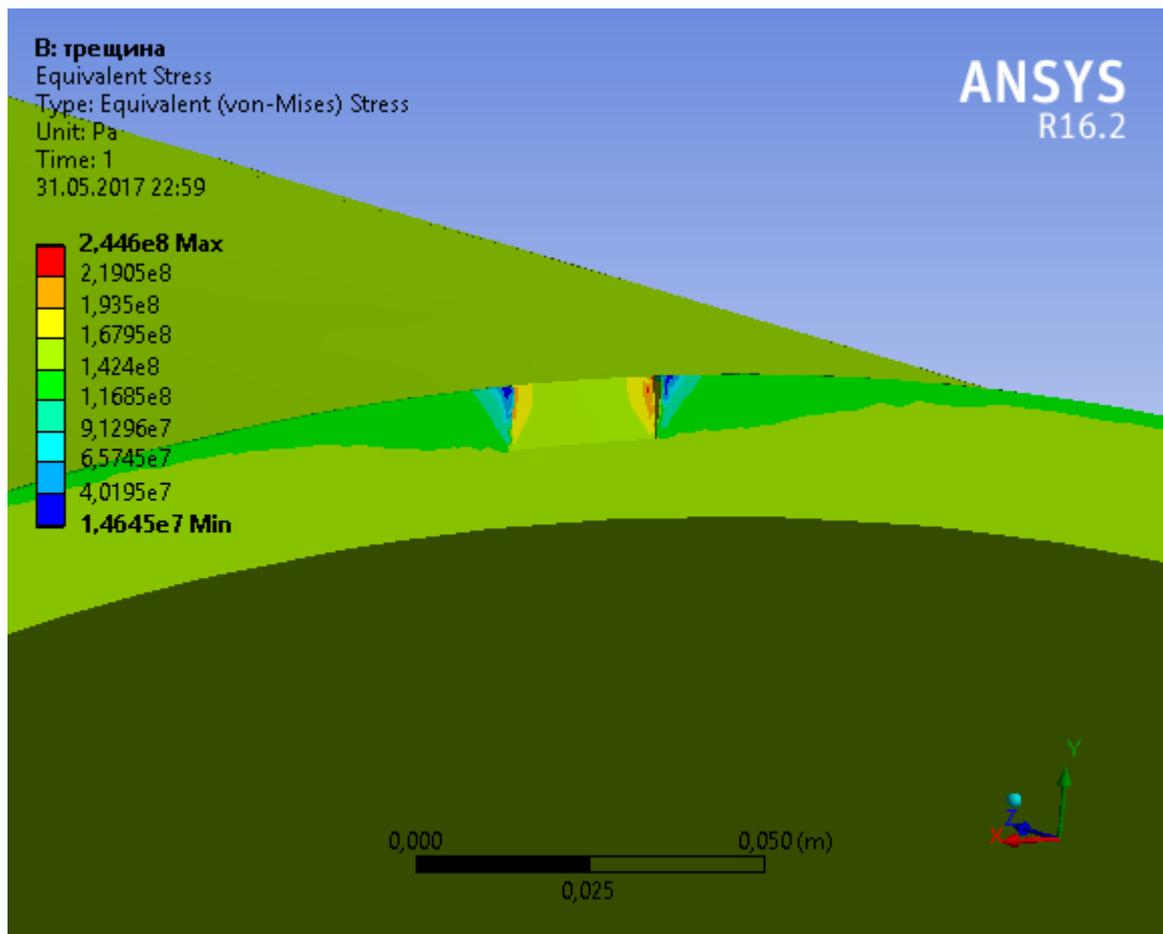


Рисунок 5.10. Расчетные напряжения по Мизесу на исследуемом участке при дефекте трещина.

Из полученных и представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- При наличии дефектов в сварном шве напряжения, действующие в нефтепроводе достигают величин, приближающихся к величине предела текучести материала;

- дальнейшая эксплуатация нефтепровода, без проведения ремонтных работ ведет к образованию и росту трещины;

Полученные результаты могут использоваться для принятия дальнейших решений по эксплуатации участка и проведению ремонтных работ.

5. Оценка прочности и устойчивости нефтепровода.

Общие данные:

Рабочее давление: $P = 4,8$ МПа;

Труба прямошовная $D_H = 1020$ мм, марка стали 17Г1С;

Номинальная толщина стенки δ_n , мм: 16;

$\sigma_{вр} = 510$ МПа, $\sigma_T = 360$ МПа;

Модуль упругости стали: $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа;

Плотность стали $P_{ст} = 7850$ кг/м³;

Продукт перекачки: нефть;

Коэффициент линейного расширения металла трубы: $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$;

Коэффициент поперечной деформации в стадии упругой работы металла (коэффициент Пуассона): $\mu = 0,3$

Подземный участок трубопровода:

Категория участка – I;

Грунт (глина): $\gamma_{гр} = 16,8$ кН/м³;

Высота слоя засыпки от верхней образующей трубопровода до поверхности грунта $h = 0,8$ м.

Температурный перепад: $\Delta t = \pm 48$ °С;

5.1. Определение толщины стенки нефтепровода.

Определяем расчетную толщину стенки трубопровода по формуле:

$$\delta = \frac{n \cdot P \cdot D_H}{2(R_1 + n \cdot P)} = \frac{1,1 \cdot 4,8 \cdot 1,02}{2 \cdot (260 + 1,1 \cdot 4,8)} = 0,01 \text{ м}, \quad (1)$$

где $n=1,1$ - коэффициент надежности по нагрузке - внутреннему рабочему давлению в трубопроводе [1. табл. 13];

$P=4,8$ МПа - рабочее давление в трубопроводе;

$D_H=1,02$ м — наружный диаметр трубы;

R_1 — расчетное сопротивление растяжению, определяется по формуле:

$$R_1 = \frac{R_1^H \cdot m_0}{k_1 \cdot k_H} = \frac{510 \cdot 0,75}{1,47 \cdot 1} = 260 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где $m_0=0,75$ - коэффициент условий работы трубопровода [1, табл. 1];

$k_1 = 1,47$ - коэффициент надежности по материалу [1, табл. 1.1];

$k_H = 1$ - коэффициент надежности по назначению трубопровода, принимается в зависимости от категории трубопровода [1. табл. 11];

$R_1^H = 510$ МПа - нормативное сопротивление растяжению металла труб и сварных соединений, принимается равным минимальному значению временного сопротивления $\sigma_{вр}$, МПа;

Принимаем $\delta = 10\text{мм}$.

Определяем наличие действующих продольных осевых напряжений.

Продольные осевые напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_{npN} = -\alpha \cdot E \cdot \Delta t + \mu \cdot \frac{n \cdot P \cdot D_{вн}}{2\delta_n}, \quad (3)$$

где $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}$ - коэффициент линейного расширения металла трубы;

$E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости Юнга;

$\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

Δt - расчетный температурный перепад.

Абсолютное значение максимального положительного или отрицательного температурного перепада определяют по формулам:

$$\Delta t_{(+)} = \frac{\mu \cdot R_1}{\alpha \cdot E} = \frac{0,3 \cdot 260}{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} = 31,6^\circ; \quad (4)$$

$$\Delta t_{(-)} = \frac{(1 - \mu) \cdot R_1}{\alpha \cdot E} = \frac{(1 - 0,3) \cdot 260}{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} = 73,7^\circ. \quad (5)$$

К дальнейшему расчету принимаем больший перепад температуры.

$$\sigma_{npN} = -\alpha \cdot E \cdot \Delta t + \mu \cdot \frac{n \cdot P \cdot D_{вн}}{2\delta_n} = -1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 73,7 + 0,3 \cdot \frac{1,1 \cdot 4,8 \cdot 0,988}{2 \cdot 0,01} = -133 \text{ МПа}. \quad (6)$$

Т.к. σ_{npN} имеет отрицательное значение, то присутствуют сжимающие напряжения.

Находим коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла.

$$\psi_1 = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{133}{260} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{133}{260} = 0,64 \quad (7)$$

Пересчитываем толщину стенки с учетом коэффициента двухосного напряженного состояния:

$$\delta = \frac{n \cdot P \cdot D_n}{2(R_1 \cdot \psi_1 + n \cdot P)} = \frac{1,1 \cdot 4,8 \cdot 1,02}{2 \cdot (260 \cdot 0,64 + 1,1 \cdot 5,2)} = 0,016 \text{ мм}, \quad (8)$$

Принимаем толщину стенки до $\delta = 16 \text{ мм}$.

5.2. Проверка на прочность в продольном направлении.

