

Санкт–Петербургский государственный университет

Окулова Дарья Дмитриевна

Выпускная квалификационная работа

Анализ напряженно-деформированного состояния
сферических сосудов давления с коррозионными
повреждениями

Уровень образования: магистратура

Направление 01.04.02 «Прикладная математика и информатика»

Основная образовательная программа ВМ.5517.2021 «Методы
прикладной математики и информатики в задачах управления»

Научный руководитель:

профессор кафедры вычислительных методов
механики деформируемого тела,
д.ф. - м.н. Пронина Юлия Григорьевна

Рецензент:

доцент Санкт-Петербургского государственного
технологического института,
к.ф. - м.н. Каштанова Станислава Викторовна

Научный консультант:

к.ф - м.н. Седова Ольга Сергеевна

Санкт-Петербург

2023 г.

Содержание

Введение	3
Обзор литературы	7
Глава 1. Анализ напряженного состояния оболочки с множественными дефектами	13
1.1. Постановка задачи	13
1.2. Построение геометрической и конечно-элементной моделей	16
1.3. Анализ результатов	21
1.4. Заключение по Главе 1	30
Глава 2. Анализ напряженного состояния оболочки с дефектом в форме узкого цилиндра	32
2.1. Постановка задачи	32
2.2. Построение геометрической и конечно-элементной моделей	33
2.3. Анализ результатов	36
2.4. Заключение по Главе 2	40
Список литературы	42

Введение

Сосуды под давлением определяются как контейнеры или оболочки, предназначенные для транспортировки, обработки и хранения жидкостей и газов под давлением, значительно отличающемся от давления окружающей среды, и в условиях различных сопутствующих нагрузок [1, 2, 3]. Как правило, давление внутри сосуда существенно превышает внешнее, за исключением некоторых отдельных примеров.

В силу ряда конструктивных преимуществ сферические оболочки являются предпочтительной геометрией для дизайна сосудов под давлением и их компонентов[4]. Меньшая площадь поверхности на единицу объема сферического сосуда снижает влияние внешних условий, включая температурные факторы, на его содержимое. Кроме того, в отличие сосудов других форм, например, цилиндрических резервуаров, давление внутри сферической оболочки распределено равномерно во всех ее точках. Это обеспечивает повышенную стабильность сферических сосудов по сравнению с альтернативами.

В современных производственных процессах невозможно обойтись без резервуаров под давлением, поскольку они являются ключевыми компонентами в отраслях, имеющих первостепенное промышленное значение: ядерная (в активной зоне реакторов), энергетическая (например, на угольной электростанции для удержания пара, образующегося при сжигании топлива), нефтяная и нефтехимическая (для хранения и переработки сырой нефти в составе нефтехранилищ) и химическая (в химических реакторах)[2, 5].

Перспективы развития сосудов под давлением выглядят благоприятными, особенно в свете разработки современных композитных материалов и их применения в различных отраслях. Ученые подчеркивают адаптивность сосудов под давлением к потребностям 21 века, обусловленной растущим спросом на энергию и стремлением к более чистым ее источникам [6, 7].

Аварии, связанные с сосудами под давлением, могут приводить к гибели людей, материальному и экологическому ущербу, поскольку их

содержимое, как правило, представляет собой легковоспламеняющееся, взрывоопасное или реактивное вещество, обладающее токсичными свойствами [8, 9, 10].

Одной из возможных причин, инициирующих отказы сосудов под давлением, является коррозия – химическая или электрохимическая реакция между материалом (как правило, металлом) и окружающей средой, приводящая к разрушению и деградации материала и ухудшению его свойств [11].

Металлические конструкции могут быть ослаблены общей и/или локализованной коррозией [12]. Общая коррозия относительно равномерно охватывает всю поверхность материала при воздействии агрессивных сред. В то время как локализованная проявляется в виде местных поражений, зоны которых крайне малы по сравнению с общей поверхностью материала, находящейся в контакте с окружающей средой [13]. В качестве иллюстрации локальной коррозии в работе [14] приводится пример коррозии каркасов для поддержания стен трюмов на судах большой грузоподъемности. Данные конструкции, как правило, обрабатываются специальными защитными составами, такими как тар-эпоксидная краска, с целью предотвращения коррозии. Общая коррозия, как правило, наблюдается при отсутствии защитного покрытия. Результатом этого процесса на элементах каркасов судов является равномерное корродирование поверхности пластин, придающее им характерную визуальную форму, ассоциирующуюся с графиком спектра морских волн. Несмотря на то что общая коррозия вызывает значительные потери материала, это явление рассматривается как более контролируемое в связи с высокой вероятностью обнаружения и предсказуемостью развития [15]. Моделирование общей механохимической коррозии упругих и упруго-пластических тонко- и толстостенных сферических сосудов проводилось в исследованиях [16, 17, 18, 19].

К типичной высоко-локализованной коррозии относится питтинговая, или точечная, проявляющаяся в виде рассеянного образования резко очерченных выемок. В естественных условиях вероятность возникновения точечной коррозии выше по сравнению с общей [20]. Питтинговые коррозионные дефекты могут быть как изолированными, так и располагаться во

взаимной близости, образуя шероховатую поверхность.

Обнаружение пятен мелких коррозионных отверстий на поверхности, не подверженной общей коррозии, не всегда возможно с помощью простого визуального метода. Перфорация питтингами не сопровождается значительными потерями объема материала, что делает питтинговую коррозию одной из наиболее скрытых форм коррозионных повреждений. При сочетании слабой или умеренной общей коррозии с питтингами, образующиеся продукты общей коррозии также могут препятствовать обнаружению последних [11]. Более того, развитие питтинговой коррозии можно отнести к стохастическим процессам с большим количеством случайных и внешних воздействий, неконтролируемых факторов и взаимосвязанных переменных.

Морфология питтинга зависит от факторов, связанных с микроструктурой пораженного материала и условий среды. В книгах [11, 15] выделены такие формы поперечного сечения дефекта как узко-глубокая (narrow-deep), неглубоко-широкая (shallow-wide) [21], эллиптическая, подповерхностная (subsurface) и более сложные формы [22, 23, 4]. При моделировании морфологии питтингового дефекта с целью анализа напряженно-деформированного состояния ослабленных конструкций, обычно используются геометрические приближения для формы выемки, такие как полусферическая [4, 24, 25, 26], коническая [14], полуэллиптическая [27, 28], цилиндрическая [25, 29, 23, 30] и форма сглаженного параллелепипеда [31, 32]. В исследованиях ряда авторов, результаты анализа предела прочности нагруженных пластин не показали значимых различий при рассмотрении разных геометрических формы выемки, а именно полусферической, полуэллиптической и цилиндрической [25, 26, 33].

В настоящее время метод конечных элементов (Finite Element Method) сохраняет свою позицию как наиболее эффективный и точный инструмент для анализа полей напряжений в окрестности дефектов [26, 34, 35].

Цель данной выпускной квалификационной работы заключается в проведении анализа напряженного состояния сферической оболочки под внутренним давлением, ослабленной коррозионными повреждениями.

Первая глава посвящена случаю, соответствующему расположению коррозионных питтингов полусферической формы вдоль «экватора» оболочки. Рассматриваются два паттерна расположения выемок на экваторе – случайного и периодического. Проводится анализ зависимости коэффициента концентрации напряжений от общего количества дефектов на поверхности сосуда в рамках линейно-упругой модели поведения материала и упругопластической модели с линейным упрочнением. Особое внимание уделяется «предельному» случаю описанной геометрической модели, представляющему сферическую оболочку со «сплошным» торообразным повреждением вдоль экватора. В главе также описаны наблюдения о влиянии взаимодействия смежных дефектов на распределение напряжений в зависимости от их взаимного расположения на кривой.

Во второй главе рассматривается оболочка с одиночным узким питтингом на внешней поверхности. Форма дефекта представляет собой объединение цилиндра и полусферы. Исследуется зависимость коэффициента концентрации напряжений от глубины питтинга при различных геометрических параметрах оболочки, что позволяет сделать выводы о влиянии присутствия развивающегося коррозионного дефекта на поверхности сосуда на концентрацию напряжений.

Расчет напряженного состояния проведен методом конечных элементов при помощи универсальной программной системы анализа «ANSYS Workbench».

Результаты, описанные в Главе 1, были представлены на конференции «26th International Conference on Fracture and Structural Integrity» (2022) и опубликованы в статье [36]. Исследования, описанные в данной диссертационной работе, выполнены в рамках гранта Российского Научного Фонда № 21-19-00100 "Поведение материалов и конструкций в условиях коррозии под напряжением 2021-2023 (<https://www.rscf.ru/project/21-19-00100/>).

Обзор литературы

На сегодняшний день численным и экспериментальным исследованиям влияния множественных дефектов на поверхности различных конструкций на прочность и поведение в напряженном состоянии посвящен колоссальный и непрерывно пополняющийся список работ многих авторов. Это, безусловно, значительно улучшает качественное понимание механизмов коррозионных процессов. Большая часть публикаций, где рассматриваются конструкции, подверженные множественной питтинговой коррозии, сосредоточена на металлических пластинах [12, 28, 30, 33] и трубах [23, 37, 38, 34, 39, 40].

Так, например, в работе [37] описаны результаты параметрического анализа влияния коррозионных дефектов на изгибную способность тонкостенных круглых труб. В качестве параметров были рассмотрены расстояние между дефектом и закрепленным концом трубы и угол между областью коррозии и направлением изгибающего момента. Было показано, что влияние коррозионного дефекта на изгибную способность снижается с увеличением указанного расстояния: наиболее опасным положением коррозионной выемки является закрепленный конец трубы. Авторами было также отмечено, что изгибная способность зависит от геометрической формы дефектов, а увеличение их числа приводит к снижению изгибной способности трубы. В работе также проанализировано влияние случайного расположения коррозионных дефектов на поверхности труб. Показано, что увеличение числа коррозионных дефектов приводит к уменьшению изгибной способности. Однако, после достижения определенного предельного значения, изгибная способность начинает оставаться относительно стабильной при дальнейшем увеличении количества дефектов.

В статье [38] представлено комплексное экспериментальное и численное исследование влияния питтинговой коррозии на поведение стальных труб. Результаты стохастического анализа показали, что случайная природа формы, глубины, интенсивности скопления и паттерна распределения коррозионных дефектов способна оказывать значительное влияние на деградацию предельной прочности и деформационной способности конструк-

ции вплоть до перехода в режим разрушения. Согласно результатам анализа, основным фактором коррозионных повреждений, снизившим прочность тестируемых элементов, является уменьшение объема материала. Авторы подчеркивают, что при случайном характере скопления питтингов, их влияние на прочность и поведение конструкций более выражено, чем при регулярном паттерне расположения дефектов.

Эффект взаимодействия между коррозионными дефектами, опоясывающими поверхность трубопровода вдоль окружности, и их влияние на прочность трубопровода под давлением проанализированы в работе [34]. Авторы публикации утверждают, что при близком расположении смежных дефектов в области между ними возникает механоэлектрохимическая связь, ускоряющая коррозионные процессы в окрестности дефектов. И, напротив, увеличение расстояния между питтингами приводит к снижению концентрации напряжений и к падению уровня пластичности в окрестности дефектов. Когда же расстояние между соседними питтинговыми дефектами достигает и превышает определенное предельное значение, взаимодействие между дефектами можно считать незначительным.

