



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Факультет	Прикладной математики и механики
Выпускающая кафедра:	Динамика и прочность машин
Направление подготовки:	15.04.03 «Прикладная механика»
Квалификация:	бакалавр

Допускается к защите
Зав.кафедрой ДПМ
В.П.Матвеевко
«__» _____ 2020г.

Выпускная квалификационная работа
Тема: «Оптимизация параметров волоконно-оптического датчика деформации, разработка цифрового двойника и методики их верификации»

Выполнил: студент гр. ДПМ-18-1м
(Виндокурова Е.Р.)
подпись

Научный руководитель:
д-р тех. наук, проф. кафедры ДПМ_
(Плехов О.А.)
должность, ФИО
подпись

Консультант:
ООО «Инверсия-Сенсор», инженер-конструктор III категории
(Созонов Н.С.)
должность, ФИО
подпись

Пермь

2020

Оглавление

Определения.....	3
Введение.....	4
1. Некоторые сведения об оптово-волоконных датчиках.....	6
1.1 Общий принцип действия опто-волоконных датчиков.....	7
1.2 Предпосылки к широкому распространению волоконно-оптических датчиков.....	10
1.3 Обзор современной литературы по оптоволоконным датчикам.....	14
1.4 Некоторые сведения о точечной сварке.....	16
1.5 Сведения о датчике деформации.....	19
2. Экспериментальное исследование частей волоконно-оптического датчика деформации.....	21
2.1 Экспериментальное исследование ВБР.....	21
2.1.1 Описание эксперимента.....	22
2.1.2 Сравнение показаний ВБР и тензорезисторов.....	23
2.2 Явление гистерезиса в датчике деформации.....	26
2.3 Испытания точечной сварки.....	29
2.3.1 Методика испытания.....	29
2.3.2 Результаты испытания.....	31
2.4 Испытания точечной сварки на разрыв.....	34
2.4.1 Методика испытания.....	34
3. Создание цифрового двойника датчика деформации.....	38
3.1 Методика испытания.....	39
3.2. Описание работы.....	39
3.3. Выбор параметров сетки конечных элементов.....	41
3.4. Результаты испытания.....	43
4. Моделирование точечной сварки.....	52

4.1 Результаты.....	54
Заключение:.....	58
Список литературы.....	59

Определения

Гистерезис – максимальная разница показаний датчик при одной и той же деформации на этапе нагрузки и разгрузки.

Точечная контактная сварка — сварочный процесс, при котором детали соединяются в одной или одновременно в нескольких точках.

Цифровой двойник — виртуальный прототип реального объекта, группы объектов или процессов. Частный случай цифрового двойника-математическая модель реализуемая методом конечных элементов.

Введение

В течение десятилетий основным способом измерения физических и механических явлений были электрические датчики (тензорезистивные, струнные, потенциометрические и тд.). Несмотря на их повсеместное использование, электрические датчики имеют ряд недостатков, таких как: потери при передаче сигнала, восприимчивость к электромагнитным помехам, необходимость организации искробезопасной электрической цепи (если существует опасность взрыва). Эти присущие им ограничения делают электрические датчики непригодными или сложными для применения при выполнении ряда задач. Использование волоконно-оптических датчиков является отличным решением данных проблем. В волоконно-оптических датчиках сигналом является свет в оптическом волокне, вместо электричества в медном проводе у традиционных электрических датчиков.

За последние двадцать лет огромное количество инноваций в оптоэлектронике и в области волоконно-оптических телекоммуникаций привело к значительному снижению цен на оптические компоненты и к значительному улучшению их качества. Это позволило волоконно-оптическим датчикам перейти из разряда экспериментальных лабораторных приборов в разряд широко применяемых приборов в таких областях как мониторинг зданий и сооружений и т.д.

На основании волоконно-оптических элементов в настоящее время осуществляется разработка датчиков для измерения различных физических величин: температуры,

ускорения, деформации и многих других. В таких датчиках оптическое волокно может использоваться как в качестве средства передачи сигнала, так и в качестве чувствительного элемента.