Проверку на прочность следует производить из условия:

$$|\sigma_{npN}| \leq \psi_2 \cdot R_1, \quad (9)$$

где $\sigma_{npN} = -161 \text{ МПа}$ - продольное осевое напряжение;

$\sigma_{кц}$ - кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления, Мпа, определяемые по формуле:

$$\sigma_{кц} = \frac{n \cdot P \cdot D_{вн}}{2 \cdot \delta_n} = \frac{1,1 \cdot 4,8 \cdot 1,02}{2 \cdot 0,016} = 163 \text{ Мпа}; \quad (10)$$

ψ_2 - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб. Т.к. $\sigma_{npN} < 0$, ψ_2 определяется по формуле:

$$\psi_2 = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{\sigma_{кц}}{R_1} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{\sigma_{кц}}{R_1} = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{163}{260} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{163}{260} = 0,53 \quad (11)$$

Вычисляем комплекс:

$$\psi_2 \cdot R_1 = 0,53 \cdot 260 = 137 \text{ МПа} . \quad (12)$$

$$133 \text{ МПа} < 137 \text{ МПа} .$$

Прочность трубопровода в продольном направлении обеспечена.

5.3. Проверка на предотвращение недопустимых пластических деформаций.

Для предотвращения недопустимых пластических деформаций подземных трубопроводов проверку необходимо производить по условиям:

$$|\sigma_{np}^H| \leq \psi_3 \cdot \frac{m_0}{0,9 \cdot k_n} \cdot R_2^H ; \quad \sigma_{кц}^H \leq \frac{m_0}{0,9 \cdot k_n} \cdot R_2^H ; \quad (13)$$

где σ_{np}^H - максимальные суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий, МПа;

ψ_3 - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб. Т.к. продольные напряжения $\sigma_{np}^H < 0$, то:

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m_0}{0,9 \cdot k_n} \cdot R_2^H} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m_0}{0,9 \cdot k_n} \cdot R_2^H} \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{148}{\frac{0,75}{0,9 \cdot 1} \cdot 360} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{148}{\frac{0,75}{0,9 \cdot 1} \cdot 360} = 0,66 \quad (14)$$

$R_2^H = 360$ МПа- нормативное сопротивление сжатию металла труб и сварных соединений, принимается равным минимальному значению предела текучести $\sigma_{тек}$;

$\sigma_{кц}^H$ - кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления, МПа, определяемые по формуле:

$$\sigma_{кц}^H = \frac{P \cdot D_{вн}}{2 \cdot \delta_n} = \frac{4,8 \cdot 0,988}{2 \cdot 0,016} = 148 \text{ МПа} \quad (15)$$

Максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma_{пр}^H$ определяются по формуле:

$$\sigma_{пр}^H = \mu \cdot \sigma_{кц}^H - \alpha \cdot E \cdot \Delta t \pm \frac{E \cdot D^H}{2 \cdot \rho}; \quad (16)$$

$$\sigma_{пр}^H = 0,3 \cdot 148 - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 73,7 \pm \frac{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 1,02}{2 \cdot 1800} = -196 \text{ МПа} \quad (17)$$

где $\rho = 1800 \text{ м}$ - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода.

Проверку выполняем по наибольшему по абсолютному значению продольным напряжениям $\sigma_{пр}^H$, МПа.

Вычисляем комплекс

$$\psi_3 \cdot \frac{m_0}{0,9 \cdot k_H} \cdot R_2^H = 0,65 \cdot \frac{0,75}{0,9 \cdot 1} \cdot 360 = 197 \text{ МПа}; \quad (18)$$

$$\frac{m_0}{0,9 \cdot k_H} \cdot R_2^H = \frac{0,75}{0,9 \cdot 1} \cdot 360 = 300 \text{ МПа}. \quad (19)$$

$$|-196| \text{ МПа} < 197 \text{ МПа}; \quad 148 \text{ МПа} < 300 \text{ МПа}.$$

Условия прочности трубопровода на предотвращение недопустимых пластических деформаций выполняются.

5.4. Проверка общей устойчивости нефтепровода в продольном направлении.

Проверку общей устойчивости трубопровода в продольном направлении в плоскости наименьшей жесткости системы следует производить из условия:

$$S \leq m_0 \cdot N_{кр}; \quad (20)$$

где S - эквивалентное продольное осевое усилие в сечении трубопровода, МН;

$N_{кр}$ — продольное критическое усилие, Н, при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода.

Эквивалентное продольное осевое усилие в сечении трубопровода S определяется по формуле:

$$S = [(0,5 - \mu) \cdot \sigma_{кц} + \alpha \cdot E \cdot \Delta T] \cdot F = [(0,5 - 0,3) \cdot 163 + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 40] \cdot 0,05 = 6,6 \text{ МН}; \quad (21)$$

где $\Delta T = t_{\text{с}} - t_{\text{зам}} = 15 - (-25) = 40^\circ$;

F - площадь поперечного сечения трубы, м^2 :

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2) = \frac{3,14}{4} (1,02^2 - 0,988^2) = 0,05 \text{ м}^2; \quad (22)$$

Для прямолинейных участков подземных трубопроводов в случае пластической связи трубы с грунтом продольное критическое усилие находится по формуле:

$$N_{кр} = 4,09 \cdot \sqrt[1]{P_0^2 \cdot q_{\text{верт}}^4 \cdot F^2 \cdot E^5 \cdot J^3}; \quad (23)$$

где P_0 - сопротивление грунта продольным перемещениям отрезка трубопровода единичной длины;

J - осевой момент инерции металла трубы, определяется по формуле:

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (D_{\text{н}}^4 - D_{\text{вн}}^4) = \frac{3,14}{64} \cdot (1,02^4 - 0,988^4) = 0,006 \text{ м}^4; \quad (24)$$

$q_{\text{верт}}$ - сопротивление вертикальным перемещениям отрезка трубопровода единичной длины, обусловленное весом грунтовой засыпки и собственным весом трубопровода, отнесенное к единице длины:

$$q_{\text{верт}} = n_{\text{зп}} \cdot \gamma_{\text{зп}} \cdot D_{\text{н}} \cdot \left(h_0 + \frac{D_{\text{н}}}{2} - \frac{\pi \cdot D_{\text{н}}}{8} \right) + q_{\text{тр}} = 25890 \text{ Н / м}. \quad (25)$$

Величина P_0 определяется по формуле:

$$P_0 = \pi \cdot D_n \cdot (C_{zp} + P_{zp} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{zp}) = 3,14 \cdot 1,02 \cdot (25000 + 17145 \cdot \operatorname{tg} 16^\circ) = 95815 \text{ Н / м}; \quad (26)$$

где $C_{zp} = 25000 \text{ Па}$ - коэффициент сцепления глины [24, табл.4.3];

P_{zp} - среднее удельное давление на единицу поверхности контакта трубопровода с глиной;

$\varphi_{zp} = 16^\circ$ - угол внутреннего трения глины.[24, табл.4.3]

Величина P_{zp} вычисляется по формуле:

$$P_{zp} = \frac{2 \cdot n_{zp} \cdot \gamma_{zp} \cdot D_n \left[\left(h_0 + \frac{D_n}{8} \right) + \left(h_0 + \frac{D_n}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{zp}}{2} \right) \right] + q_{mp}}{\pi \cdot D_n}; \quad (27)$$

$$P_{zp} = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 16800 \cdot 1,02 \left[\left(0,8 + \frac{1,02}{8} \right) + \left(0,8 + \frac{1,02}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{16^\circ}{2} \right) \right] + 10680,4}{3,14 \cdot 1,02} = 17145 \text{ Н / м} \quad (28);$$

где $n_{zp} = 0,8$ - коэффициент надежности по нагрузке от веса глины;

$\gamma_{zp} = 16,8 \text{ кН/м}^3$ - удельный вес глины;

$h_0 = 0,8 \text{ м}$ - высота слоя засыпки от верхней образующей трубопровода до поверхности грунта;

q_{mp} — расчетная нагрузка от собственного веса заизолированного трубопровода с перекачиваемым продуктом:

$$q_{mp} = q_m + q_u + q_{np} = 3764 + 376,4 + 6543 = 10680,4 \text{ Н / м} \quad (29)$$

Нагрузка от собственного веса металла трубы:

$$q_m = n_{ca} \cdot \gamma_m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_n^2 - D_{вн}^2) = 0,95 \cdot 78500 \cdot \frac{3,14}{4} (1,02^2 - 0,988^2) = 3764 \text{ Н/м}; \quad (30)$$

где $n_{св} = 0,95$ - коэффициент надежности по нагрузкам при расчете на продольную устойчивость и устойчивость положения;

$\gamma_m = 78500 \text{ Н/м}^3$ - удельный вес стали, из которой изготовлены трубы.

Нагрузка от собственного веса изоляции для подземных трубопроводов:

$$q_u = 0,1 \cdot q_m = 0,1 \cdot 3764 = 376,4 \text{ Н / м} . \quad (31)$$

Нагрузка от веса нефти, находящейся в трубе единичной длины:

$$q_{np} = \rho_p \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D_{вн}^2}{4} = 870 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,988^2}{4} = 6543 \text{ Н/м} . \quad (32)$$

Определяем продольное критическое усилие:

$$N_{кр} = 4,09 \cdot \sqrt[11]{95815^4 \cdot 0,05^2 \cdot (2,06 \cdot 10^{11})^5 \cdot 0,006^3 \cdot 82150^2} = 26 \text{ МН} . \quad (33)$$

Вычисляем комплекс:

$$m_0 \cdot N_{кр} = 0,75 \cdot 26 = 19 \text{ МН}; \quad (34)$$

$$6,6 < 19 \text{ МН} .$$

Общая устойчивость трубопровода в продольном направлении в случае пластической связи трубопровода с грунтом обеспечена.