Аналогичные качественные выводы были сформулированы авторами [40] при анализе механического поведения трубопровода с коррозионными дефектами в рамках нелинейного упруго-пластической модели Рамберга-Осгуда. Согласно наблюдениям, расстояние между соседними дефектами влияет на их степень взаимодействия. Максимальное значение эквивалентного напряжения приходится на область между выемками - на места их «слияния». При этом по мере удаления дефектов друг от друга область концентрации напряжений распространяется перпендикулярно оси трубопровода.

Результаты теста на коррозионный изгиб трубы были опубликованы в работе [39], целью которой было исследование эффектов, вызванных случайной точечной коррозией на поверхности изделий. Авторы изучили морфологию выемок с помощью специального сканирующего электронного микроскопа, а также провели количественную оценку статистических характеристик коррозионных дефектов. Исследователи установили, что для питтинговой коррозии на поверхности углеродистых стальных труб в глу-

боководных условиях более репрезентативными морфологиями являются цилиндрическая и полуэллипсоидная, а распределение значений глубины дефектов и отношения диаметра к глубине может быть описано логнормальным распределением или распределением общего экстремального значения. Данные наблюдений подтвердили, что наличие и характеристики дефектов, амплитуда изгиба и свойства материала оказывают существенное влияние на давление разрушения корродированных труб. Главными параметрами, оказывающими влияние на давление разрушения оказались плотность распределения выемок и длина их зоны влияния - расстояние от дефекта до области на поверхности трубы, где наблюдаются значительные изменения механических свойств материала, такие как уменьшение толщины стенки или рост напряжений.

Представленная в исследовании [12] методология позволяет оценить напряженно-деформированное состояние стальных пластин в условиях продольного осевого сжатия, учитывая геометрические и физические нелинейности. Авторы достигли более полного описания напряженно-деформированного поведения пластин, благодаря сочетанию результатов анализа упругой большой деформации и жестко-пластического анализа.

В результате проведенного в [33] исследования была разработана теоретическая формула, позволяющая оценить предел прочности пластин, находящихся под воздействием питтинговой коррозии в условиях комбинированных нагрузок. Авторы работы отмечают, что при нелинейном анализе предела прочности корродированных пластин можно прибегнуть к аппроксимации реальных коррозионных выемок, которые обычно имеют коническую или сферическую форму, до цилиндрической формы с соответствующими распределением дефектов и объемом потери материала, обусловленной коррозией. Также в рамках исследования были выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на предельную прочность пластин, пораженных коррозионными повреждениями. К ним относятся объем потери материала в результате коррозии, отношение длины к ширине пластины, а также соотношение поперечных и продольных напряжений. В то же время коэффициент стройности (отношение длины пластины к ее ширине) и максимальное значение деформации в результате начальных геометриче-

ских несовершенств оказывают менее существенное влияние на предельную прочность рассматриваемых конструктивных элементов.

В недавних исследованиях, представленных в работе [30], была проанализирована предельная прочность упрочненных пластин, подверженных питтинговой коррозии вследствие воздействия агрессивной морской среды. С помощью метода конечных элементов, реализованного в программном обеспечении «ABAQUS», проводилась серия нелинейных численных экспериментов для трех типов упрочненных пластин в условиях одноосного сжатия, с варьированием глубины, расположения и характера распределения коррозионных дефектов на поверхности пластины, а также степени поврежденности конструктивного элемента питтинговой коррозией. Результаты исследования показали, что предельная прочность упрочненных панелей снижается с увеличением степени поврежденности коррозией и глубины питтингов, и в значительной степени зависит от их распределения. Кроме того, сравнение результатов для периодического и случайного распределением дефектов показало, что последнее может привести к изменению режима разрушения. На основании проведенных исследований авторами была предложена эмпирическая формула для прогнозирования предельной прочности упрочненных пластин в зависимости от объема потери материала вследствие коррозионных процессов.

Среди проводимых исследований необходимо также выделить работы, посвященные анализу напряженно-деформированного состояния металлических конструкций сферической формы. Однако, большинство таких исследований описывают поведение сферических элементов без учета коррозии, которая является неизбежной в металлических конструкциях. Несмотря на то, что исследования, связанные с проблемой коррозии металлических сфер, не так многочисленны, как исследования пластин и труб, такие работы все же существуют в настоящее время.

Например, научная публикация [41] описывает разработку вероятностной модели для оценки нагрузочной способности шарнирных соединений («welded hollow spherical joints»), состоящих из двух полусферических частей, соединенных сварочным швом. В данном исследовании рассмотрены сферические сварные соединения, подверженные коррозии с тремя раз-

личными паттернами расположения на поверхности сферы: широтный и продольный (относительно сварочного шва) паттерны, а также случайная коррозия. Авторы данного труда проанализировали влияние геометрических и физических параметров модели (толщина и диаметр оболочки, глубина коррозионных повреждений, предел текучести материала изделий) на коэффициент сокращения предельной способности к сжатию. В результате было обнаружено, что среди перечисленных параметров указанный коэффициент положительно коррелирует лишь с отношением глубины коррозии к толщине оболочки (эффективной толщиной), а также с количеством коррозионных дефектов. Авторам удалось показать, что сжимающая способность сварных полых сферических соединений, ослабленных случайно расположенными поверхностными дефектами подчиняется нормальному распределению. Кроме того, предложенная формула, основанная на выявленных ключевых параметрах, коррелирующих с максимальной сжимающей способностью, позволяет определить параметры вероятностного распределения.

В работе [42] описаны результаты экспериментов над образцами из алюминиевого сплава, на поверхность которых были нанесены искусственные дефекты полусферической формы с целью моделирования микропор, образующихся при кристаллизации в процессе литья. Основной целью работы была оценка влияния наличия описанных выемок, их морфологии, размеров, взаимного расположения на поверхности образца, а также эффекта взаимодействия этих дефектов на усталостную прочность образцов в условиях циклических нагрузок. Было установлено, что предельная устойчивость к высокоциклическим нагрузкам испытываемых элементов значительно зависит от положения взаимодействующих дефектов относительно оси нагрузки и расстояния между порами. При этом эффект взаимодействия был обнаружен лишь для конфигурации, когда дефекты расположены копланарным образом вдоль окружности, перпендикулярной оси нагрузки, и расстояние между ними не превышает определенного значения. В этом случае дефекты образуют некий кластер, и максимальные значения напряжений наблюдаются на тонких связующих участках (ligaments) между ними. Это наблюдение подтверждает предположение о том, что разви-

тие усталостных микротрещин начинается в участках между отдельными дефектами [43].

С учетом стохастической природы развития пятен питтинговой коррозии в реальных условиях, целесообразно использовать случайные паттерны расположения коррозионных дефектов на поверхности исследуемых конструкций при их моделировании для последующего анализа. Помимо упомянутых ранее исследований [41, 30, 37, 39, 38], стоит отметить работы [44, 45], где представлены результаты анализа влияния питтингов, случайно распределенных на небольшом участке поверхности сферической оболочки, на давление схлопывания.

Глава 1. Анализ напряженного состояния оболочки с множественными дефектами

1.1 Постановка задачи

Рассматривается сферическая оболочка с коррозионными дефектами. Пусть R и r – внешний и внутренний радиусы оболочки соответственно. Все выемки представляют собой сегменты сферы с радиусом кривизны δ и высотой сегмента - глубиной выемки $h = \delta/2$ (Рис. 1). Дефекты расположены псевдо-случайным образом вдоль экватора внешней поверхности оболочки. Различные значения n количества дефектов, а также «предельный случай» конфигурации, соответствующий полному покрытию экватора сферы сплошным торообразным повреждением с аналогичным минимальным радиусом кривизны δ и глубиной h (Рис. 2, поверхность повреждения выделена цветом).

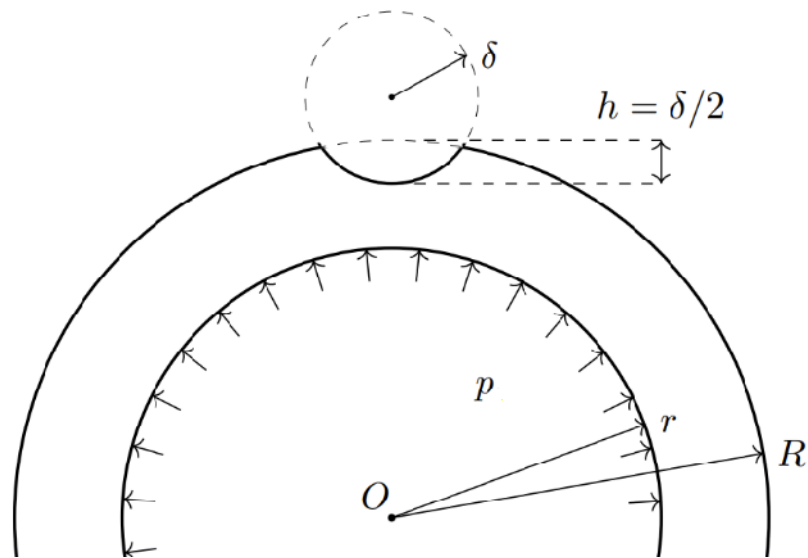


Рис. 1: Центральное поперечное сечение сосуда с дефектом на внешней поверхности

На внутреннюю поверхность сосуда оказывается давление p . Задача рассматривается в рамках линейно-упругой и билинейной упругопластической моделей поведения материала. В качестве материала сосуда выбрана нержавеющая сталь марки 304. Внутренний и внешний радиусы сферы составляют $r = 340$ и $R = 350$ соответственно. Радиус кривизны секторов сфер, моделирующих выемки, составляет $\delta = 6$, а высота каждого сектора

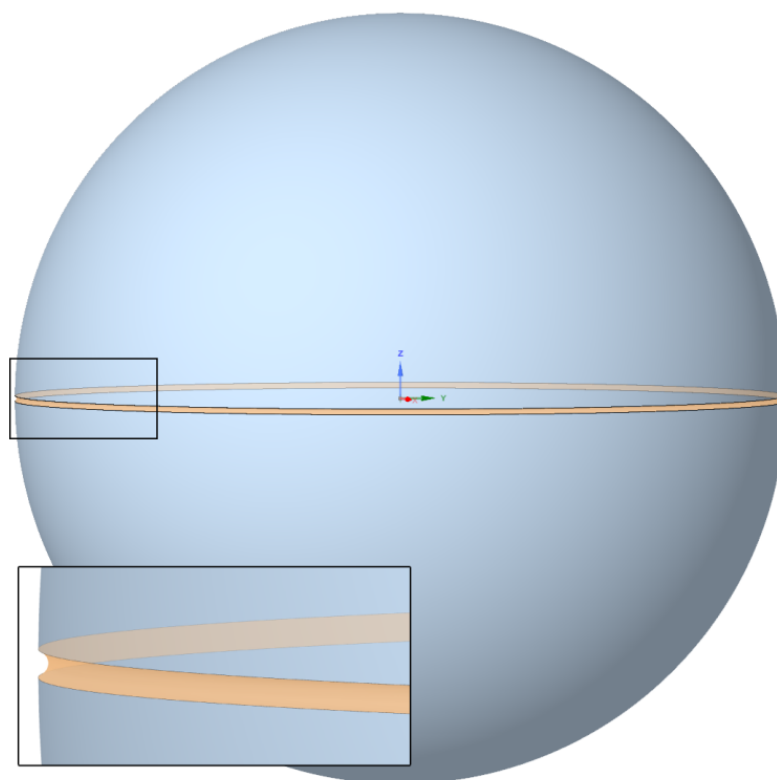


Рис. 2: Сфера с тороидальным повреждением вдоль линии экватора

равна $h = 3$. Диапазон значений количества дефектов, n , варьируется от 2 до 260. Для случая равномерно (периодически) расположенных выемок рассматриваются также дополнительные геометрии с числом n до 320. Обратим внимание, что значения $n > 212$ соответствуют полному покрытию экватора равномерно расположенными дефектами (в данном случае - их пересечением). Требуется:

- Реализовать расчет напряженного состояния сферической оболочки при различных параметрах конфигурации и паттернах расположения дефектов;
- Оценить влияние взаимного расположения выемок на поверхности оболочки на распределение напряжений в их окрестности, сравнить наблюдения с полученными в актуальных исследованиях;
- Сравнить результаты проведенного расчета напряженного состояния в рамках линейно-упругой и упругопластической моделей поведения

материала с учетом характера распределения выемок вдоль кривой, моделирующей «экватор» внешней поверхности оболочки;

- Проанализировать связь результатов исследования при рассмотрении геометрий с отдельными дефектами с результатами для оболочки с непрерывным торообразным повреждением;
- На основании анализа сформулировать выводы о возможности аппроксимации случайного распределения дефектов равномерными паттернами с аналогичным уменьшением объема вследствие коррозии.