Оптоволоконные датчики применяются в различных областях. Они получили широкое распространение благодаря ряду преимуществ по сравнению с традиционными электронными датчиками. Во-первых, это высокая производительность. Кроме того, используемые в волоконно-оптических датчиках элементы являются абсолютно пассивными по отношению к электричеству (не излучают и не проводят электрический ток). Весогабаритные характеристики датчиков являются критичными при использовании их в таких областях, как аэрокосмическая. Благодаря своим небольшим размерам и весу, волоконно-оптические датчики получают существенное преимущество по сравнению со многими другими изделиями. К тому же такие датчики невосприимчивы к электромагнитным помехам, устойчивы к воздействиям внешней среды, а твердотельная структура позволяет им выдерживать предельные уровни вибрационных и ударных нагрузок. К перечисленным выше свойствам можно добавить высокую чувствительность и широкополосность.

Для того чтобы разработать высокоэффективный и надежный датчик деформации необходимо математическое описание процессов деформационного взаимодействия всех элементов датчика. Такое математическое моделирование позволит рационально подобрать основную структурную схему датчика.

В данной работе датчик представляет собой оптическое волокно, которое с помощью клея крепится на металлической подложке. Анализ деформационного поведения такой структуры осуществляется в ходе математического моделирования с использованием теории упругости и пластичности. Смоделировано крепление датчика с помощью точечной сварки. Основным вопросом при моделировании датчика является построение модели, которая будет отражать реальные значения с поверхности объекта и нахождением критических зон, которые могут влиять на показания датчиков.

Цель работы - построить математическую модель взаимодействия всех элементов датчика с деформируемой поверхностью, учесть способ крепления датчика и экспериментально исследовать части датчика. Провести экспериментальное исследование частей датчика и выявления зон влияющих на показания. Проверить экспериментально точность показания брэгговской решетки в сравнение с тензорезисторами. По полученным данным составить рекомендации к изменению конструкции датчика.

Научная новизна работы заключается в следующем разработана модель учитывающая особенности приварки датчика деформации на поверхность объекта, решенная в упругой и упруго-пластичной постановке.

1. Некоторые сведения об оптово-волоконных датчиках

Оптически-волоконные детекторы представляют собой устройства, используемые во многих сферах промышленности для определения концентрации веществ, скорости вращения, показателя преломления, механического напряжения, давления, уровня жидкости, температуры, вибрации, ускорения, положения в пространстве. Оптически волоконный тип датчиков приобретает все большее распространение для фиксации изменения параметров в ходе технологических процессов благодаря стабильности в течении продолжительного периода времени, устойчивости к помехам, имеющим электромагнитную природу, возможности бесконтактного измерения и другим преимуществам.

Развитие технологий предусматривает разработку автоматизированных систем управления и контроля, внедрение сенсорных элементов, позволяющих с высокой точностью контактным или бесконтактным способом определять изменение физических величин. Среди других требований к перспективным конструкциям современных метрологических устройств, специалисты называют:

- долговечность;
- небольшие затраты энергии на работу;
- возможность применения совместно с микроэлектронными устройствами для обработки данных;
- стабильность;
- небольшие габариты;
- малый вес;
- высокая достоверность получаемой информации;

- малая трудоемкость изготовления;
- небольшая стоимость.

1.1 Общий принцип действия оптоволоконных датчиков

Принцип работы волоконно-оптических датчиков основан на преобразовании сигнала, полученного от чувствительного элемента в результате внешних изменений в показатели рассеянного или отраженного излучения.

Оптоволоконные датчики могут работать по одному из двух принципов:

Точечные – в качестве базового элемента в них используются селектирующие зеркала. Световое излучение исходит от широкополосного источника и отражается в виде узкой полосы. Оставшаяся часть светового потока передается по оптоволокну. Этот вариант передачи сигнала позволяет одновременно использовать несколько контроллеров в автоматизированной линии и обеспечивает наиболее точную передачу сигнала. Датчики такого типа могут использоваться для контроля давления, температуры, вибрации и других показателей.

Распределенные – датчики этого типа применяются для контроля уровня температуры. Опросное устройство провоцирует импульс лазера, и он рассеивается при передаче через оптоволокну. В результате можно

определить, какова температура в каждой из точек оптоволоконного канала.