Продольное критическое усилие для прямолинейных участков трубопроводов в случае упругой связи с грунтом:

$$N_{кр}^2 = 2 \cdot \sqrt{k_0 \cdot D_n \cdot E \cdot J} = 2 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^6 \cdot 1,02 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,006} = 163 \text{ МН}; \quad (35)$$

где $k_0 = 5$, МН/м^3 - коэффициент нормального сопротивления глины.

Вычисляем комплекс:

$$m_0 \cdot N_{кр}^2 = 0,75 \cdot 163 = 122 \text{ МН}; \quad (36)$$

$$6,6 < 122 \text{ МН} .$$

Условие устойчивости прямолинейных участков нефтепродуктопровода обеспечено.

Проверим общую устойчивость криволинейных участков трубопровода, выполненных с упругим изгибом:

$$\theta_{\beta} = \frac{1}{\rho \cdot \sqrt[3]{\frac{q_{верт}}{E \cdot J}}} = \frac{1}{870 \cdot \sqrt[3]{\frac{258980}{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,006}}} = 0,04 ; \quad (37)$$

$$Z_{\beta} = \frac{\sqrt{\frac{P_0 \cdot F}{q_{верт} \cdot J}}}{\sqrt[3]{\frac{q_{верт}}{E \cdot J}}} = \frac{\sqrt{\frac{82150 \cdot 0,05}{25890 \cdot 0,006}}}{\sqrt[3]{\frac{25890}{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,006}}} = 185. \quad (38)$$

По номограмме определяем коэффициент - $\beta_N = 18$ [24, рис.4.2].

Для криволинейных (выпуклых) участков трубопровода, выполненных упругим изгибом, в случае пластической связи трубы с грунтом критическое усилие:

$$N_{кр}^3 = \beta_N \cdot \sqrt[3]{q_{верт}^2 \cdot E \cdot J} = 22 \cdot \sqrt[3]{25890^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,006} = 17 \text{ МН}. \quad (39)$$

$$N_{кр}^4 = 0,375 \cdot q_{верт} \cdot \rho = 0,375 \cdot 25890 \cdot 870 = 8,4 \text{ МН}. \quad (40)$$

Вычисляем комплекс:

$$m_0 \cdot N_{кр}^3 = 0,75 \cdot 19 = 13 \text{ МН} ; m_0 \cdot N_{кр}^4 = 0,75 \cdot 7,5 = 6,3 \text{ МН} , \quad (41)$$

$$6,6 \text{ МН} > 6,3 \text{ МН} .$$

Условие устойчивости для криволинейных участков не выполняется.

Увеличим устойчивость криволинейных участков, увеличив радиус изгиба трубопровода до 1800м

Заключение

В Российской Федерации протяженность магистральных нефте- и газопроводов составляет около 200 тыс. км, промысловых трубопроводов – 350 тыс. км. Для их функционирования используются около 800 компрессорных и нефтегазоперекачивающих станций. Значительное количество магистральных трубопроводов уже имеет большой срок эксплуатации, зачастую в экстремальных условиях, поскольку они прокладывались в самых разнообразных топографических, геологических, гидрологических и климатических условиях. Причиной повреждения и разрушения трубопроводов часто является ослабление стенки трубы из-за наличия дефектов. В связи с тем, что период эксплуатации трубопроводов составляет 20-30 и более лет, происходит процесс деградации трубной стали, изменяется предел текучести и другие механические характеристики материала и сварных соединений. При этом аварии и катастрофы, связанные со сбросом нефти и нефтепродуктов, составляют до 60% техногенных чрезвычайных ситуаций с экологическими последствиями. В связи с этим задача количественной оценки работоспособности линейных частей существующих магистральных трубопроводов и обеспечения надежности и безопасности новых трубопроводных систем в последние годы приобрела огромную актуальность.

Работа выполнена на основе методов теории упругости, теории пластичности, механики разрушения, теории прочности и надежности. Использовались методы аналитического и численного решения задачи с учетом возможной нелинейности исследуемой системы. Решение задач о пористости и трещине при циклическом

нагрузении проводилось с использованием вычислительного комплекса ANSYS.

Анализ и обработка

результатов численных экспериментов по определению характеристик свойств исследуемой системы или параметров ее поведения выполнялись с привлечением современной компьютерной техники.

Предложенные методики и процедуры позволяют определять остаточный ресурс, периодичность технических осмотров используемых трубопроводов по результатам диагностики наличия и распределения трещиноподобных дефектов в стенках труб.

Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review

Abstract The paper contains an original comprehensive review of finite element analysis (FEA) applied by researchers to calibrate and improve existing and developing electromagnetic non-destructive testing and evaluation techniques, including but not limited to magnetic flux leakage (MFL), eddy current testing, electromagnetic-acoustic transducers (EMATs). Premium is put on the detection and modelling of magnetic field, as the vast majority of ENDT involves magnetic induction, either as a primary variable MFL or a complementary phenomenon (EC, EMATs). FEA is shown as a fit-for-purpose tool to design, understand and optimise ENDT systems, or a Reference for other modelling algorithms. The review intentionally omits the fundamentals of FEA and detailed principles of NDT. Strain-stress FEA applications in NDT, especially in ultrasonography and hole-drilling methodology, deserve as well a separate study.

Keywords Finite element method · Electromagnetic non-destructive testing · MFL · Eddy current testing · EMATs

1 Introduction

Non-destructive testing and evaluation (NDT, NDE or NDTE) attracts lasting attention driven by demands of reliability and economic service of engineering structures. Contemporary engineering—and NDT development in particular—becomes increasingly associated with numerical modelling [1]. Among available modelling approaches, finite element analysis (FEA) has taken the lead in both academic and commercial applications. It is much more versatile than any analytical model. As compared to two major concurrent numerical approaches, i.e. boundary element method (BEM) and finite difference method (FDM), it is more intuitive, subject to less

fundamental limitations (e.g. concerning unstructured mesh, nonlinearities or couplings) and is promptly available in several computer tools provided with a comfortable graphical user interface (GUI) and exhaustive user manuals.

Finite element analysis can complement and partially replace experimental ENDT for reasons listed below:

- the simulation allows for generating scenarios with a full control over all variables and phenomena
- it is impractical and in some cases unfeasible to measure electromagnetic parameters (magnetic induction, current density) inside a solid specimen [2], whereas these can be easily retrieved from FEA
- the measurement of a detailed distribution of the magnetic and/or electric field around an engineering object is time-consuming and requires painstaking data processing; by contrast, FEA software directly generates the resulting contour plots
- FEA tends to be more economic than experiment, especially when generating an array of results for subsequent inverse problem solution

Table 1 presents authors' attempt to arrange the techniques by the frequency range and the level of complexity. The latter variable corresponds to both the underlying physics and the practical difficulties in obtaining reliable results by either experiment or simulation. Any ENDT method,

Table 1 A classification of ENDT methods by the range of frequency and relative complexity; numbers in parentheses indicate the relevant paragraph in the review

Complexity	passive MFL (5.3)	MBN and MAE (2.3)	Electromagnetic waves (5.1)
	MFL w. velocity effect (2.2)	Pulsed MFL (2.3)	EMAT (4)
	Static MFL (2.1)	RFECT (3)	ECT (3)
	Static	1 - 1000 Hz Frequency of excitation	kHz - MHz

including those located at the bottom of the classification, require careful calibration and interpretation. Therefore, the table contains only subjective indications. For exam-

ple, remote field eddy current testing (RFECT) actually is superior in terms of complexity than the static MFL technique.

The choice of ENDT technique influences the strategy of finite element simulation. The key options to be selected in an electromagnetic numerical analysis are summarized below:

- time regime: static/harmonic/transient
- coupling (multiphysics): none/weak/strong
- boundary conditions: flux-parallel, flux-normal, fixed degree-of-freedom (DOF), coupling of DOFs
- nonlinearity: none/nonlinear B(H)/material anisotropy/ velocity effects
- element formulation (magnetic scalar or vector potential, edge-flux formulation)
- dimensionality (2D/2D-axisymmetric/3D)
- software (commercial/academic)

Simulation options listed above are described in more details in [6].

There are several commercial electromagnetic FEA software brands on the market, including MagNet, COMSOL, JSOL, MAXWELL, ANSYS Multiphysics, OPERA, FLUX

and others. Their basic common functionality is computation of magnetostatics or electrostatics. Most codes can handle as well harmonic or transient problems involving eddy currents. Some tools are remarkable for the implementation of advanced functions, such as the magnetic hysteresis loop or a robust solution of a moving conductor induction. However, the market evolves rapidly, and the functionality of different tools tends to converge.