1.2 Построение геометрической и конечно-элементной моделей

При подготовке к проведению конечно-элементного анализа в системах ANSYS Spaceclaim Direct Modeler (SCDM) и ANSYS DesignModeler был построен набор трехмерных CAD-моделей (геометрий). Каждая модель представляет собой сферическую оболочку с выемками. Поскольку вероятность появления дефекта в каждой точке вдоль экватора оболочки одинакова, целесообразно использовать равномерное вероятностное распределение для генерации координат центров сфер, секторы которых моделируют выемки. Генерация случайных чисел была реализована с помощью функции `random()` из библиотеки Python, которая равномерно генерирует случайное число с плавающей точкой из полуинтервала $[0.0, 1.0)$, используя генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ), так называемый вихрь Мерсенна.

Описанная геометрическая модель обладают свойством симметрии, поэтому достаточно рассмотреть только ее 1/2 часть (Рис. 3). При этом при последующем расчете напряженного состояния на грани симметрии необходимо задать граничное условие, соответствующее опоре без трения («Frictionless support»), задающее нулевые перемещение и деформацию в нормальном направлении.

Для построения конечно-элементной сетки в программном пакете ANSYS Workbench из библиотеки элементов выбран десяти-узловой тетраэдрический элемент SOLID187. Для обеспечения точности решения посредством установки специальных настроек, регулирующих размеры элементов в ослабленной области было произведено уточнение (а именно, измельчение) конечно-элементной сетки с плавным переходом к более грубому разбиению в областях, удаленных от дефектов. Для обеспечения сходимости решения и его нечувствительности к параметрам конечно-элементной сетки для каждой CAD-модели произведено несколько расчетов с различными размерами элементов. В результате модель была разделена на элементы со следующими длинами граней: 1,6 - вдоль поверхности симметрии и 0,5 - в окрестности дефектов. Для достижения сходимости решения нелиней-

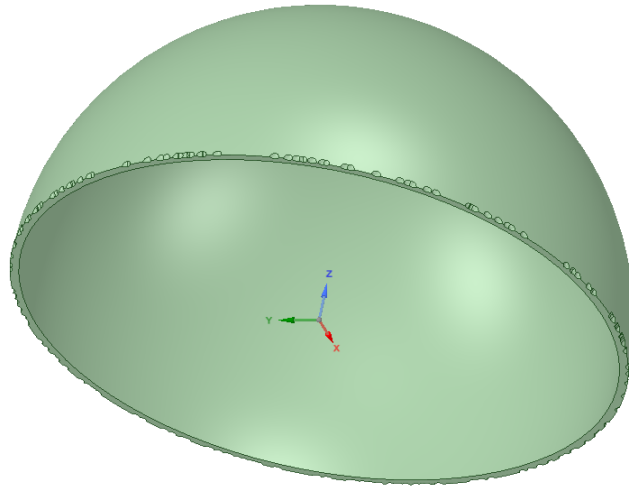


Рис. 3: Геометрия моделируемой части оболочки с выемками, случайно расположенными вдоль экватора при $n = 176$

ной задачи с уровнем погрешности менее 2% в рамках упругопластической модели для каждой из геометрий потребовалось около 30 итераций.

Для задачи с геометрической моделью с непрерывным торообразным «вырезом» на экваторе достаточно построить ее поперечное сечение, поскольку данная модель является осесимметричной (ось симметрии - Y , Рис. 4). Перед проведением осесимметричного анализа для геометрии с тороидальным повреждением в окрестности выреза были установлены специальные параметры для уточнения конечно-элементной сетки для достижения ее достаточного качества. На Рис. 5 представлен фрагмент описанной геометрической модели, включающий окрестность повреждения, с отображением качества элементов сетки.

Материал конструкции – нержавеющая сталь с модулем Юнга $E = 1,85 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,27$, предел текучести $\sigma_T = 2,1 \cdot 10^2$ МПа, модуль упругости после превышения предела текучести $T = 1,16 \cdot 10^3$ МПа. В рамках линейно-упругого анализа предполагается, что материал подчиняется закону Гука с приведенными упругими константами, а внутреннее давление $p = 1$ МПа.

Для проведения упругопластического анализа используется билинейная модель пластичности (Bilinear Isotropic Hardening model), доступная в

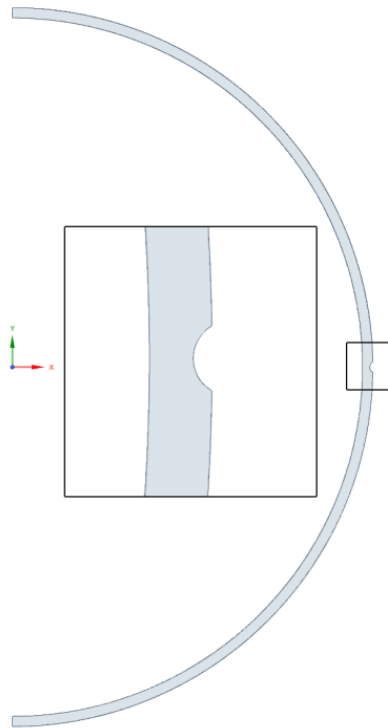


Рис. 4: Поперечное сечение геометрической модели с торообразным повреждением

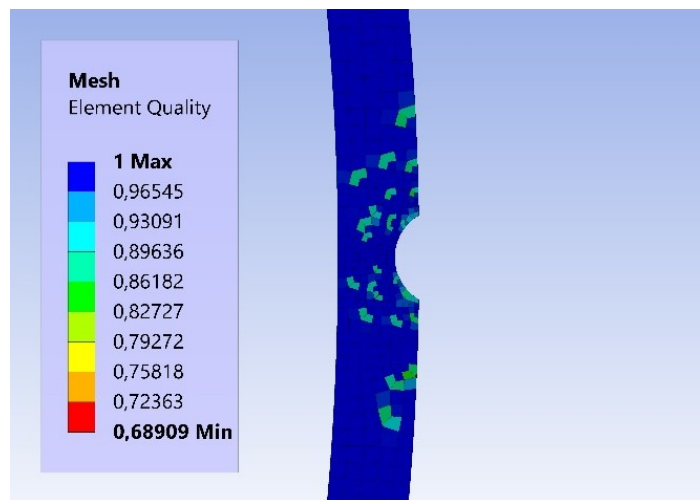


Рис. 5: Фрагмент геометрической модели с торообразным повреждением. Качество конечно-элементной сетки

библиотеке свойств материалов в ПО ANSYS Workbench. Значение внутреннего давления p , обеспечивающее пластические деформации в окрестности дефектов, в данном случае равно 6 МПа.

Участок деформационного упрочнения кривой зависимости напря-

жения и деформации был смоделирован в Ansys Mechanical с использованием билинейной модели упрочнения. Правило билинейного упрочнения предполагает линейное деформационное упрочнение и определяется с использованием касательного модуля T . Рассматриваемые участки кривой зависимости напряжения и деформации при использовании билинейного упрочнения представлены на Рис. 6.

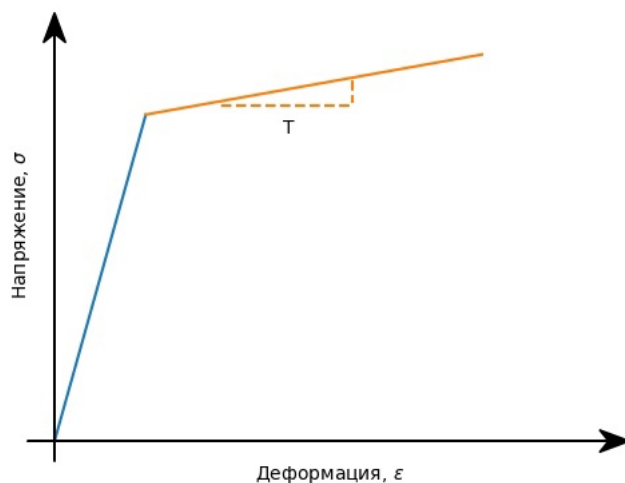


Рис. 6: Билинейное упрочнение

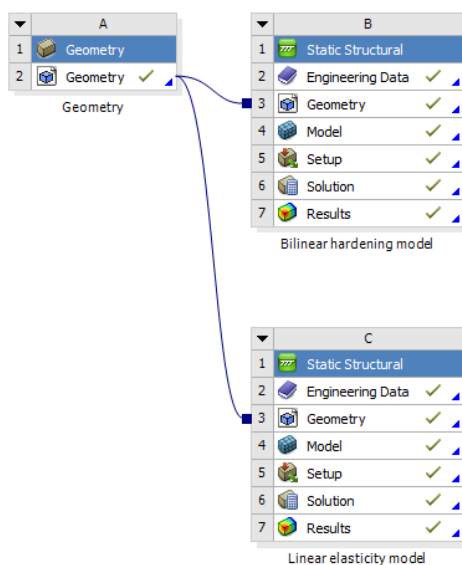


Рис. 7: Структура единого проекта в ANSYS Workbench

Поскольку линейно упругий и упругопластический анализы осуществляются над одними и теми же геометриями и применением аналогичных параметров конечно-элементной сетки, отсутствует необходимость в проведении двух отдельных расчетов для каждого набора свойств материала. Вместо этого в целях оптимизации целесообразно построить процесс расчетов с использованием двух взаимосвязанных проектов с общими геометрическими характеристиками модели и параметрами конечно-элементной сетки. Такая взаимосвязь между двумя проектами в рамках двух разных моделей поведения материала дает возможность получить результаты линейно упругого и упруго-пластического анализа при выполнении единого объединяющего два подхода проекта. Структура взаимосвязи между проектами, применяемая для расчета напряженного состояния оболочки, представлена на Рис. 7.