По аналогичному принципу могут работать акустические датчики. В этом случае анализатор фиксирует колебания излучения, передаваемого по оптоволоконному каналу. Это дает возможность зафиксировать звук и определить его источник. Датчики такого типа могут применяться, например, в системах контроля доступа - они дают возможность выявить несанкционированное проникновение.

Если датчик использует оптоволокно для трансляции сигнала на расстоянии, то оно должно быть многомодовым. Одномодовое оптоволокно применяется для устройств, в которых оно выполняет функции сенсора.

Наиболее широкое распространение получили оптоволоконные датчики, работающие с использованием брэгговских решеток. Они могут использоваться даже в агрессивных средах, где приборы постоянно подвергаются агрессивному внешнему воздействию.

Можно перечислить целый ряд отраслей, в которых применяются оптоволоконные датчики:

- горнодобывающая промышленность - такие устройства используются в пожарных извещателях для мониторинга состояния шахтных стволов и конвейерных лент;

- нефтегазовая сфера отрасли – приборы применяются при термомониторинге скважин и трубопроводных линий, дают возможность мгновенно отслеживать даже небольшие изменения температуры;
- строительство – датчики широко востребованы в системе «умных домов», они позволяют отслеживать различные показатели для автоматического реагирования систем жизнеобеспечения. Также они применяются для постоянного мониторинга мостов, теплотрасс, инженерных систем;
- авиационно-космическая отрасль – новые технологии позволили создать высокоточные датчики, фиксирующие незначительные деформации корпусов, а также отклонения от температурного уровня;
- электроэнергетика – датчики могут использоваться для мониторинга силовых линий.

Для проведения измерения с помощью волоконно-оптического датчика необходим ряд устройств. Ключевым элементом такого датчика является оптическое волокно, используемое для оценки явлений внешней среды двумя различными способами. Иногда применяются внешние чувствительные элементы, а иногда само волокно выступает в качестве чувствительного элемента. В первом случае оптоволокна используются исключительно в качестве носителей информации, входящей в черный ящик и выходящей из него в виде луча света. Во втором типе волоконно-оптических датчиков воздействия внешней

среды осуществляют модуляцию проходящего через оптоволоконно светового потока и используют непосредственно свойства самого волокна .

Оптическое волокно чаще всего изготавливают из кварцевого стекла, хотя существуют и другие варианты: многокомпонентные стеклянные, пластмассовые, инфракрасные и другие.

Для подачи света в оптоволоконно используют светоизлучающие приборы. Важными характеристиками при выборе таких приборов являются их рабочая длина волны и надежность. В волоконно-оптических датчиках обычно используются диоды и лазеры.

После прохождения сигнала через датчик необходимо определить параметры света, приносящего информацию об измеряемом процессе. Для этого используются световые детекторы. При проектировании датчиков необходимы светоприемные приборы, удовлетворяющие ряду требований, в первую очередь требованию малогабаритности, малого потребления мощности, высокой чувствительности, быстрой реакции. Это могут быть, например, pin-диоды, полупроводниковые и лавинные фотодиоды. Такие приемники в сочетании с соответствующими оптическими компонентами, такими как дифракционные решетки или фильтры, могут также применяться для слежения за интенсивностью отдельных составляющих спектра.

1.2 Предпосылки к широкому распространению волоконно-оптических датчиков

Волоконная оптика, хоть и стала широко использоваться в современном мире, является довольно простой и старой технологией. Передача света с помощью закона преломления, принципа, который делает возможным использование волоконной оптики, была впервые продемонстрирована Даниэлем Колладоном и Жаком Бабинэ в Париже в начале 1840-х годов. Джон Тиндел через несколько десятков лет ввел показательные демонстрации в свои общественные лекции в Лондоне. Тиндел также писал о свойствах полного внутреннего отражения в своей ознакомительной работе о природе света в 1870 году: «Когда свет проходит в направлении от воздуха в воду, то преломленный луч смещается в сторону перпендикуляра. В случае, когда угол, образованный лучом в воде и перпендикуляром к поверхности, превышает 48 градусов, световой луч не покинет среду воды вообще: он будет полностью отражен на поверхности... Угол, ограничивающий границу полного внутреннего отражения, называется углом полного внутреннего отражения среды. Для воды он составляет $48^{\circ}27'$, для флинтового стекла - $38^{\circ}41'$, а для алмаза - $23^{\circ}42'$ ».