Important contributions of numerical modelling to ENDT are reported in three major groups of publications. Firstly, some monographs are available on the application of finite element method in electromagnetics [7–9]. In some of the books the electromagnetic NDT is the major topic [10,11]. Secondly, there are regular journals devoted to progress in NDT (incl. NDE, NDT&E, RNDE, “Insight” and others) containing both numerical and experimental

developments in the field. Finally, an eminent dissemination role is played by proceedings of major NDT-related conferences (ISEM, ENDE, ECNDT), where simulation and modelling tends to be a full-fledged topic. For the sake of example, several recent papers from the ENDE Proceedings [12–17] have been summarised further on in this review.

Bibliographic reviews on FEA applications in various engineering disciplines were systematically published by Mackerle (e.g. [3,4]), including an exhaustive bibliography on finite element modelling in NDT [5], encompassing the time span between 1976 and 1997 (plus an addendum reaching 2003). In the domain of electrical, magnetic and electromagnetic methods, that review focuses on ECT and the potential drop technique. Our review is complementary to the valuable Mackerle's work, offering up-to-date references and a discussion of specific features of modelling ENDT phenomena.

The following chapters present a review of finite element simulations applied in ENDT, followed by a discussion inspired by own experience in the field. In each chapter one ENDT method is briefly introduced, and some technical aspects of its finite element solution are given. Representative papers in the field are mentioned starting from the 1970ties. Alternative numerical methods and less typical ENDT applications are occasionally invoked. Although the Authors intended to provide a possibly comprehensive and balanced summary of the subject, this review remains a very individual and subjective insight into the vast amount of the published literature.

2 FEA in Magnetic Flux Leakage NDT

2.1 Static MFL

Static MFL methodology involves magnetizing a portion of a structure and recording the flux at the surface, in order to detect its anomalous spatial distribution. Usually a local magnetization close to saturation is required, because a leakage flux amplitude is generally proportional to the magnetization level. However, too high level of magnetization may lead to decrease a signal-to-noise ratio. The reason is an offset introduced by a background component of the signal. Most common sources of a magnetizing field, electromagnets or yokes with permanent magnets are used.

To design and optimize any MFL system a thorough understanding of magnetic circuit is required. The magnetostatic FEM solver is an efficient tool in MFL-related design and analysis [18]. The FEA solution of a MFL problem requires either a single nonlinear run (static analysis with $B(H)$ curves) or a series of solutions at consecutive time points (transient analysis). The modelling can be 2D or 3D. The material data consists of magnetization curves defined up to saturation ($\mu R \sim 1.0$) and possibly electrical conductivities in the transient problem. The smoothness of $B(H)$ curves can be essential for obtaining convergent solution [19]. The mesh density may be uniform, and the standard recommendation holds as to using the hexahedral element shapes whenever it is possible. The resulting vector fields (primary: B —the magnetic induction, and secondary: J —the current density) are vector real values. The numerical methods which cannot deal with nonlinear problems (e.g. BEM, FDM) are not suitable for MFL

simulation [20]. Consequently, FEM is preferable in solving the equations governing electromagnetic field in MFL system.

One of the first numerical studies on the MFL defect-toscopy including finite element calculation was published by Hwang and Lord in 1975 [21]. They predicted the magnetic field distribution around a rectangular slot on the surface of a circular ferromagnetic bar. The stress-flux correlations were numerically studied as early as in 1987 by Atherton and Czura [22]. They attributed the measured flux leakage over pipeline corrosion pits to stress-induced permeability changes and provided a 2D FEA to solve the inverse problem, i.e. to determine, how significant permeability change takes place in specimen.

The article [23] includes a study, in which apparently minor modifications of a model (inclusion of the detector assembly) produced dramatic qualitative changes of the results. It was demonstrated by 2D FEA, that anomalous leakage fluxes in the vicinity of pipe defects were non-linearly dependent on a defect depth. Further on, the constant H-excitation in a model gave significantly different results from a more realistic constant-B source.

In Atherton [24] a systematic study was performed towards the inverse problem solution of MFL over far side pipe grooves. The author demonstrated a strong linear correlation between anomalous radial flux densities calculated with 2D FEA and those obtained experimentally from 3D synthetic corrosion pits.

The following paragraphs summarise selected results of more recent research

The magnetostatic NDT was modelled with FEA by Al-Naemi, Hall and Moses [18]. The 2D (qualitative) vs 3D (quantitative) models generated and computed in MagNet software were compared against an experiment. The study reproduced the typical stray field behaviour over a defect in a flat plate. Although material data description is missing in the paper, one may presume that linear magnetic permeability was defined.

In Katoh et al. [25], the yoke-magnetization in MFL-testing was modelled with 2D static FEM modelling, using a self-developed software. The simulation was relatively basic, and did not aim at solving any inverse problem.

Another basic sensitivity analysis of the static magnetic circuit composed of a C-core magnet and the metallic specimen can be found in [26]. Linear magnetic permeability of the material, the core length and the spacing were modelled with COMSOL Multiphysics. Although the Barkhausen noise measurement was presented as the study's context, only the primary variables, i.e. magnetic induction B and field intensity H were computed.

Gaunkar et al. [26] redesigned the C-core magnetising setup with COMSOL FEA software, studying the influence of a core material, pole spacing and pole tip curvature. They employed a DC excitation and did not take saturation effects into account.

Babbar et al. [27] represented both the shape and residual stress influence on MFL patterns, over a slightly stamped (dented) plate. They used MagNet software to perform a static solution with a nonlinear, anisotropic B(H) curves. Interestingly, apart from the electromagnetic analysis, they started with structural FEA, subsequently dividing the plate into 13 discrete regions, having varying magnetic properties correlated with stress state. The MFL signal resulting from different stressed regions were studied separately and in combination with the shape effect. The authors found the excellent agreement between the FEA-derived and experimental MFL pattern.

Some papers with a precisely defined industrial context are invoked in the following paragraphs.

Christen et al. from Switzerland [1] examined the influence of steel wrapping on magneto-inductive testing of the main cables of suspension bridges. They employed MagNet software to create and solve a 3D model of a 2 m-long solid body with nonlinear B(H) characteristics. The set-up optimization was sought, by studying the effect of a sensor lift-off and a magnetic excitation intensity. Based on the FEA results, a postprocessing procedure was proposed for separating and eliminating disturbance introduced by the steel wrapping.

In Gloria et al. [28] the pipeline corrosion defects were detected with a modified MFL, not requiring the saturation of a material. 2 and 3D numerical models were constructed using Gmsh and GetDP freeware finite element programs, and the geometrical parameters of the set-up were optimised. The simulation was compared favourably against an experiment.

A NDT group from India [29] examined with MFL steam generator tubes of a prototype fast breeder reactor. They created a 3D magnetostatic FEA model in COMSOL. They suggested a parallel use of MFL (for a detection of localised defects) and remote field ECT, sensitive to wall thinning, although no ECT simulation was provided.

A group from Queen's University, Canada [30], created a 3D magnetostatic model in MagNet software, in the context of pipeline MFL NDT. Effects of alignment of nearby pits and stress-induced anisotropy were studied in a non-linear model.

Kikuchi et al. [31] examined the feasibility of NDT evaluation of magnetic properties and hardness of two-layered specimens by magnetostatic single-yoke probes. In spite of using a 2D approach in a simulation, they observed a good correlation between experimental and FEA-derived initial magnetisation curves for layered plates.

Coughlin et al. [32] examined the effect of stress on MFL responses from elongated corrosion pits in pipeline X70 steel excited with radial MFL set-ups. In this case the finite element 3D stress simulation was carried out, but no magnetic FEA.

The magnetic “signature” of cracks has been subject to relatively little research, as compared with the effect of stress or corrosion pits. Gao et al. [15] have published their results in ENDE Conf. Procs., claiming the competitiveness of their method of interpreting flux leakage near cracks over the standard 3D MFL approach. The standard 3D MFL, in turn, was numerically studied in [33], and an efficient yet accurate inversion algorithm in 2D was produced.

Some atypical usages of numerical simulation as a supportive tool for MFL are presented below.

Snarskii et al. [34] proposed a method of integral equations for the 3D solution of MFL over a surface defect in a plate of a finite thickness. They demonstrated the same accuracy as in FEA (Opera 3D software), but higher robustness. The demonstrated computation speed-up can be important when generating a large database of direct problem patterns, required for any inverse problem solution.

Mahendran and Philip [35] discussed a new magnetic emulsion to enhance visual magnetic NDT. Moreover, they included a comprehensive review of analytical methods of reproducing the field distribution, and pointed to some FEA-based studies, including that by Katoh et al.

Mukhopadhyay and Srivastava [36] tested efficiency of a discrete wavelet transform for a noise reduction MFL signal from a series of defects in a buried pipeline, and claimed the superiority of the method over its alternatives.

The observed trends and perspectives of further research are described in the last chapter of this preview.