1.3 Анализ результатов

Значения максимальных главных напряжений, наблюдаемых в оболочке под давлением с множественными дефектами, были рассчитаны для различных значений количества выемок n в диапазоне от 2 до 260. Для каждого значения n было сгенерировано пять различных независимых реализаций наборов случайных величин, определяющих местоположения дефектов. Введем обозначение σ_{max} для максимального значения главного напряжения, наблюдаемого в определенной геометрии.

В процессе производимых расчетов было отмечено, что конфигурация дефектов влияет на распределение напряжений в ослабленной части оболочки. Напряжения достигают максимальных значений «в глубине» определенной выемки, или выемок - при их пересечении, для двух вариантов взаимного расположения дефектов. А именно, для конфигураций, при которых либо все дефекты оказывались достаточно удаленными друг от друга (Рис. 8), либо, напротив, центры сфер, секторы которых моделируют выемки, находятся чрезвычайно близко. Второй случай соответствует почти полному существенному наложению выемок друг на друга без образования тонкой грани между ними. Формирование же таких «острых» выступов происходит в тех случаях, когда дефекты «слегка» накладываются (Рис. 9) или «близки к пересечению». При этом максимальные значения напряжений наблюдаются на острых гранях, образованных несколькими дефектами. Это наблюдение соответствует результатам, полученным коллегами ранее в работах [42, 40].

Аналогично геометриям, где секторы сфер, моделирующие дефекты, находятся в существенной близости, максимальные значения напряжения для геометрической модели сферической оболочки с непрерывным торообразным повреждением достигаются «в глубине» сплошного выреза (Рис. 10).

Определим коэффициент концентрации напряжений K :

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ideal}},$$

где σ_{ideal} - максимальное главное напряжение на внешней поверхности иде-

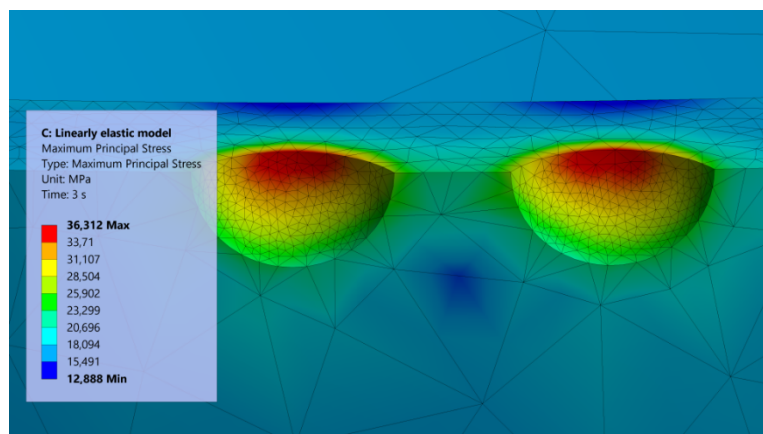


Рис. 8: Распределение напряжений в окрестности достаточно удаленных друг от друга дефектов. Плоскость симметрии - горизонтальная. Линейно-упругая модель

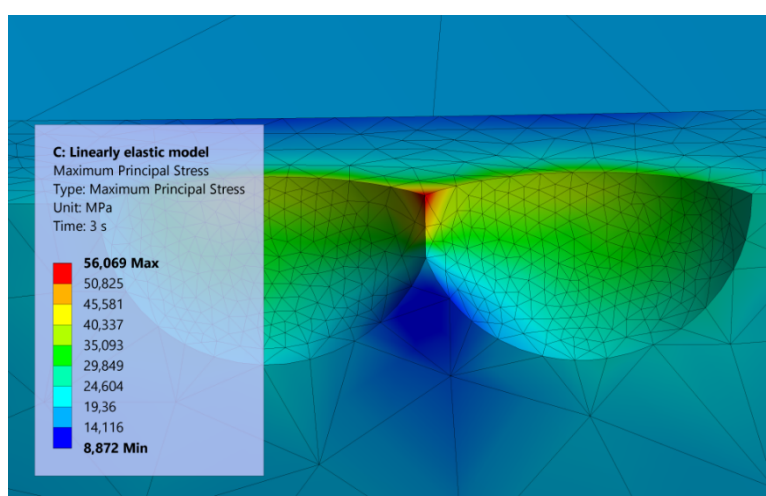


Рис. 9: Распределение напряжений в области пересекающихся выемок. Плоскость симметрии - горизонтальная. Линейно-упругая модель

альной (без дефектов) оболочки с аналогичными геометрическими параметрами и при том же значении внутреннего давления p :

$$\sigma_{ideal} = \frac{3p}{2(R^3/r^3 - 1)}.$$

Соответствующее заданным значениям внутреннего давления в рамках линейной (при $p = 1$ МПа) и нелинейной (при $p = 6$ МПа) моделях поведения материала значение σ_{ideal} составляет 16,51 МПа и 99,06 МПа соответственно. Поскольку в обоих случаях эти значения не превышают предел текучести, нагрузки, обусловленные внутренним давлением, не вы-

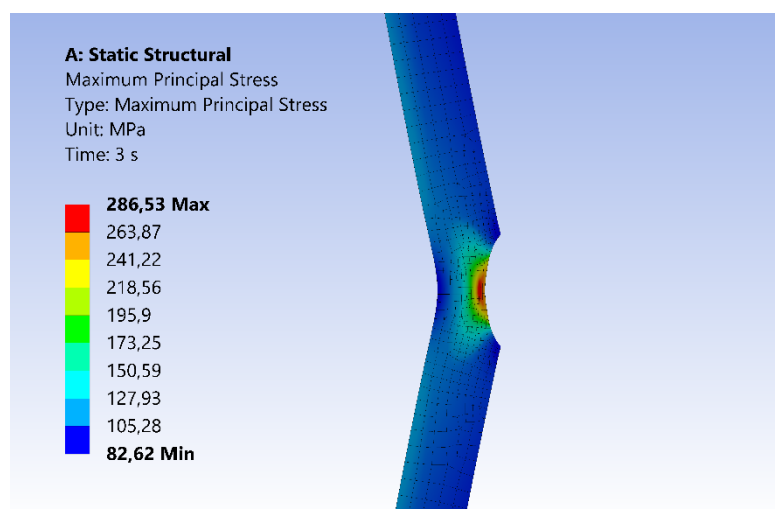


Рис. 10: Распределение напряжений вдоль сечения сферической оболочки с непрерывным тороидальным повреждением. Уругопластическая модель.

зывают пластические деформации на поверхности идеальной сферической оболочки.

Значения коэффициента K концентрации напряжений для различных реализаций случайных расположений выемок вдоль экватора сферической оболочки и для различных значений n количества дефектов в рамках линейно-упругой и уругопластической моделей поведения материала представлены на Рис. 11 и 12 соответственно. Точки разных цветов для каждого значения n соответствуют разным реализациям случайных расположений дефектов. Пунктирная линия на данных рисунках соответствует значению коэффициента K концентрации напряжений в сферической оболочке, ослабленной торообразным повреждением.

На основании результатов расчета, отображенных на графиках, можно утверждать о присутствии эффекта взаимодействия множественных дефектов, определяющего их взаимным расположением. Взаимодействие смежных выемок может приводить к значительному увеличению значений максимальных напряжений с ростом числа дефектов n .

Зависимости коэффициента концентрации напряжений, K , от значения количества «отдельных» дефектов, n , в рассматриваемом диапазоне качественно одинаковы для обеих моделей поведения материала оболочки. В левой части диапазона значения коэффициента концентрации напряже-

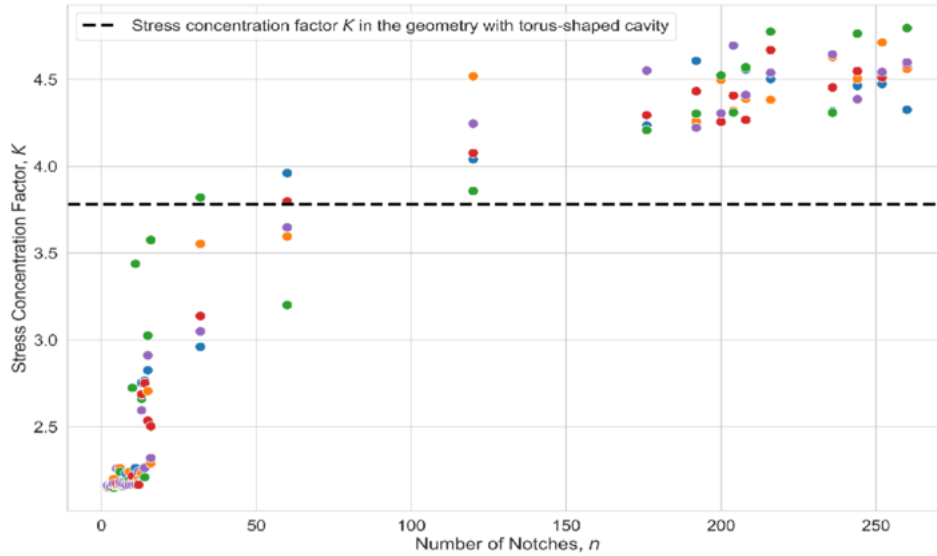


Рис. 11: Коэффициент концентрации напряжений, K , в оболочке с n случайно распределенными «отдельными» дефектами (точки) и с единым торообразным повреждением (пунктирная линия). Линейно-упругая модель.

ний, K , радикально возрастают, после чего максимальные напряжения достигают некоторого плато (с присутствием слабого минимума), для значений количества выемок, n , превышающих 200. Наблюдаемое плато может быть объяснено наличием «дублирующих» наложений выемок друг на друга при большом количестве дефектов, когда две и более выемки появляются в примерном одном и том месте. Очевидно, частота таких «перекрытий» растет с увеличением числа дефектов.

Сравнивая две модели поведения материала, следует обратить внимание на то, что скорость роста коэффициента K концентрации напряжений для материала в упругом состоянии гораздо выше, чем в упруго-пластическом. А именно, в первом случае значение коэффициента K концентрации напряжений, вызванное присутствием нескольких дефектов на поверхности оболочки, может быть вдвое выше соответственного значения коэффициента K в оболочке с одиночным дефектом. В то время как в рамках упругопластической модели поведения материала для рассмотренного диапазона значений n разница между коэффициентами K в сосуде с единственным и множественными дефектами не превышает 30%.

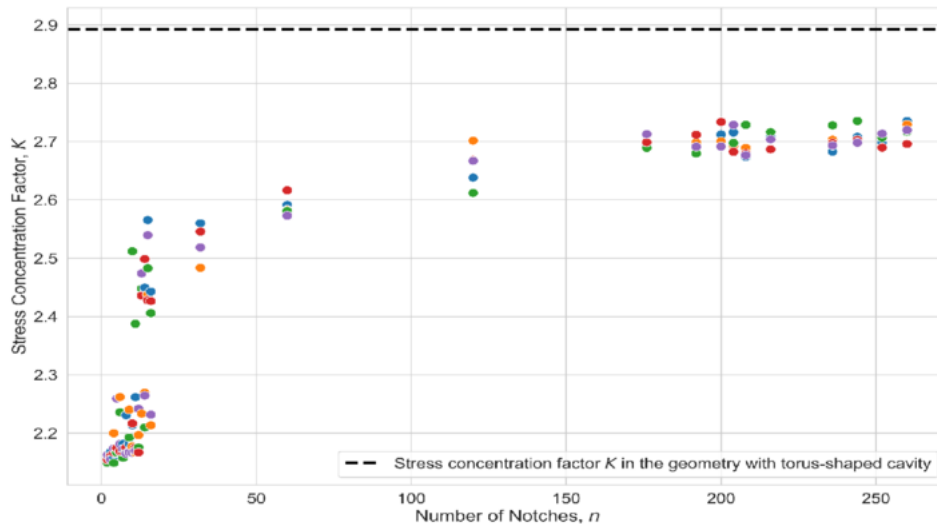


Рис. 12: Коэффициент концентрации напряжений, K , в оболочке с n случайно распределенными «отдельными» дефектами (точки) и с единым торообразным повреждением (пунктирная линия). Упругопластическая модель.