Практическое применение, такое как освещение полости рта внутри при стоматологических процедурах, появилось в начале XX века. Передача изображений по трубкам была продемонстрирована отдельно радио-

экспериментатором Кларенсом Ханселем и телевизионным первопроходцем Джоном Логи Бэйрдом в 1920 годах. Этот эффект впервые был применен для внутреннего медицинского обследования Гайнриком Ламмом в следующем десятилетии. В 1952 году физик Нерайндер Сайнг Капани провел эксперимент, который привел к изобретению оптического волокна. Современное оптическое волокно, стеклянное волокно которого покрыто прозрачной оболочкой для определения наиболее подходящего коэффициента преломления появилось позже в этом десятилетии. После этого все разработки сконцентрировались на пучках оптических волокон, необходимых для передачи изображения. Первый волоконно-оптический гастроскоп был запатентован в 1956 году Бэзилем Хиршовицем, Си. Уилбером Питерзом и Лоренцом И. Куртизом, являющимися исследователями Университета Мичигана в 1956 году. В процессе разработки гастроскопа, Куртиз создал первое волокно со стеклянным покрытием; предыдущие образцы оптического волокна в качестве оболочки с низким показателем преломления материала оболочки использовали воздух, а также непрактичные масла и воск. Вскоре появился целый ряд других применений, связанных с передачей изображений.

Юн-ичи Нишазава, японский ученый из университета Тохоку, был первым, кто предложил использовать оптические волокна в сфере связи в 1963 году. Нишазава изобрел другие технологии, которые внесли свой вклад в развитие оптоволоконных линий связи, а также Нишазава изобрел градиентные оптические волокна в 1964 году как

канал для передачи света от полупроводниковых лазеров на большие расстояния с малыми потерями.

В 1965 году Чарльз К. Као и Джордж А. Гокхем из британской компании Стандарт Телефонс энд кейблс (STC) были первыми, кто предложили идею уменьшения затухания в оптическом волокне к показателю, ниже 20 децибел на километр (дБ /км), таким образом, позволяя использовать волокна в качестве практического средства коммуникации. Они предполагали, что причиной затухания, имеющегося в волокнах на тот момент, являются больше примеси, которые могут быть удалены из волокна, чем фундаментальные физические эффекты, такие как рассеяние. Определяющий уровень затухания 20 дБ / км впервые был достигнут в 1970 году исследователями Робертом Д. Маурером, Дональдом Кеком, Питером К. Шульцом и Франко Зимаром, работающими на американского производителя стекла стекольный завод Каминг Гласс Воркс, в настоящее время завод именуется Корнинг Инкорпорэйтид. Они продемонстрировали волокна с уровнем затухания в 17 дБ /км в котором кварцевое стекло содержало примеси титана. Через несколько лет они создали волокно с уровнем затухания всего в 4 дБ /км, используя за основу примеси диоксид германия. Столь низкое затухание положило начало низким телекоммуникациям с использованием оптического волокна и сделало Интернет доступным. В 1981 году компания Дженерал Электрик выпустила слитки плавленого кварца, которые могут использоваться для создания оптоволоконных нитей с длиной в 25 миль (40 Ион).

Затухание в современном оптическом волоконном кабеле значительно меньше, чем в медном электрическом, что повлияло на развитие линий телекоммуникационных передач длиной 50-80 км (31-50 миль). Оптоволоконный усилитель с примесями эрбия, что существенно уменьшает стоимость оптоволоконных систем большой длины путем уменьшения количества или даже очень часто, устранения необходимости опико-электронных-оптических ретрансляторов, был разработан Дэвидом Н. Пейном из Университета Саусхамтона и Эмануэлем Дезервиром из Бел Лабс в 1986 году. В усовершенствованном оптическом волокне, применяемом сегодня, для сердцевины и оболочки используется стекло, которое повышает устойчивость к процессам старения. Оно было изобретено Герхардом Бернизом в 1973 году компанией Скот Глес в Германии.