2.2 MFL(V): Velocity Effects

High-speed non-destructive inspection systems using MFL method are in great demand in online inspection and defect characterisation, especially in pipeline and rail track maintenance [20]. The main component of these systems is an autonomous mobile device containing magnetic field sources and sensors, usually named pipeline inspection gauge (P.I.G.). Such a NDT set-up aims at deducing the shape and dimensions of a flaw, out of the voltage induced in a pick-up

coil moving relatively fast (e.g. 1–10 m/s) along a studied structure.

MFL with the velocity effect shares the fundamental principles with the static MFL. An additional difficulty, in a signal interpretation and modelling, stems from the formation of eddy currents when an excitation source moves over or inside a pipeline. The first

typical numerical approach to this problem is quasi-static, i.e. the simulation resembles the magnetostatic one, but an extra movement component is added to the governing equation (e.g. [37]). Another approach consists in representing the movement of the set-up over several time-steps, applying some type of electromagnetic coupling between the objects in the relative movement (e.g. [38]). Both the approaches encounter numerical difficulties (inaccuracy, nonconvergence) as the relative velocity and material's magnetic permeability increase.

The start of finite element modelling of MFL with the velocity effect dates back to the 1980s (e.g. Shannon and Jackson [39] or Rodger et al. [40]). The effect of magnetizer velocity on MFL was subsequently simulated in 1992 by Nestleroth and Davis [41] using axisymmetric FEA, followed by works of Katragadda et al. [42,43].

Park and Park [44] analysed the velocity-induced eddy currents in MFL type ENDT, constructing a 3D finite element model. They designed a compensation scheme of the signal distortion, for velocities of the PIG reaching 5 m/s, coming up with a 'pure' defect-related signal, as if the probe is immobile. Ireland and Torres [45] presented 2D finite element simulations in which a section of a pipe is magnetized along its circumference under both static and moving tool conditions. They employed the standard quasi-static approach with velocity equation component. They highlighted difficulties associated with maintaining a stable magnetic circuit when the set-up is moving. They noted, that a magnetic field profile is extremely complex under both stationary and dynamic tool conditions, and the repeatability of MFL defect patterns can be poor.

In another work [46] the same authors presented a preliminary research on a circumferential magnetizing set-up for pipeline inspection. They performed a dynamic FE analysis for the tool moving at 4 m/s. Both 2 and 3D models were generated, and the B(H) nonlinearity was taken into account. Several limitations and complexities of the method were indicated, including the difficulty to magnetize a pipe circumferentially and the dependence of the signal on the angular position of the set-up.

Li et al. [20] performed a simulation of MFL in a pipeline, with the set-up travelling at high speed, up to 30 m/s. The 2D model (quasi-static with velocity terms) is created in ANSOFT Maxwell. The authors discussed the signal-to-noise ratio and the optimum configuration of sensors.

Nestleroth and Davis [47] studied pairs of permanent magnets rotating around the central axis of a pipe in proximity of

its surface. The generated magnetic field was measurably disturbed over a defect. A finite element simulation, validated with experimental data, allowed for investigating a design space with various parameters such as a geometry, material properties, and excitation frequency.

The mentioned works are a representative, but non-exhaustive selection from amongst numerous studies on MFL with a moving source. New research results regularly emerge (e.g. [48,49]) and the subject is likely to attract lasting attention from the NDT community.

2.3 MFL(f): Frequency Effects

Judging from the number of publications and commercial implementations, the magnetic Barkhausen effect is the most important among micromagnetic phenomena applicable in ENDT. There is a significant amount of experimental articles aiming at elucidating the nature of MBN [50–52]. The micromagnetic modelling approaches to MBN representation were recently reviewed by Zapperi and Durin [53], and some results from stochastic (Monte Carlo) models were published as well [54]. However, relatively little has been done so far to develop macromagnetic or multiscale modelling schemes.

When using a C-core magnet in ENDT, replacing a DC excitation (typical for MFL) with a low-frequency (0–10 Hz) AC excitation allows acquiring additional data from the studied object, however the interpretation of signals is a challenging task. FEA plays an irreplaceable role in a comprehensive description of a time- and space-distribution of the magnetic induction within a studied object (plate, tube), which is impossible with any available analytical or experimental method. The FE solution of a magnetic field distribution inside a bulk ferromagnetic object is complicated by the fact, that excitation frequencies as low as 1 Hz generate a skin effect, which significantly disturbs the static field patterns [55–57]. Additional, special degrees of freedom (D.O.F.s) such as time-integrated electric potential may be necessary. Symmetry planes and initial conditions require special modelling approach. A time-transient scheme is preferred over a harmonic calculation, which usually leads to an incorrect representation of skin-effects due to the assumed B(H) linearity.

Augustyniak et al. [58] showed, that both the magnetic Barkhausen effect and the magnetoacoustic emission in a steel plate magnetized by a C-core electromagnet are significantly disturbed by eddy currents at excitation frequencies as low as 1 Hz. At least qualitative characteristics of these effects can be reproduced with FEA (ANSYS).

Another sensitivity analysis of the static magnetic circuit composed of a C-core magnet and the metallic specimen can be found in [26]. The material linear magnetic permeability, core length, and spacing were modelled with COMSOL Multiphysics. Although the Barkhausen noise measurement was presented as the study's context, only the primary variables, i.e. magnetic induction B and field intensity H were computed.

The Japanese group [59] focused on standardized samples used to assess the average induction within an object magnetized dynamically with a C-core set-up. They built a 3D model of the C-core and plates, made of different steels, and concluded, that the standard shim is applicable only to materials exhibiting a high magnetic permeability. Interestingly, they made use of a pseudo-nonlinear harmonic FEA instead of a fully-nonlinear time-transient solution, and found acceptable comparison against experiment.

A recent work [57] presents a detailed analysis of a time- and space-distribution of the nonlinear magnetic field inside a steel plate magnetized with a double-core electromagnet with a separate control of AC excitation currents on both branches. These results, obtained with transient electromagnetic FEA are complementary to the previous research by Nagata [60], who applied the method of boundary elements for calculation of magnetic fields and eddy currents induced by a pair of orthogonal C-cores.

Another step after having determined the magnetic field time- and space-distribution is reproducing the characteristics of Barkhausen effect or magnetoacoustic emission. In both ENDT methods there is an interaction of external, macroscopic excitation with microstructure, generating a series of short signals, either magnetic (MBN) or acoustic (MAE).

Spanish team [61] focused on angular anisotropy of MBN in pipes due to hot-rolling. Microscale FEM simulations of the magnetic flux density in an idealized steel sample containing the ferrite matrix and the pearlite bands were performed.

Pulsed MFL belongs to the methods under development.

It bears some analogy to the acoustic borehole logging, i.e. the frequency content of the magnetic field resulting from a pulsed excitation carries information about the depth and extent of possible anomaly. Researchers from the University of Huddersfield [62] put forward a pulsed magnetic flux leakage technique (PMFL) for a crack detection and characterization. They indicated the limitations of a DC MFL, and suggested the superiority of PMFL, where the probe is driven with a square waveform and the rich frequency components can provide information from different depths due to the skin effects. They used FEMLAB (a transient, 2D, finite difference scheme) to study effects of surface and sub-surface cracks on the magnetic field.

Finally, an interesting hybrid MFL method called magneto-optic direct alternating imaging (MODAI) was studied by Novotny et al. [63]. They applied 2D harmonic FEA to demonstrate the feasibility of detection of defects by magneto-optic films. The optical effect was produced by either an AC or DC excitation. The authors investigated the

AC excitation at 10 kHz and claim the possibility of detecting small cracks, weak magnetic phases in nonmagnetic materials, corrosion pits, etc.

3 Eddy Current Testing (ECT)

Eddy current testing (ECT) is one of the most effective techniques for detecting cracks and flaws in conducting materials. In ECT devices, an alternate current flows in an exciting coil placed near a specimen suspected to have a flaw. Induced eddy currents affect a signal detected by the surrounding pick-up coils, influenced by a position, shape, and other characteristics of defects or variations of material properties [64]. The signal is usually analysed in terms of complex impedance plane trajectory. A magnitude and phase of a voltage drop induced in a detection coil is influenced by a variation of geometry and material parameters (μ , σ) of the studied object. The method applies equally to ferromagnetic and paramagnetic materials, including aluminium alloys. ECT techniques are widely (but not exclusively) used for the characterization of safety-critical components, e.g. employed in aeronautical and nuclear engineering.

A FEA solution of an EC problem requires a single harmonic linear run for each frequency of interest. A modelling can be axisymmetric, 2D or 3D. Material data consists of linear magnetic permeabilities and electrical conductivities of all the regions. The resulting vector fields (primary: J —current density and secondary: B —magnetic induction) are composed of real and imaginary parts, convertible into a magnitude or phase. Unlike in a harmonic structural analysis, resonances do not occur, so sampling of frequency at relatively large intervals is acceptable. A mesh density has to be refined within a sub-surface of an object in order to adequately represent the skin depth effect. An integration of B over the coil's cross-section and a subsequent time derivation produce an acceptable approximation of the coil's complex impedance, provided that the frequencies are limited so that the skin effect in the coil wire can be neglected. More discussion on numerical approaches to eddy currents can be found in [6]. Another valuable reference is the TEAM Workshop Project [65], involving FEA simulation benchmarks of several electromagnetic set-ups, including some EC-related problems.