В упругой сферической оболочке с множественными изолированными дефектами присутствуют значения K коэффициента концентрации напряжений, превышающие соответствующие значения в сосуде с цельным торообразным повреждением (это наблюдается при значениях $n \geq 32$), в то время как упругопластическая оболочка такой особенности не проявляет. На первый взгляд достоверность данных наблюдений может быть поставлена под сомнение. Однако, наблюдаемое поведение линейно-упругой оболочки с множественными дефектами может быть обусловлено возможностью появления в данной геометрии острых граней между близко расположенными дефектами, где достигаются максимумы напряжений, в отличие от оболочки с непрерывным торообразным вырезом, где острые грани отсутствуют. В упругопластическом сосуде с непрерывным «опоясывающим» торообразным повреждением оболочка сосуда изгибается вдоль тора. Более того, очевидно, что изгибные деформации в упругопластическом сосуде больше, чем в упругом, а напряжения в последнем не ограничены. Большие деформации в упругопластической оболочке инициируют эффект упрочнения, что приводит к увеличению напряжений вдоль экваториального повреждения. В сосуде с множеством отдельных случайно распределенных дефектов

отсутствуют изгибные деформации, которые могли бы привести к упрочнению материала. Этим объясняются более высокие напряжения «на дне» тороидального повреждения в упругопластическом сосуде по сравнению с напряжениями в окрестности отдельных дефектов, которые ограничены более низким пределом текучести.

С большой вероятностью можно ожидать, что при расчете напряженного состояния сферической оболочки с дефектами, равномерно (т.е. периодически) расположенными вдоль экватора, с увеличением значения n максимальные напряжения в окрестности отдельных выемок будут приближаться к напряжениям в окрестности цельного торообразного повреждения. Эта гипотеза действительно подтверждается наблюдениями, отраженными на Рис. 13 и 14. На данных графиках представлены значения коэффициента концентрации напряжений K для линейно упругих и упругопластических сферических оболочек с множественными периодически расположенными выемками.

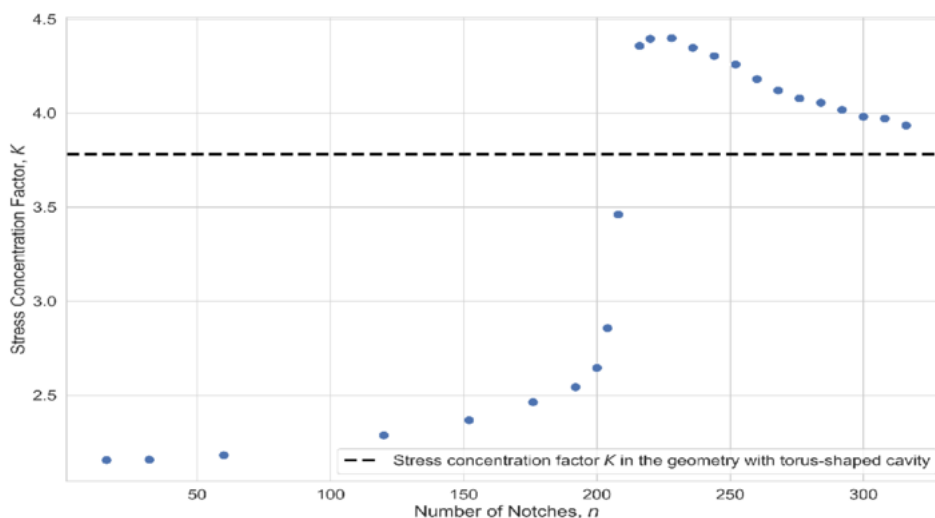


Рис. 13: Коэффициент концентрации напряжений, K , в оболочке с n периодически расположенными «отдельными» дефектами (точки) и с единым торообразным повреждением (пунктирная линия). Линейно-упругая модель.

По данным на графике 13 для линейно-упругой модели поведения материала значение коэффициента концентрации напряжений K резко скачкообразно возрастает, в тот момент, когда между смежными дефектами

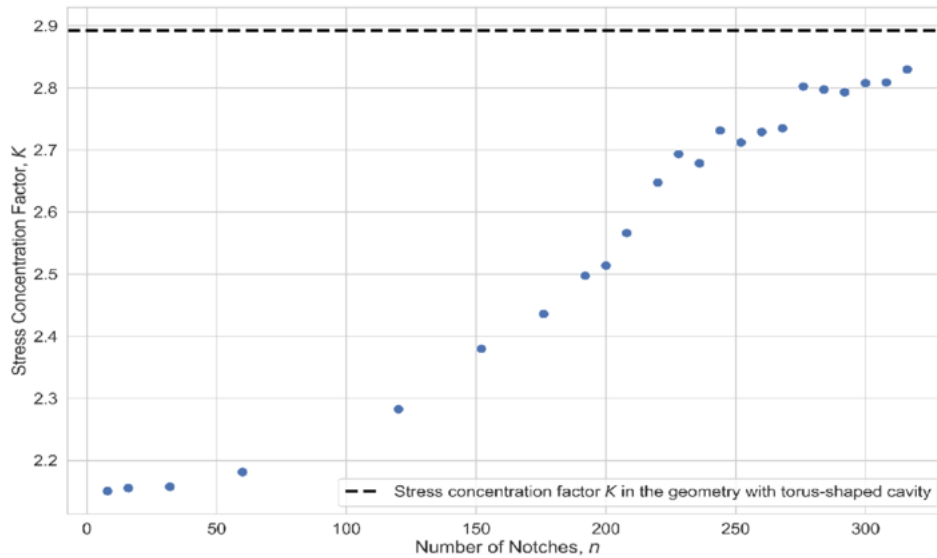


Рис. 14: Коэффициент концентрации напряжений, K , в оболочке с n периодически расположенными «отдельными» дефектами (точки) и с единым торообразным повреждением (пунктирная линия). Уругопластическая модель.

начинают формироваться связи в виде тонких граней или заостренностей. Следует отметить, что значения $n > 212$ соответствуют геометриям с пересекающимися выемками. Далее, после достижения определенного значения количества дефектов n (так, на Рис. 13 «пик» достигается при $n = 228$), заостренности между выемками в линейно-упругом сосуде постепенно становятся менее острыми. После мере «сглаживания» острых граней, максимальные напряжения плавно убывают, приближаясь к значению, соответствующему сферической оболочке с единым «опоясывающим» повреждением в форме тора.

Численные эксперименты с другими геометрическими параметрами выемок приводят к качественно аналогичным зависимостям коэффициента концентрации напряжений K от числа дефектов n . В начале диапазона изменения n (с сравнительно небольшим количеством дефектов) максимальное напряжение на поверхности оболочки возрастает относительно медленно. Далее, когда между соседними дефектами образуются связки с острыми углами, наблюдается резкий скачок максимальных напряжений. При дальнейшем увеличении n значения максимальных напряжений плавно убывают.

вают. Таким образом, можно заключить, что результаты расчетов, представленные на графике 13, вполне согласуются с выводами, полученными в работе [46] для линейно-упругой сферической оболочки с множественными периодическими выемками различных размеров (вне зависимости от глубины дефектов).

Зависимость коэффициента концентрации напряжений K для упругопластической модели поведения материала от количества дефектов n близка к S-образной (Рис. 14). Небольшой скачок, наблюдаемый на графике, при $n = 276$ является следствием формирования к этому моменту относительно гладкого волнообразного повреждения вдоль экватора сосуда и изгиба оболочки, приводящего к появлению эффекта упрочнения. При значениях $n > 275$ разница между значениями коэффициента концентрации напряжений K для множественных отдельных дефектов и для тора не превышает 3,5%.

Таким образом, данные на графиках 13 и 14 подтверждают предположение о том, что максимальные напряжения в сферической оболочке с отдельными множественными дефектами, периодически расположенными вдоль экватора, стремятся к значениям, наблюдаемым на дне цельной опоясывающей экватор выемки. Очевидно, что это стремление должно сохраняться и для случайно расположенных дефектов. Тем не менее, зависимости $K(n)$ демонстрируют разницу в поведении для случайного и периодического распределения дефектов. Значения коэффициента концентрации напряжений K при случайном паттерне распределения дефектов возрастают с заметно большей скоростью, по сравнению с той, которая наблюдается при равномерном расположении выемок. Как было отмечено, это происходит из-за случайного формирования опасных острых граней между смежными дефектами при любых, даже малых, значениях n . Также особенность для больших значений n объяснет более медленное убывание значений коэффициента концентрации напряжений K для случайно расположенных выемок на поверхности линейно-упругой оболочки.

Следует обратить внимание на то, что максимальные значения коэффициента концентрации напряжений K для случайного паттерна распределения дефектов (Рис. 11) при больших n превышают максимальное на-

блюдаемое значение коэффициента концентрации напряжений K для периодически расположенных дефектов (Рис. 13) (а именно, $K = 4,399$ при $n = 228$). Эта разница объясняется тем, что во втором случае острые углы, образуемые между дефектами, изменяются постепенно, с поэтапным изменением расстояния $L/n - d$ между выемками (L - длина экватора сферы, а d - диаметр выемки). Значения углов, соответствующих максимальному значению K , наблюдаемому на Рис. 13, вероятно, пропускаются. Однако, при некоторых значениях отношения d/L и определенных значениях n , коэффициент концентрации напряжений K в оболочке с периодически дефектами может оказаться очень близким к максимальному значению коэффициента K , наблюдаемому при случайном характере распределения выемок вдоль экватора.

При расчете напряженного состояния в рамках упругопластической модели поведения материала получены противоположные результаты. Максимальные значения коэффициента концентрации напряжений K при случайном паттерне расположения выемок на экваторе (Рис. 12) меньше, чем при периодическом (Рис. 12). Это наблюдение можно объяснить тем фактом, что при больших значениях n ($n \geq 276$), множественные равномерно расположенные дефекты, накапливаясь, формируют относительно глубокое волнообразное повреждение, вдоль которого происходит изгиб стенки оболочки (аналогично изгибу в конструкции с торообразной выемкой, Рис. 10), что приводит к эффекту упрочнения и росту напряжений. Случайно расположенные выемки не образуют непрерывное повреждение, в зоне которого могли бы возникать большие изгибные деформации. По этой причине в данном случае эффект упрочнения проявляется менее выражено, чем в оболочке с периодическими дефектами. Таким образом, взаимное расположение дефектов на поверхности сферической оболочки может оказывать большее влияние на ее локальную прочность, чем объем потери материала.