В 1991 году недавно возникшее направление фотонных кристаллов привело к развитию фотонно-кристаллического оптического волокна, проводившего свет благодаря дифракционным явлениям на периодической структуре материала быстрее, чем это выполняется путем полного внутреннего отражения. Первое фотонное кристаллическое волокно стало коммерчески доступным в 2000 году. Фотонные кристаллические волокна могут быть предназначены для передачи более высокой мощности, если сравнивать с мощностью, которую передают обычные волокна, и их частоты можно регулировать с целью улучшения эффективности определенных сфер применения. За последние несколько лет волоконно-оптические

технологии с огромной скоростью продвинулись вперед в довольно тихий и сдержанный способ. Обусловленный необходимостью достижения более высокой пропускной способности на длинных расстояниях магистральных каналов связи.

Это улучшение эксплуатационных показателей идет рука об руку с развитием подходящих методологий передачи и доступа.

Волоконно-оптические технологии далеки от обычной банальности. Следующим шагом будут когерентные системы передачи, которые позволят улучшить качество передачи данных по оптическому волокну, по крайней мере, на десятикратный множитель.

Целью данной работы является исследование привариваемого датчика деформации и нахождение критических зон, которые могут влиять на погрешность датчика. Работа разделена на две основные части, это экспериментальное исследование частей датчика и построение цифрового двойника (математической модели).

1.3 Обзор современной литературы по оптоволоконным датчикам

В современной литературе достаточно хорошо освещены принципы действия волоконно-оптических датчиков, области применения и их особенности [20, 21, 22].

Большое применение волоконно-оптические датчики находят в области строительного мониторинга. В работе А.П. Неугодникова, М.Ю. Ахлебнина, Ф.А. Егорова, В.А. Быковского [18] описаны результаты применения систем мониторинга для высотных зданий: разработка, сертификация, серийный выпуск волоконно-оптических датчиков для систем мониторинга; методики и технологии монтажа систем мониторинга в различных условиях строительства; методы организации мониторинга, измерений и интерпретации данных. В работе Ф.А. Егорова, А.П. Неугодникова, В.А. Быковского [15] изложены основные принципы систем мониторинга технического состояния строительных сооружений на базе волоконной оптики. Представлены данные по двум видам волоконно-оптических датчиков для систем мониторинга. Проанализированы данные лабораторных испытаний описанных датчиков. В работе А.П. Неугодникова, Ф.А. Егорова, М.Ю. Ахлебнина, А.С. Волчка [19] рассматривается проблема внедрения мониторинга технического состояния строительных сооружений во время строительства и в период эксплуатации. Анализируются нормативные аспекты регулирования технического мониторинга в строительстве. Рассмотрены

примеры строительного мониторинга на базе волоконно-оптических информационно-измерительных систем. В работе Ф.А. Егорова, О.И. Ткачева, А.П. Неугодникова, И.В. Рубцова, В.И. Пospelова [16] описан принцип действия оптоволоконного датчика деформаций, а так же представлены результаты серий экспериментов по определению выходного сигнала датчика от ступенчатой нагрузки на базу, к которой он приклеен.

Все вышеперечисленные работы базируются на эмпирических данных, в то время как теоретический анализ взаимодействия системы исследуемое тело - датчик не рассматривается. В статье И.Г. Наймушина, Н.А. Труфанова, И.Н. Шардакова [17] рассмотрены деформационные процессы, происходящие в системе тело-клей-оптоволоконный датчик. Однако в данной работе датчик представляет собой оптоволокно, приклеиваемое непосредственно к поверхности исследуемого тела, что вызывает некоторые проблемы при установке и эксплуатации.

1.4 Некоторые сведения о точечной сварке

В датчике деформации, который рассматривается в данном исследовании используется соединение частей датчика, а также при монтаже на образец с помощью точечной сварки.

Точечная сварка является разновидностью контактной сварки. При этом способе, нагрев металла до температуры его плавления осуществляется теплом, которое образуется при прохождении большого электрического тока от одной детали к другой через место их контакта. Одновременно с пропусканием тока и некоторое время спустя после него производится сжатие деталей, в результате чего происходит взаимное проникновение и сплавление нагретых участков металла.