First attempts to reproduce eddy current characteristics with FEA date back to late 70ties [66]. In the 80ties, intense research was conducted, led by Ida, Lord, Udpa and others [67–70]. Industrial case-studies were developed, e.g. the study by Palanisamy and Lord [71] focusing on a condenser tubing.

Design and validation of a new sensor configuration is one of leading topics in EC NDT and is often supported

with FEA [72–74]. Aiming at an optimized sensor configuration, Robaina et al. [75] developed a 3-coil set-up with two excitation coils and a middle acquisition coil, serving to determine material properties by means of an eddy-current-related change of a magnetic flux. Apart from the experiment, they produced an ANSYS model of the coils, calculating the electric potential inside the coil wires, the resulting magnetic flux, and finally the eddy current density inside the copper sample. Nonlinearities were neglected because of a relatively low field and current density values.

EC-sensor optimization was as well the main objective of the TEAM problem no. 27 [76], with eddy current NDT applied to some deep flaws. The aim was to optimize dimensions of a coil and an excitation current to have the highest level of a signal as possible. It is interesting to note, that the eddy currents were excited by a pulsed voltage excitation, and not a harmonic steady excitation.

In a study dedicated to ECT defectoscopy in airplane maintenance, Rosell and Persson [77] performed an experimental eddy current inspection of small fatigue cracks in Ti–6AL–4V sample and compare it against a finite element model. They noted, that as static loads were applied across the crack faces, electrical connections arise within the crack, which has a strong, detectable influence on the eddy current signal. The work focused on optimum method of incorporating this electrical contact effect into the simulation.

Apart from defectoscopy, the EC set-ups can be used to evaluate some material properties, including electrical conductivity, magnetic permeability, porosity, and tensile strength. One of basic examples is the TEAM benchmark no 15, concerning a non-destructive evaluation of materials with ECT. In another example, Ma et al. [78] created a FE model in Ansoft Maxwell representing a double-coil eddy current testing set-up over samples of Al foams manufactured by the sintering-dissolution process. Simulations gave a multi-frequency (10 Hz–1 MHz) response

of the sensor/material geometry for 22 conductivities in the range of 0.1 to ~40 MS/m. The response was proportional to a change of mutual inductance of coils. The

ultimate goal of both the experiment and the accompanying simulation was a reliable porosity evaluation with eddy currents.

In Augustyniak et al. [79], both a 2 and 3D modelling of a three-coil EC set-up over a boiler tube was presented and compared against an experiment.

Standard practical

factors—lift-off, wall thickness and tube diameter were studied with FEA at frequencies up to ~ 10 kHz. The proposed amplified differential signal was shown to carry information

on the amount of magnetic ferrite phase forming on the tube during service.

Sablik and Augustyniak [80] proposed an application of EC sensors in the context of steel mills. Transient 2D a set of harmonics, and their relative amplitudes were compared. Both the computation and experiment show an increase of the amplitude of the third harmonic with an increasing tensile strength of the plate.

Remote field eddy current testing (RFECT) is a major, industrially important variation of the standard eddy-current defectoscopy. While in conventional ECT, an exciter and detector coils are placed at the same location and operate at relatively high frequencies (1 kHz–10 MHz), in the RFECT both coils are several pipe diameters apart with a low frequency of operation from 40 to 160 Hz. The choice of a frequency reduces the skin effect and enables detection of flaws localized at the opposite side of the examined object, usually a pipe. In the 1980ties, RFECT phenomena were already experimentally observed successfully analysed using the finite element method. [81–84]. In Kim et al. [85], RFECT was applied to corroded gas transmission pipelines. Initial FEA studies showed that the rotating magnetic field PIG is sensitive to axially oriented tight cracks. Kasai et al. [86] performed an experimental and FEA 3D study in order to assess detectability of back-side flaws on flat ferromagnetic plates, in the context of corrosion of oil storage tanks. They modified the sensor and examined the signal itself as well as the signal-to-noise ratio. In the context of ENDE conferences, Mihalache et al. [17] developed a multifrequency RFECT algorithm applied specifically to the magnetic steam generation (SG) tubes of a fast breeder reactor (FBR). They determined algorithm parameters using proprietary 3D numerical FEA, and validated the concept with experimental measurements conducted on a small test tank.

FEA was successfully employed in non-standard EC techniques, including pulsed eddy-current defectoscopy [87] and stochastic approaches [88]. A special case was published by Kinoshita [89], who used MAXWELL 3D software to reproduce static and harmonic behaviour of magnetic field. The proposed ‘electromagnetic impedance’ NDT method was supposed to be able to detect fatigue progress of an aluminium alloy plated with ferromagnetic Ni–CO–P material. A permanent magnet in the simulation had a nonlinear anhysteretic $B(H)$ relationship. The fundamental system relationship is determined between the coil’s differential impedance and strains in the sample.

The modelling of pulsed ECT has been extensively covered in recent editions of ENDE conf. proceedings. Three examples have been selected for this review. Zhang et al. [12] performed the 2D-FEM simulation in ANSYS reaching a successful correlation with an analytical model implemented in MATLAB. The problem at hand concerned pulsed eddy currents produced in a ferromagnetic plate with a flat bottom hole. Miorelli et al. [14] proposed a concept of surrogate models of Pulsed ECT, validating them in 3D using COMSOL. Finally, Xin an Lei [13] addressed a difficult problem of incorporating minor hysteresis loops into the calculation, in the context of measurement of pipeline wall thickness.

As popular and useful as it is, standard FEA is not the only approach to EC numerical prediction. Fetzner et al. [90] put forward a coupled FEM-BEM solution of the TEAM problem no. 8, concerning eddy-current NDT. They argued, that representation of the surrounding air with boundary elements greatly reduced computational effort.

Another alternative approach consisted in coupling FEA with some non-standard algorithms. For example, Ida [91] has recently proposed the coupling of FEM with surface impedance boundary conditions (SIBC), allowing elimination of the mesh in a conductor beyond the skin depth zone, thus increasing the speed of the solution without compromising accuracy. Similarly, Sabbagh and co-workers put forward an eddy-current NDT modelling scheme based on volume-integral equations [92–94]. The approach proved to be very successful in the computation of flaw responses in a number of simple geometries, but exhibited limitations in description of complicated surfaces.

More details on ECT methodologies with some references to numerical modelling can be found in [95].

4 EMATs (Electromagnetic Acoustic Transducers)

NDT based on EMATs is remarkable for its capability of detecting defects situated far away from an excitation source. The method can be considered as an extension of the standard ultrasonic defectoscopy particularly well suited for non-contact wave generation. EMATs work on nonmagnetic conducting materials (Lorentz force), or ferromagnetic materials (combination of Lorentz force, magnetostriction and magnetization forces). Optimization of EMATs in ferromagnetic materials is often accomplished using computational simulations that account for all the mentioned three main types of transduction mechanism. However, modelling the magnetization force is the least understood part of EMAT simulation and various authors often use controversial methods that lead to contradictory predictions. The discussion of these controversies has been avoided

in this review, therefore only the papers considering the Lorentz force and/or magnetostriction are cited.

Although EMATs are broadband transducers and can function with pulsed excitation, they are often excited with a narrow band tone burst to maximize the signal-to-noise ratio, and the majority of simulations deal with a sinusoidal single-frequency excitation.

FE analysis of EMATs represents elastic wave propagation resulting from local application of magnetic fields. It is usually composed of weakly coupled electromagnetic and structural (ultrasound) analyses. The electromagnetic FEA involved determination of a distribution of a static (bias) magnetic field, followed by a transient or harmonic calculation of time-varying B, eddy currents and Lorentz forces. Explicit solvers (ABAQUS Explicit, LS-DYNA, RADIOSS) are best suited for the structural part.

First numerical representations of EMAT date back to the 70ties, with the works by Thompson [96] and Kawashima [97]. Majority of subsequent works were oriented towards an improvement of set-up's performance by modification of geometrical parameters.

An EMAT was modelled in 2D and experimentally tested by Hao et al. [98] They generated a sequence of finite element calculations for a static magnetic field, a pulsed eddy current field, and resulting transient ultrasonic wave.

An exhaustive work by Mirkhani et al. [2] presented a practical numerical study aiming at enhancing the characteristics of an EMAT set-up (mainly signal-to-noise ratio). The FEA strategy included ANSYS EMAG computation followed by LS-DYNA 2D representation of ultrasonic waves. The pre-processor HyperMesh was applied at the latter stage, with the maximum mesh size equal to $\lambda/15$.