1.4 Заключение по Главе 1

Предметом исследования, описанного в текущей главе, является сферическая оболочка под внутренним давлением. Внешняя поверхность ослаблена множественными дефектами, расположенными вдоль «экватора». Рассмотрены случайный и равномерный (периодический) паттерны расположения дефектов вдоль кривой с различными значениями их количества, а также предельный случай, соответствующий геометрии с цельным, опоясывающим экватор, торообразным повреждением. Решение задачи проведено в рамках линейно-упругой модели поведения материала и упругопластической модели с линейным упрочнением.

С помощью метода конечных элементов проведена серия численных расчетов напряженного состояния оболочки в окрестности дефектов.

Результаты численных экспериментов позволяют сформулировать следующие заключения:

- Распределение напряжений в окрестности дефектов на поверхности поврежденных оболочек в значительной мере зависит от параметров их конфигурации - взаимного расположения и количества;
- Присутствие множественных взаимодействующих дефектов на поверхности оболочки инициирует значительный рост напряжений с увеличением количества выемок в рамках как линейной, так и нелинейной моделей поведения материала. Тем не менее, в поведении линейно-упругой и упругопластической оболочек выявлены заметные различия: в упругом состоянии максимальные напряжения, вызванные присутствием множественных дефектов, могут быть вдвое выше значений в геометрии с единственным дефектом, а в упругопластическом - эта разница не превышает 30%;
- Кроме того, в упругой оболочке с большим количеством дефектов можно наблюдать небольшой спад концентрации напряжений при дальнейшем их накоплении вследствие постепенного сглаживания поверхности;

- Значения максимальных напряжений в окрестности отдельных выемок стремятся к напряжениям, наблюдаемым «на дне» цельного торообразного повреждения, по мере увеличения числа дефектов.
- В упругой оболочке с отдельными дефектами в определенных конфигурациях могут появляться значения максимальных напряжений, значительно превосходящие соответствующие значения в сосуде с повреждением в форме тора. По этой причине недопустимо оценивать локальную прочность упругих сосудов в зависимости лишь от уменьшения их толщины в исследуемой области. При рассмотрении упругопластических сосудов можно использовать данное упрощение, так как максимальные напряжения в сосуде с торообразным повреждением являются верхним пределом для напряжений в сосуде с множественными дефектами;
- Концентрация напряжений при случайном паттерне распределения дефектов может быть значительно выше, чем в случае их периодического расположения, при одинаковом числе выемок. Это происходит из-за случайного формирования опасных острых граней между смежными дефектами. Однако, упругопластические сферические оболочки с большим количеством дефектов могут демонстрировать противоположное поведение в силу эффекта упрочнения. Из этого следует, что конфигурация дефектов на поверхности сосуда оказывает большее влияние на его локальную прочность, чем объем потерь материала, и что случайное расположение дефектов не всегда можно качественно аппроксимировать периодическим паттерном.

Глава 2. Анализ напряженного состояния оболочки с дефектом в форме узкого цилиндра

2.1 Постановка задачи

Рассматривается сферический сосуд с одиночным коррозионным питтингом. Пусть r и h – внутренний радиус и толщина оболочки сосуда соответственно. На внешней поверхности сосуда имеется одиночный дефект, форма которого состоит из цилиндрической и полусферической (основание дефекта) частей (Рис. 15). Радиус кривизны полусферической части соответствует параметру $d = 0,5$ мм, а глубина дефекта обозначена l .

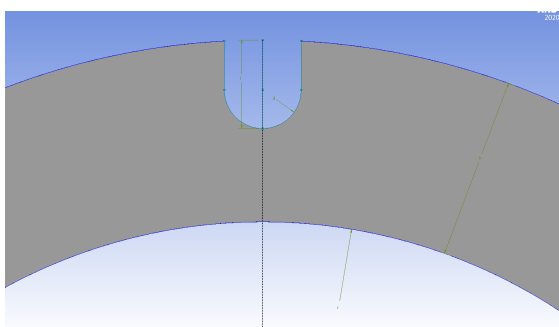


Рис. 15: Поперечное сечение геометрической модели сферической оболочки с одиночным дефектом. Область вблизи дефекта

Требуется:

- выполнить серии численных расчетов напряженного состояния сосуда с дефектом;
- построить графики зависимостей коэффициента концентрации напряжений (ККН) от глубины одиночного питтинга l при фиксированных значениях геометрических параметров сосуда: толщины h и внутреннего радиуса r ;
- на основании расчетов сформулировать выводы о влиянии развития коррозионного поражения (от роста его глубины с определенной скоростью) на поверхности сферической оболочки под давлением на концентрацию напряжений в окрестности дефекта (без учета взаимодействия дефектов).

2.2 Построение геометрической и конечно-элементной моделей

Для проведения серии численных экспериментов с помощью метода конечных элементов в CAD-редакторе ANSYS DesignModeler был создан проект с параметризованной геометрической моделью. Для решения задачи в осесимметричной постановке необходимо построить геометрию, представляющую поперечное сечение сферической оболочки с дефектом (Рис. 16).

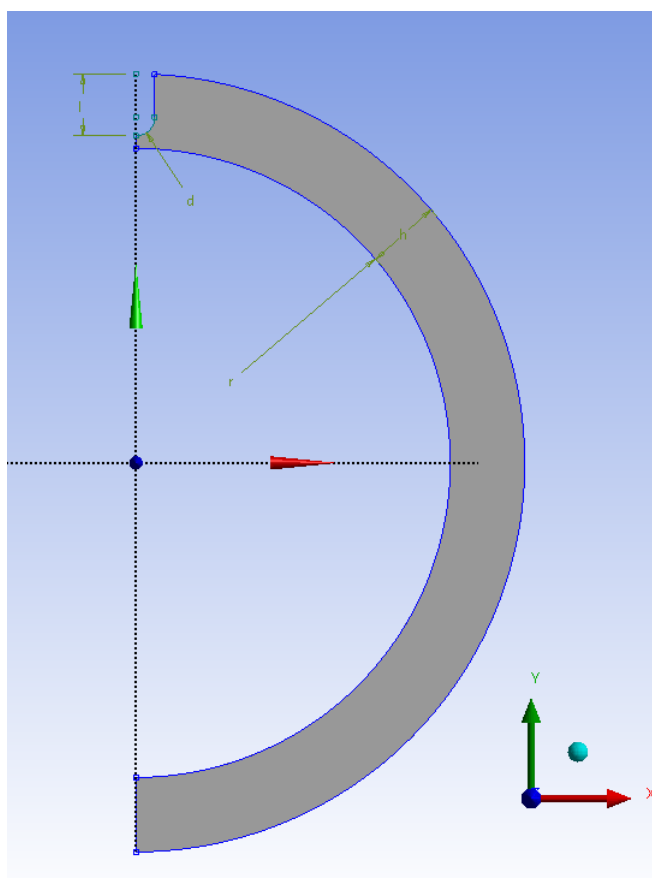


Рис. 16: Поперечное сечение геометрической модели сферической оболочки с одиночным дефектом

С целью достижения требуемой точности и достоверности результатов численного анализа в ANSYS Mechanical при построении конечно-элементной сетки были применены специальные методы, такие как локальное увеличение ее плотности в области дефекта (Рис. 17). При этом было реализовано параметрическое построение конечно-элементной сетки: для

каждой уникальной геометрической модели характеристики элементов и узлов сетки определялись в зависимости от геометрических параметров этой модели.

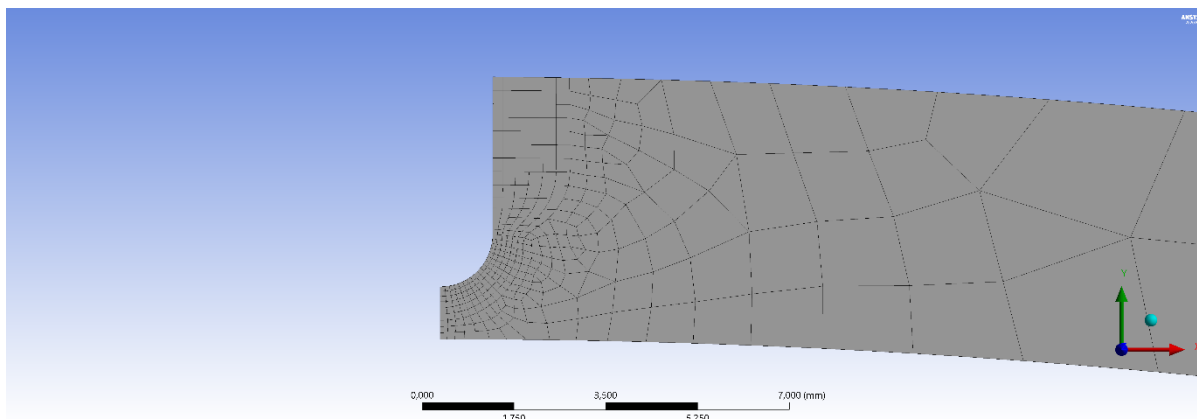


Рис. 17: Поперечное сечение геометрической модели сферической оболочки с одиночным дефектом. Конечно-элементная сетка в окрестности дефекта

Из библиотеки материалов была выбрана нержавеющая сталь марки 304 (Stainless Steel 304). Характеристики материала описаны в секции «Построение геометрической и конечно-элементной моделей» Главы 1. Серия численных расчетов напряженного состояния сферической оболочки проводилась как в рамках линейной теории упругости, так и с учетом пластического поведения материала с использованием линейной модели деформационного упрочнения (аналогично Гл.1, Рис. 6).

Серии численных расчетов проводились для сферических оболочек со следующими значениями геометрических параметров:

- внутренний радиус оболочки $r \in [150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050]$ мм;
- толщина оболочки $h \in [5, 10, 15, 20, 25, 30]$ мм.

Для каждой уникальной пары (r, h) были построены 50 различных 2D CAD-моделей (геометрий) с возрастающим значением глубины выемки l в диапазоне $[d; h - 1]$.

Также дополнительно было проведено построение нескольких 3D CAD-моделей сферического сосуда с одиночным дефектом (Рис. 18) с такими же геометрическими параметрами таким образом, чтобы поперечное

сечение каждой 3D-геометрии имело соответствие среди построенных 2D-моделей. Результаты численных расчетов для при использовании 2D- и 3D-моделирования совпали. Каждая модель была исследована на внутреннюю сходимость.

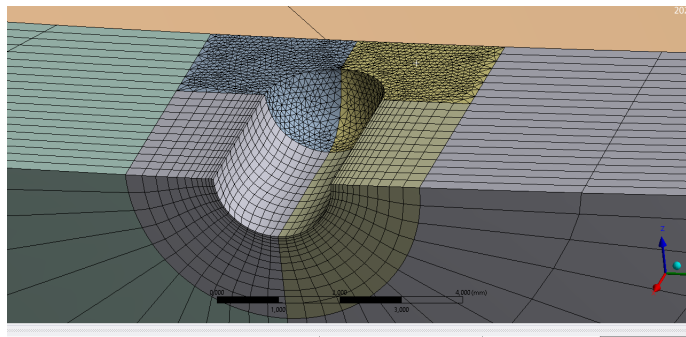


Рис. 18: Фрагмент 3D-геометрии сферической оболочки с одиночным дефектом. Конечно-элементная сетка в окрестности дефекта

Для проведения численных экспериментов при решении осесимметричных задач в ANSYS Mechanical целесообразно использовать 2D-анализ, обладающий существенными преимуществами:

- упрощение геометрической модели, сокращающее время на ее создание и обеспечивающее возможность параметризации;
- сокращение требуемых вычислительных ресурсов;
- повышение точности результатов расчета (особенно при анализе объектов с цилиндрической симметрией);
- стабильность сходимости расчета.

2.3 Анализ результатов

В рамках текущей главы коэффициент концентрации напряжений (ККН) K определяется отношением:

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_1^{outer}},$$

где σ_{max} – максимальное главное напряжение на внешней поверхности оболочки с дефектом, σ_1^{outer} – главное напряжение на внешней поверхности сферического сосуда без дефектов, вычисленное как решение задачи Ламе для полой сферы под постоянным внутренним давлением.

Для бездефектной сферической оболочки тензор напряжений в сферических координатах в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\phi\phi} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{RR} \end{pmatrix}.$$

Для внешней поверхности оболочки справедливо:

$$\sigma_{RR} = \frac{pr^3}{(r+h)^3 - r^3},$$

$$\sigma_{\phi\phi} = \sigma_{\theta\theta} = 1,5 \frac{pr^3}{(r+h)^3 - r^3}.$$

Очевидно, что $\sigma_{\phi\phi} = \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{RR}$. Тогда главное напряжение σ_1^{outer} на внешней поверхности:

$$\sigma_1^{outer} = \sigma_{\phi\phi} = 1,5 \frac{pr^3}{(r+h)^3 - r^3},$$

где p – внутреннее давление, r и h – внутренний радиус и толщина стенки оболочки соответственно.

Учитывая цели задачи, для определения коэффициента концентрации напряжений K максимальное напряжение σ_{max} , наблюдаемое на внешней поверхности оболочки в окрестности дефекта, нормируется значением

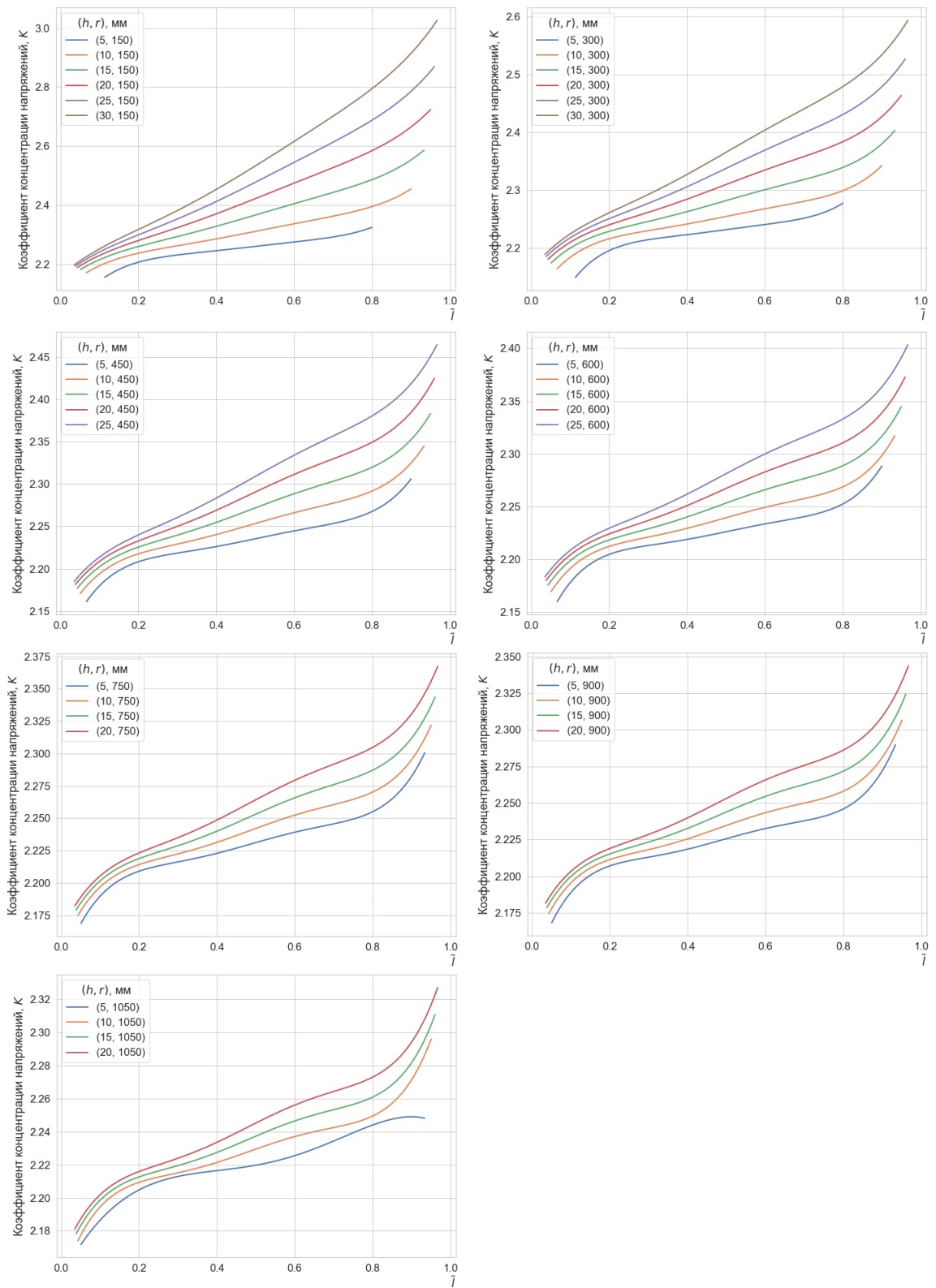


Рис. 19: Зависимость коэффициента концентрации напряжений K от геометрических параметров с фиксированным значением внутреннего радиуса оболочки r

напряжений на внешней поверхности идеальной полый сферы σ_1^{outer} . Выбор именно такого подхода к определению коэффициента позволит в дальнейшем оценить механохимический эффект, вызванный ростом питтинга. Следует отметить, что в качестве альтернативного варианта определения ККН возможно использование отношение максимального напряжения σ_{max} в окрестности дефекта к напряжению на внешней поверхности неповрежденной оболочки с толщиной, уменьшенной на значение глубины питтинга ($\tilde{h} = h - l$). Однако, такой метод расчета коэффициента концентрации напряжений не информативен при оценке локальной прочности сферической оболочки, ослабленной питтинговым дефектом.

Зависимости коэффициента концентрации напряжений K от различных геометрических параметров задачи представлены на графиках 20 и 19 ($\tilde{l} = l/h$).

Данные, представленные на графиках, свидетельствуют о том, что отношение толщины стенки сферической оболочки к ее внутреннему радиусу оказывает существенное влияние на коэффициент концентрации напряжений в окрестности дефекта. При этом для рассмотренных значений выявлена слабая зависимость коэффициента от абсолютных размеров сосуда. Установлено, что увеличение значения отношения толщины оболочки к ее внутреннему радиусу влечет повышение концентрации напряжений в окрестности дефекта.

В начале развития питтинга (при малых значениях его глубины) разница в значениях коэффициента концентрации напряжений мала для оболочек с различными геометрическими параметрами. Однако, данная разница увеличивается по мере роста дефекта. Однако, при малых значениях отношения толщины оболочки к ее внутреннему радиусу данная особенность уже не наблюдается. Согласно наблюдениям, значения коэффициента концентрации напряжений возрастают монотонно с ростом глубины питтинга до некоторого значения (0,8 — 0,9 от толщины стенки оболочки).

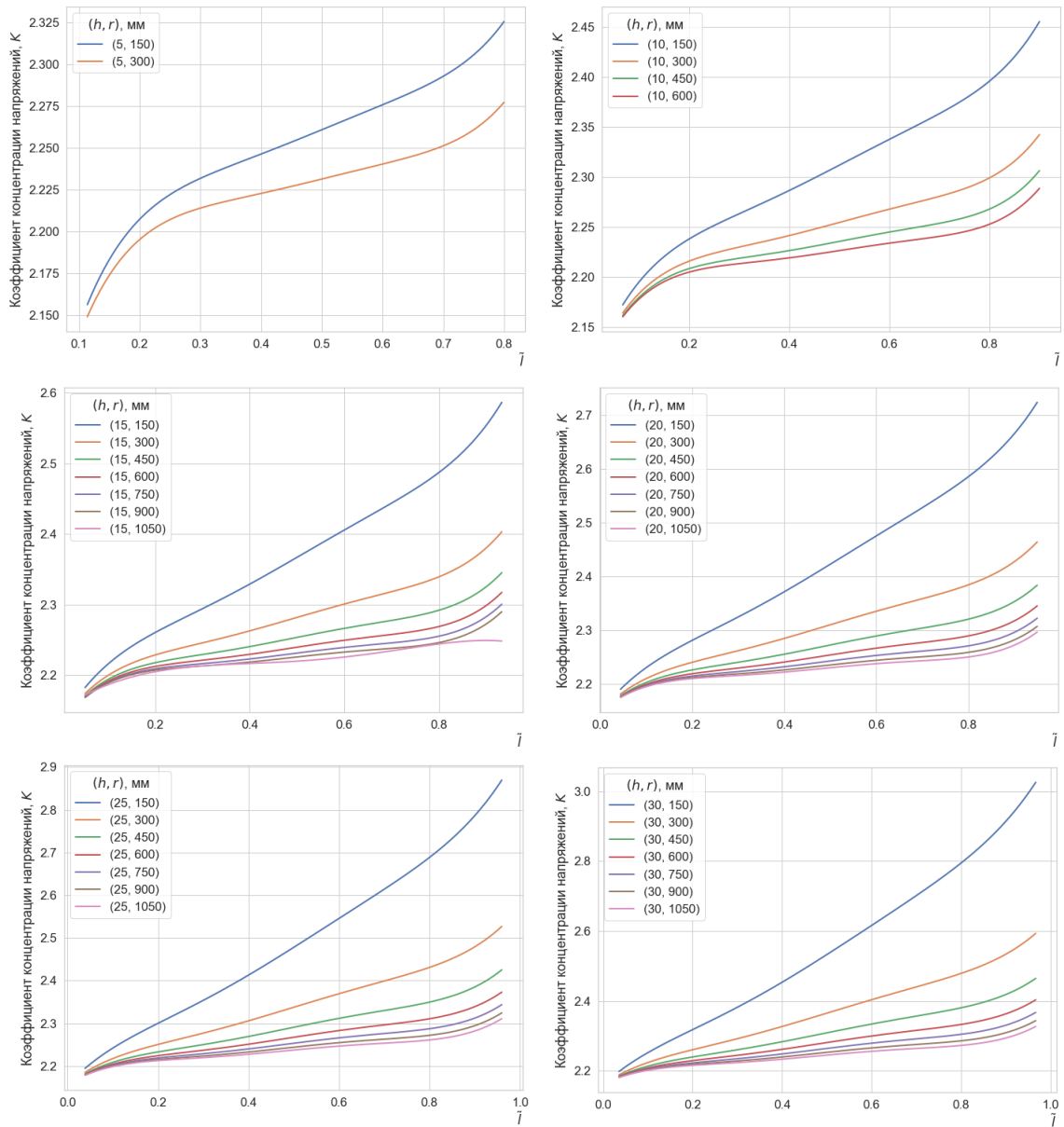


Рис. 20: Зависимость коэффициента концентрации напряжений K от геометрических параметров с фиксированным значением толщины оболочки h

2.4 Заключение по Главе 2

В рамках исследования, описанного в текущей главе, рассмотрена сферическая оболочка под внутренним давлением. Внешняя поверхность оболочки ослаблена узким цилиндрическим питтингом.