Wang et al. [99] proposed an enhancement to the previous FEA models of an EMAT, taking into account a dynamic magnetic field in a meander coil, coming up with the distribution of eddy currents, static magnetic field, Lorentz forces and resultant elastic waves. The FEA results corroborated with an experiment.

Dhayalan [100] presented a numerical analysis of multimode Lamb waves interacting with artificial defects and compares these calculations with measurements on a thin aluminium plate. They started with a 2D electromagnetic model (COMSOL software), reinserting resultant Lorentz forces into a subsequent ultrasonic computation (ABAQUS Explicit).

Kim et al. [101] employed ANSYS to reproduce the magnetic transducer consisting of a nickel grating, permanent magnets providing static bias magnetic field and a set of coils supplying or sensing a time-varying field. They used a

topology optimization scheme over the permeable area of a transducer, in order to maximize both the static bias induction and the time-varying excitation field.

Dutton et al. [102] proposed a novel configuration of permanent magnets in an EMAT, consisting of two square magnets with similar magnetic poles facing each other. Effects of pole separation and lift-off were investigated. Both a simulation (FEMLAB) and an experiment consistently indicated an increase of the achieved magnetic induction in the region of interest by a factor of 1.8, as compared with a conventional one-magnet solution.

Huang et al. [103] applied ANSOFT FEA software to study optimum lift-offs in an EMAT system producing US

waves at 250 kHz, designed so that only a magnetostrictive contribution took place in the specimen. They concluded, that the lift-off of a receiver could be very small, but the lift-off of a transmitter should be around 2 mm to ensure the stability of the system.

Zhou et al. [16] developed a FEM-BEM hybrid model to study the electromagneto-mechanical coupling influence on the simulated EMAT signals, considering the presence of the magnetostrictive force as well as the Lorentz force.

In spite of extensive published research, some fundamental controversies remained, including that defined by Ribichini et al. [104]. The question of major mechanism of elastic wave creation in ferromagnetic objects was asked: is this predominantly the Lorentz force, or rather magnetostriction? Using a COMSOL FE model, they demonstrate inconsistencies in previous studies and conclude that the Lorentz force usually dominates, except for highly magnetostrictive materials, such as nickel, iron–cobalt alloys or ferrite oxides.

5 Other ENDT Methods

5.1 Methods Involving Electromagnetic Waves

Although X-ray defectoscopy is one of the most popular NDT methods relying on electromagnetic wave propagation/absorption, it does not lend itself to standard FEA. Finite element simulation of the wave phenomena typically requires a mesh density of order of $\lambda/10$, so Angstrom-scale of Roentgen rays make reliable 3D calculations impossible for even most powerful computers available at present. However, waves of higher length (including microwaves) can successfully be simulated, which was demonstrated in some papers [105–107].

Electromagnetic wave propagation is the key phenomenon in electromagnetic emission (EME), sharing many features similar with the acoustic emission (AE).

In case of a crack initiation and propagation, a temporary electric charge imbalance is a source of an electromagnetic wave measurable within a distance of a few millimetres [106].

Gade et al. [106] applied COMSOL commercial software to study the main characteristics of an EME sensor and obtained a very good correlation between the experiment and modelling. They claimed, that during the crack growth, an electromagnetic wave of acoustic frequency could be detected within a few mm from the surface of the studied epoxy resin object, and that EME could be a useful complementary tool for classic AE NDT.

It has to be underlined, that problems involving electromagnetic waves are more efficiently solved using other numerical approaches than FEA, such as Method of Moments (MoM) or finite difference in time domain (FDTD) [108].

5.2 ENDT Involving Static Electric Potential

NDT methods making use of an electric field as a primary factor are electrical impedance tomography (EIT) and electrical resistance tomography (ERT), being a particular case of the former. They do not involve any magnetic phenomenon and can be solved with FE (e.g. by Trefftz method) with electric potential as a single DOF. Contrary to ECT, the current sources in EIT/ERT are in electrical contact with a conducting object to be tested. The source field is produced by a direct current (DC) or by an AC source at very low frequency. Potential drops or local electric field measurements are often preferred to impedance or local magnetic field measurements, which are typical for ECT.

Although EIT/ERT was invented in the 80ties, the research results with a FEA background were first published after 2000.

Szczepanik and Rucki [109] performed a field analysis and investigated electrical models of multi-electrode impedance sensors. Two types of multi-electrode sensors, used in the impedance tomography systems, were simulated with FEA (COSMOSM software) in order to produce a simple, practical lumped-parameter model. Both the full (FEA) modelling and the simplified representation were successfully validated by the experiment.

Kahunen et al. [110] applied ERT to 3D imaging of concrete. They used an in-house software for both the forward and inverse analysis. Acceptable solutions of the inverse problem in some benchmark set-ups were presented.

Albanese et al. [64] made an initial evaluation of the usefulness of FEA in solving direct and reverse problems in an electrostatic search for buried objects. They carried out two benchmark simulations and experiments. ERT was used to

retrieve the shape of a thin crack, and subsequently the geometry of a column immersed in water. Genetic algorithms were used to solve the inverse problem.

Daneshmand [111] and his co-author modelled the EIT to solve a forward problem in a biomedical context (a human thorax). The technique had been studied using FEM or BEM by other authors, but the novelty consisted in proposing a hybrid FEM-BEM strategy, combining advantages of both.

5.3 Passive MFL (MMM)

The “passive” MFL (sometimes called MMM, from “Metal Magnetic Memory”) is a relatively new concept (1990ties), replacing a controlled magnetic field source with the Earth’s field. Claimed cost-effectiveness of a simple portable measurement set-up has to be weighted against low reliability, leading to false-positive or false-negative findings. In spite of the official industrial standardisation (ISO 24497), there is

a shortage of fundamental studies, especially those demonstrating its aptness to detect and quantify stress concentrations.

Interestingly, the magnetic FEA, useful as it proved in the standard MFL research, has rarely been used to understand, calibrate and optimize the methodology of passive stray field technique. The only published applications of numerical magnetic analyses in this context are either non-conclusive [112], or bring forth arguments against the concept [113– 115].

Zurek [112] presented a preliminary study of contactless magnetostatic stress measurements on a ring made of a plain carbon steel. The results were partially successful, because a limited number of strain gauges did not allow the exact determination of stress and strain changes on the external ring surface. Both the magnetostatic (FLUX2D) and structural FEA (NASTRAN) was performed.

Usarek et al. [114] investigated the influence of the Earth’s magnetic field on the distribution of stray magnetic field of a S355 steel sample, either undeformed or plastically deformed. A simple 3D model generated spatial variation of normal and tangential B component in agreement with the experimental data. The article concluded, that a reliable analysis of the stray magnetic field signal required balanced consideration of several factors, such as geometry of the element, plastic strain, and both internal and external stresses.

In a follow-up study, Usarek et al. [115] aimed at the separation of the effects of notch, magnetic permeability and macroscopic residual stress on the MFL signal characteristics. Experimental, as well as magnetostatic FEA, showed that geometrical effect, related to the notch presence, as well as degradation of magnetic

permeability in the yielded zone, were mainly responsible for the specific MFL distribution above the sample.

In Augustyniak and Usarek [113] the magnetostatic 3D FEA was applied to study the influence of concurrent factors (geometrical discontinuity, magnetic permeability and remanent magnetisation) on the field strength gradient, claimed by some MMM proponents as correlated with elevated residual stress. The sensitivity study revealed, that the field gradient did not carry enough information to allow solving of an inverse quantitative problem, so determination of stress levels with a magnetic passive stray field alone is impossible. The effect of residual stresses in the studied dog-bone sample was found to play minor role.

The published works indicate, that too many uncontrollable factors make passive MFL (or “MMM”) unsuitable for a reliable quantitative assessment of stresses or material degradation. Numerical analysis served in this case to demonstrate the ambiguity of signal recorded in the passive MFL, and helped to better define the scope of applicability of the method. Summary and Perspectives

5.4 Research Trends

The reviewed papers include four types of correlation between the simulated and measured results:

- simulation not referred to any experiment [56,104]
- qualitative correlation with an experiment [74,75]
- relative quantitative correlation [106,117]
- absolute quantitative correlation [97,113]

Relative quantitative correlation is defined here as demonstrating the same percent variation of modelled and measured signals, with differing baseline values, typical for 2D modelling. Often it is not possible to make a sharp distinction between relative and absolute correlation, as in [106], where the measurement is presented in terms of voltage, which naturally is influenced by tunable amplification factor. If no reference to an experiment is provided, the paper should clearly demonstrate the soundness of modelling assumptions, and ideally be succeeded by another, experimental work.

In general, finite element analysis serves in every domain of ENDT as a complementary tool for better visualisation and analysis of phenomena at play, set-up optimisation/calibration, and the means of populating a matrix of results for subsequent inverse problem solution. However, application of numerical analysis in each ENDT method exhibits some unique tendencies.

In static MFL, the range of simulation roles is broad: studying the stress or defect influence on stray field [27], optimising a set-up [1–26], and finally providing a reference solution for some special alternative numerical scheme [34]. One of the most advanced works in the field was that by Babbar [27], with a non-trivial geometry, non-uniform stress distribution and non-linear $B(H)$ curve, and an excellent agreement between FEA and experiment.