С помощью метода конечных элементов проведена серия численных расчетов напряженного состояния сосуда в окрестности дефекта. Построены и проанализированы графики, отражающие данные об изменении коэффициента концентрации напряжений в ослабленной области по мере роста питтинга при заданных абсолютных размерах сосуда.

На основании анализа результатов численных экспериментов сделаны следующие выводы об уровне напряжений в окрестности особенности в виде одиночного питтинга на внешней поверхности сферической оболочки:

- Отношение толщины стенки сферической оболочки к ее внутреннему радиусу демонстрирует значительное влияние на коэффициент концентрации напряжений в окрестности дефекта с фиксированным радиусом кривизны;
- В рассмотренном случае, а именно, когда радиус кривизны сферической части выемки много меньше внутреннего радиуса оболочки, коэффициент концентрации напряжений слабо зависит от абсолютных размеров сосуда;
- Увеличение значения отношения толщины оболочки к ее внутреннему радиусу влечет повышение концентрации напряжений в окрестности дефекта;
- Наблюдения показали, что на «начальном этапе» развития питтинга (при малых значениях его глубины) разница в значениях коэффициента концентрации напряжений мала для оболочек с различными геометрическими параметрами. Однако, данная разница увеличивается по мере развития дефекта (в сосудах большей толщины при фиксированном радиусе скорость возрастания коэффициента концентрации напряжений выше). Однако, для «предельно» малых (менее $1/70$)

значений отношения толщины оболочки к ее внутреннему радиусу данная особенность не сохраняется;

- По мере роста глубины питтинга до некоторого «предельного» значения (0,8 — 0,9 от толщины оболочки) значения коэффициента концентрации напряжений возрастают монотонно (для геометрических моделей, где отношение толщины сосуда к его радиусу достаточно велико; в противном случае, монотонная зависимость нарушается).

Список литературы

- [1] Moss Dennis R. and Basic Michael M. *Pressure Vessel Design Manual.*, volume 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [2] Somnath Chattopadhyay. *Pressure Vessels: Design and Practice.* 10 2004.
- [3] American Society of Mechanical Engineers. *Boiler and Pressure Vessel Code.* ASME, New York.
- [4] Muhammet Cerit. Corrosion pit-induced stress concentration in spherical pressure vessel. *Thin-Walled Structures*, 136:106–112, 2019.
- [5] Donatello Annaratone. *Pressure Vessel Design.* Springer Berlin, Heidelberg, 2017.
- [6] Rajarshi Mukherjee. Reimagining pressure vessels in the 21st century. *Reinforced Plastics*, 63, 10 2018.
- [7] Chris Red. Pressure vessels for alternative fuels, 2014-2023. 2014.
- [8] Farhad Nabhani, Temilade Ladokun, and Vahid Askari. Reduction of stresses in cylindrical pressure vessels using finite element analysis. In David Moratal, editor, *Finite Element Analysis*, chapter 15. IntechOpen, Rijeka, 2012.
- [9] J.R. Thomson. Chapter 7 - learning from ignorance: A brief history of pressure vessel integrity and failures. In J.R. Thomson, editor, *High Integrity Systems and Safety Management in Hazardous Industries*, pages 99–125. Butterworth-Heinemann, Boston, 2015.
- [10] Amol Kisan Mali, Mr. Hemant Bhosale, Mr. Dilpreet Singh Bedi, and Mr. Akash Modasara. A review paper on study of pressure vessel, design and analysis. 2017.
- [11] J. R. Davis. *Corrosion: Understanding the Basics.* ASM International, 2000.

- [12] Mohammad Reza Khedmati and Zorareh Hadj Mohammad Esmaeil Nouri. Analytical simulation of nonlinear elastic–plastic average stress–average strain relationships for un-corroded/both-sides randomly corroded steel plates under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 86:132–141, 2015.
- [13] *ASM Handbook. Corrosion: Materials*, volume 13B. ASM International, 2005.
- [14] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto, and Hironori Arai. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report). *Marine Structures*, 17:403–432, 09 2004.
- [15] Huang Yongchang and Zhang Jianqi. *Materials Corrosion and Protection*. De Gruyter, 2018.
- [16] E.M. Gutman, R.M. Bergman, and S.P. Levitsky. Influence of internal uniform corrosion on stability loss of a thin-walled spherical shell subjected to external pressure. *Corrosion Science*, 111:212–215, 2016.
- [17] Yulia Grigoryevna Pronina. Lifetime assessment for an ideal elastoplastic thick-walled spherical member under general mechanochemical corrosion conditions. In *COMPLAS XII: Proceedings of the XII International Conference on Computational Plasticity: Fundamentals and Applications*, pages 729–738. CIMNE, 2013.
- [18] Yulia Pronina and Olga Sedova. Analytical Solution for the Lifetime of a Spherical Shell of Arbitrary Thickness Under the Pressure of Corrosive Environments: The Effect of Thermal and Elastic Stresses. *Journal of Applied Mechanics*, 88(6), 03 2021.
- [19] Olga Sedova and Yulia Pronina. The thermoelasticity problem for pressure vessels with protective coatings, operating under conditions of mechanochemical corrosion. *International Journal of Engineering Science*, 170:103589, 2022.

- [20] Kaige Wu, Woo-Sang Jung, and Jai-Won Byeon. In-situ monitoring of pitting corrosion on vertically positioned 304 stainless steel by analyzing acoustic-emission energy parameter. *Corrosion Science*, 105:8–16, 2016.
- [21] Aurélien Fabas, Daniel Monceau, Sebastien Doublet, and Aurélie Rouaix-Vande Put. Modelling of the kinetics of pitting corrosion by metal dusting. *Corrosion Science*, 98:592–604, 2015.
- [22] Jianxing Yu, Huakun Wang, Yang Yu, Zhen Luo, Weidong Liu, and Caimei Wang. Corrosion behavior of x65 pipeline steel: Comparison of wet–dry cycle and full immersion. *Corrosion Science*, 133:276–287, 2018.
- [23] Youde Wang, Shanhua Xu, and Li Anbang. Flexural performance evaluation of corroded steel beams based on 3d corrosion morphology. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16:1–16, 01 2020.
- [24] Sarah Sultana, Yikun Wang, Adam Sobey, Julian Wharton, and R. Sheno. Influence of corrosion on the ultimate compressive strength of steel plates and stiffened panels. *Thin-Walled Structures*, 96:95–104, 2015.
- [25] Yi Huang, Yan Zhang, Gang Liu, and Qi Zhang. Ultimate strength assessment of hull structural plate with pitting corrosion damnification under biaxial compression. *Ocean Engineering*, 37(17):1503–1512, 2010.
- [26] Zhongwei Zhao, Hongwei Zhang, Lina Xian, and Haiqing Liu. Tensile strength of q345 steel with random pitting corrosion based on numerical analysis. *Thin-Walled Structures*, 148:106579, 2020.
- [27] Muhammet Cerit. Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit. *Corrosion Science*, 67:225–232, 2013.
- [28] Shulong Zhang and Wenxing Zhou. Assessment of effects of idealized defect shape and width on the burst capacity of corroded pipelines. *Thin-Walled Structures*, 154:106806, 2020.

- [29] Zheng Liang, Yao Xiao, and Jie Zhang. Stress–Strain Analysis of a Pipeline With Inner and Outer Corrosion Defects. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 140(6), 11 2018.
- [30] Liang Feng, Luocun Hu, Xuguang Chen, and Hongda Shi. A parametric study on effects of pitting corrosion on stiffened panels’ ultimate strength. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12:699–710, 2020.
- [31] Kong Fah Tee and Alvan Wordu. Burst strength analysis of pressurized steel pipelines with corrosion and gouge defects. *Engineering Failure Analysis*, 108:104347, 2020.
- [32] Jie Gao, Pei Yang, Xin Li, Jing Zhou, and Jinkun Liu. Analytical prediction of failure pressure for pipeline with long corrosion defect. *Ocean Engineering*, 191:106497, 2019.
- [33] Yan Zhang, Yi Huang, Qi Zhang, and Gang Liu. Ultimate strength of hull structural plate with pitting corrosion damnification under combined loading. *Ocean Engineering*, 116:273–285, 04 2016.
- [34] Y. Frank Cheng Jialin Sun. Modeling of mechano-electrochemical interaction between circumferentially aligned corrosion defects on pipeline under axial tensile stresses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 198:108160, 2021.
- [35] Wenhao Zhu, Dongxu Sun, Fei Xie, Ming Wu, Yaru Xu, and Shuai Ren. Effects of corrosion defect growth on submarine pipeline under operating pressure and axial displacement. *Ocean Engineering*, 267:113297, 2023.
- [36] Daria Okulova, Liana Almazova, Olga Sedova, and Yulia Pronina. On local strength of a spherical vessel with pits distributed along the equator. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 17:70–80, 12 2022.
- [37] Zhongwei Zhao, Bing Liang, Haiqing Liu, and Xiufeng Wu. Influence of pitting corrosion on the bending capacity of thin-walled circular tubes.

Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, 11 2018.

- [38] Renhua Wang and R. Shenoi. Experimental and numerical study on ultimate strength of steel tubular members with pitting corrosion damage. *Marine Structures*, 64:124–137, 01 2019.
- [39] Huakun Wang, Yang Yu, Jiangxing Yu, Jinghui Duan, Yu Zhang, Li Zhenmian, and Caimei Wang. Effect of 3d random pitting defects on the collapse pressure of pipe part i experiment. *Thin-Walled Structures*, 129, 04 2018.
- [40] Yihan Liao, Changlei Liu, Tao Wang, Taolong Xu, Jie Zhang, and Liang Ge. Mechanical behavior analysis of gas pipeline with defects under lateral landslide. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235:6752 – 6766, 2021.
- [41] Zhongwei Zhao, Haiqing Liu, and Bing Liang. Probability distribution of the compression capacity of welded hollow spherical joints with randomly located corrosion. *Thin-Walled Structures*, 137:167–176, 2019.
- [42] Amal Ben Ahmed, Mohamed Iben Houria, Raouf Fathallah, and Habib Sidhom. The effect of interacting defects on the hcf behavior of al-si-mg aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 779:618–629, 2019.
- [43] P. Mu, Y. Nadot, I. Serrano-Munoz, and A. Chabod. Influence of complex defect on cast as7g06-t6 under multiaxial fatigue loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 123:148–162, 2014. Multiaxial Fracture 2013.
- [44] Yongmei Zhu, Wei Guan, Hao Wang, Min Zhao, and Jian Zhang. Buckling of spherical shells with pitting corrosion under external pressure. *Ships and Offshore Structures*, 17(11):2470–2479, 2022.
- [45] Zhongwei Zhao, Pingyi Zhang, Song Zhou, and Xiongtao Fan. Collapse pressure of randomly corroded spherical shell. *Ocean Engineering*, 246:110604, 2022.

- [46] Olga Sedova. Calculation of stresses in a spherical shell with internal surface defects. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, pages 68–73, 01 2020.