In MFL with velocity effects the defectoscopy of pipelines and its numerical representation is the grossly dominating topic in scientific papers. One of most remarkable achievements was published by Park and Park [44], who put forward a compensation scheme for the signal from a moving PIG, of direct practical use for the operators.

Research on MFL with AC excitation usually aims at a realistic description of the dynamics of magnetic induction within a magnetic circuit composed of a C-core magnet and a studied ferromagnetic object.

In ECT, the leading topic is the design and optimisation of new sensor configurations. Most of the studies feature a well-defined industrial context (aviation, power plants, steel plants).

Simulations of EMATs usually aim at enhancing the signal-to-noise ratio by reshaping a excitation/detection probe. Among several papers seeking to optimise a transducer, that by Ribichini [104] is remarkable for addressing and resolving the fundamental physical controversy concerning the source of the ultrasonic waves.

As far as the “passive” MFL is concerned, several repetitions of Villari’s experiment have been published, demonstrating that some change of material state (stress, plastic strain, fatigue) causes a variation of a stray field. The breakthrough presented in [116] (a function allowing to quantitatively deduce a residual stress from a stray field level) was later shown to be an overinterpretation [113].

5.5 Solutions of Inverse Problems

In NDT, the direct problem consists of the evaluation of a field perturbation at measurement probe locations, for a given exciting field and sample characterization (position, shape, material properties, stress state and defects). In the inverse problem, one has to find parameters of a sample assuming measurements and a forcing field as known quantities. Fast, accurate, and reliable simulation tools are necessary for a success of any inversion procedure.

There are three fundamental obstacles making the inverse problem solution in industrial ENDT challenging. The first one is the possible non-monotonic character of some measured parameters. The second consists in coexistence of

several influence factors of a comparable impact on the measured signal. Relevant examples are the confounding conductivity and permeability factors in EC, or superposition of magnetic anisotropy and stress state in MBN [50]. The third problem is the complexity of any in-situ measurements, involving uncertainties higher than those associated with laboratory setting. These issues are discussed by [118], in the context of eddy current defectoscopy, and by Karhun et al. [110], who applied ERT to detection of internal defects in concrete structures. The numerical solution of the inverse problem is usually not unique, and it is sensitive to modelling errors and a measurement noise. Some attempts were unsuccessful, for example that by Roskosz [116], because of excessive number of influence variables as compared to the amount of measured data, which made the function inversion impossible [113].

The solution of inverse problems in ENDT requires some special strategies. One of these consists in obtaining ‘richer’ information from the studied object by applying several methods in parallel. For example, Sabet-Shargi et al. [119] present a multi-technique work focusing on accurate determination of stress state in hole-drilling method. They employed MBN, MFL and neutron diffraction measurements, and the structural FEA (ANSYS) was used to determine stress distributions in different situations. Szielasko [120] used the same strategy, in a probe designed for characterisation of high strength steels. Finally, Uchimoto et al. [121] employed an original EMAT–EC dual probe to assess the extent of pipeline wall thinning.

Another approach to an ill-conditioned inverse problem relies on a sophisticated analysis of a signal [80], or switching from static to dynamic excitation [62]. In order to minimise the computation cost without compromising the accuracy, some authors propose a refinement of algorithms of problem inversion with design-of-experiment sampling, response-surface fitting [118], and neuron networks [122]. The possible presence of several local extrema of the response function requires global optimization procedures, like genetic algorithms or artificial neural networks. The networks are first ‘trained’ using signals from a wide and possibly exhaustive range of defect shapes. To have a sufficient number of cases, training datasets are often generated using numerical simulations [122]. Genetic algorithms can efficiently be used in conjunction with FEM of the forward problem. In defectoscopy, a set of facets or elements forming a crack could be assuming as unknowns. In any case, to reduce the number of unknowns, some a priori assumptions have to be made on a class of defects under investigation [64].

Some successful solutions of inverse problems in ENDT were described already in the 80ties. In majority, they concerned ECT [123,124] and static MFL. In Atherton and Czura [22], there is an attempt to assess the order of magnitude of stress change from the magnetic stray field characteristics. The direct 2D problem is solved first, with an assumption of stress-permeability relationship, and then a

computation of a stray field for a given non-uniform permeability. In Atherton [24], the corrosion pits are characterised on the basis of the MFL signal. The direct problem is solved first in 2D, with determination of MFL patterns of various defect geometries. Kim and Park [125] came up with an efficient algorithm of solving the MFL inverse problem, e.g. determining the 3D sizing of an axially oriented small crack from axial and circumferential MFL distributions within a pipe. Finally, one should note a mathematically rigorous paper by Tamburrion and Rubinacci [126], where a multi-frequency, EC scan over a conducting sample was successfully exploited to form a spatial map of the resistivity, thus indicating the location and allowing reconstruction of the shape of a flaw. The authors based on their previous experience with ERT, demonstrating that similar inverse algorithms can be applied to ECT.

5.6 Perspectives of Further Research

According to the presented literature review, FEA proved useful in all three constitutive domains of ENDT: defect-toscopy, stress assessment and evaluation of intrinsic material properties. It has provided the possibility to simulate well-defined multi-factor scenarios and allowed to quantify phys-

ical properties at any position where actual measurements could not be performed. FEA is particularly useful when an array of solutions of a forward problem is required, and analytical formulas are insufficiently accurate. Modelling can thus be a basis for solving essential inverse problems, i.e. determining unknown structural parameters (at both micro- and macro-scale) from the measurements. Numerical analysis has been as well successful at studying and enhancing actuators and sensors, esp. in ECT and EMAT techniques. What are the perspectives of further research?

The MFL technique with AC-excitation (mainly Barkhausen effect and MAE) is one of the most promising fields of research. Experimentally validated models, taking into account both micro- and macroscopic behaviour of the magnetic field inside the ferromagnetic object, are necessary. Assessment of bidirectional stress state, already possible with MBN, requires both more experimental and numerical studies to gain widespread acceptance and be reliably conducted. In MFL with velocity effect, one awaits a validation and improvement of signal reconstruction scheme such as presented in [44] on a large series of industrial pipelines. Analysts and software developers should focus on overcoming numerical difficulties associated with increasing magnetic permeability and/or velocity of a probe.

In ECT there is a need for studies on non-uniform materials, especially those with a surface altered by corrosion or some intentional treatment (e.g. shot-

peening). Some attempts can be found in [80] and [127]. One should note as well, that in most of papers the authors do not perform convergence considerations, i.e. the influence of meshing density is not studied. Allowable as it may be in case of MFL-related works, in case of eddy-current modelling the adequate number of elements through skin depth should be carefully determined lest magnetic field is artificially reduced within the material.

In static MFL, fundamental problems seem to have been solved, however it would be practical to extend the base of inverse problem solutions for arbitrary C-core parameters and arbitrary defects.

EMATs are the only field where simulation seems to have been sufficiently applied, and further developments (e.g. incorporating some minor nonlinear effects into the models) are not supposed to bring significant benefits.

Apart from the specific tasks listed above, some universal challenges may be identified, including:

- extension of ENDT methods to anisotropic materials (e.g. duplex steels, which exhibit strong difference in magnetic properties in orthogonal directions)
- implementation of robust element formulations with a stress-dependent hysteresis loop (preliminary results can be found in [128])
- development of some in-situ, ‘intra-operational’ FEA computation tools providing real-time support for measurements of complicated geometries
- creation of a NDT-dedicated FEA software, like specialist modules in ANSYS or COMSOL devoted to PCBs, MEMS or packaging

It should be clearly stated that computational simulations, regardless whether they exploit the finite element method or other schemes, can be used only when the underlying physics is well understood and the relevant material properties can be either measured or reliably estimated. For example, the passive remnant magnetic flux leakage (MFL) technique, which was misnamed by its original promoters as metal magnetic Method, cannot be relevantly studied by simulations because the underlying magneto-mechanical effect is far too complex and depends on far too many highly variable parameters.

Finally, the authors of this paper claim, that a top-quality study on ENDT with FE modelling should simultaneously be realistic, parametric, and industrial. ‘Realistic’ means involving a 3D, nonlinear approach taking into account necessary couplings (e.g. magneto-acoustic in MAE). A ‘parametric’ study enables construction of a matrix of direct solutions, being a pre-requisite for handling an inverse problem. Finally, ‘industrial’ work on a well-defined object of non-trivial geometry is preferable over an analysis of a generic sample in an idealised environment. Since the promising, well-structured ENDT case studies published in

the 80ties, the prompt availability of the FEA software and dramatic increase of computing power have not always resulted in a proportional quality development of new studies. In particular, quantitative correlations between a simulation and industrial measurements are still rare, and attempts to solve practical inverse problems are in minority. More awareness in the ENDT community is necessary so that the potential of the electromagnetic FEA can be fully exploited.