Особенностями контактной точечной сварки являются: малое время сварки (от 0,1 до нескольких секунд), большой сварочный ток (более 1000А), малое напряжение в сварочной цепи (1-10В, обычно 2-3В), значительное усилие сжимающее место сварки (от нескольких десятков до сотен кг), небольшая зона расплавления.

Точечную сварку чаще всего применяют для соединения листовых заготовок внахлестку, реже - для сварки стержневых материалов. Диапазон толщин, свариваемых ею, составляет от нескольких микрометров до 2-3 см, однако чаще всего толщина свариваемого металла варьируется от десятых долей до 5-6 мм.

Весь процесс точечной сварки можно условно разделить на 3 этапа.

Сжатие деталей, вызывающее пластическую деформацию микронеровностей в цепочке электрод-деталь-деталь-электрод.

Включение импульса электрического тока, приводящего к нагреву металла, его расплавлению в зоне соединения и образованию жидкого ядра. По мере прохождения тока ядро увеличивается по высоте и диаметру до максимальных размеров. Происходит образование связей в жидкой фазе металла. При этом продолжается пластическая осадка контактной зоны до окончательного размера. Сжатие деталей обеспечивает образование уплотняющего пояса вокруг расплавленного ядра, который препятствует выплеску металла из зоны сварки.

Выключение тока, охлаждение и кристаллизация металла, заканчивающаяся образованием литого ядра. При охлаждении объем металла уменьшается, и возникают остаточные напряжения. Последние являются нежелательным явлением, с которым борются различными способами. Усилие, сжимающее электроды, снимается с некоторой задержкой после отключения тока. Это обеспечивает необходимые условия для лучшей кристаллизации металла. В некоторых случаях в заключительной стадии контактной точечной сварки рекомендуется даже увеличивать усилие прижима. Оно обеспечивает проковывание металла, устраняющее неоднородности шва и снимающее напряжения.

Поверхность деталей в зоне контакта деталей между собой и в месте контакта с электродами зачищают от окислов

и других загрязнений. При плохой зачистке возрастают потери мощности, ухудшается качество соединений и увеличивается износ электродов. В технологии контактной точечной сварки, для зачистки поверхности используют пескоструйную обработку, наждачные круги и металлические щетки, а также травление в специальных растворах.

Высокие требования предъявляются к качеству поверхности деталей из алюминиевых и магниевых сплавов. Целью подготовки поверхности под сварку является удаление без повреждения металла относительно толстой пленки окислов с высоким и неравномерным электрическим сопротивлением.

Расчет деформации волоконно-оптических датчиков проводился формуле

$$\varepsilon \left[\frac{\text{мкм}}{\text{м}} \right] = \frac{10^6}{k} \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0},$$

где λ_0 – длина волны датчика в недеформированном состоянии;

$\Delta \lambda$ – изменение длины волны датчика относительно принятого 0 по деформации;

k – коэффициент тензочувствительности датчика.

Коэффициент тензочувствительности для ВБР $k_{\text{ВБР}} = 0,79845$. Для датчика на коэффициент накладываются поправка на передачу деформации 1,092 и толщину датчика, определяемая как $\left(1 + \frac{hd}{h/2}\right)$, где $hd = 0,225$ – высота расположения чувствительного элемента датчика, h – толщина образца. Для балка А эта поправка составляет 1,0563, для балка Б – 1,0554. Итоговый коэффициент тензочувствительности определяется как произведение коэффициента тензочувствительности ВБР и всех поправок и составляет 0,92095 для балка А и 0,92021 для балки Б.

1.5 Сведения о датчике деформации

Привариваемый поверхностный датчик деформации обладает защитной силиконовой крышкой, крепится при помощи точечной сварки на контролируемую поверхность.

- Стальные трубопроводы и части трубопроводов
- Строительные металлические конструкции
- Мостовые сооружения
- Емкостное оборудование
- Технологическое оборудование из металла
- Опорные конструкции

Таблица 1- Характеристики датчика деформации

Диапазон измерений деформации, мкм/м:	от -3000 до +3000
Разрешение, мкм/м	1,0
Диапазон длин волн, нм	1500-1600
Материал корпуса	Нержавеющая сталь

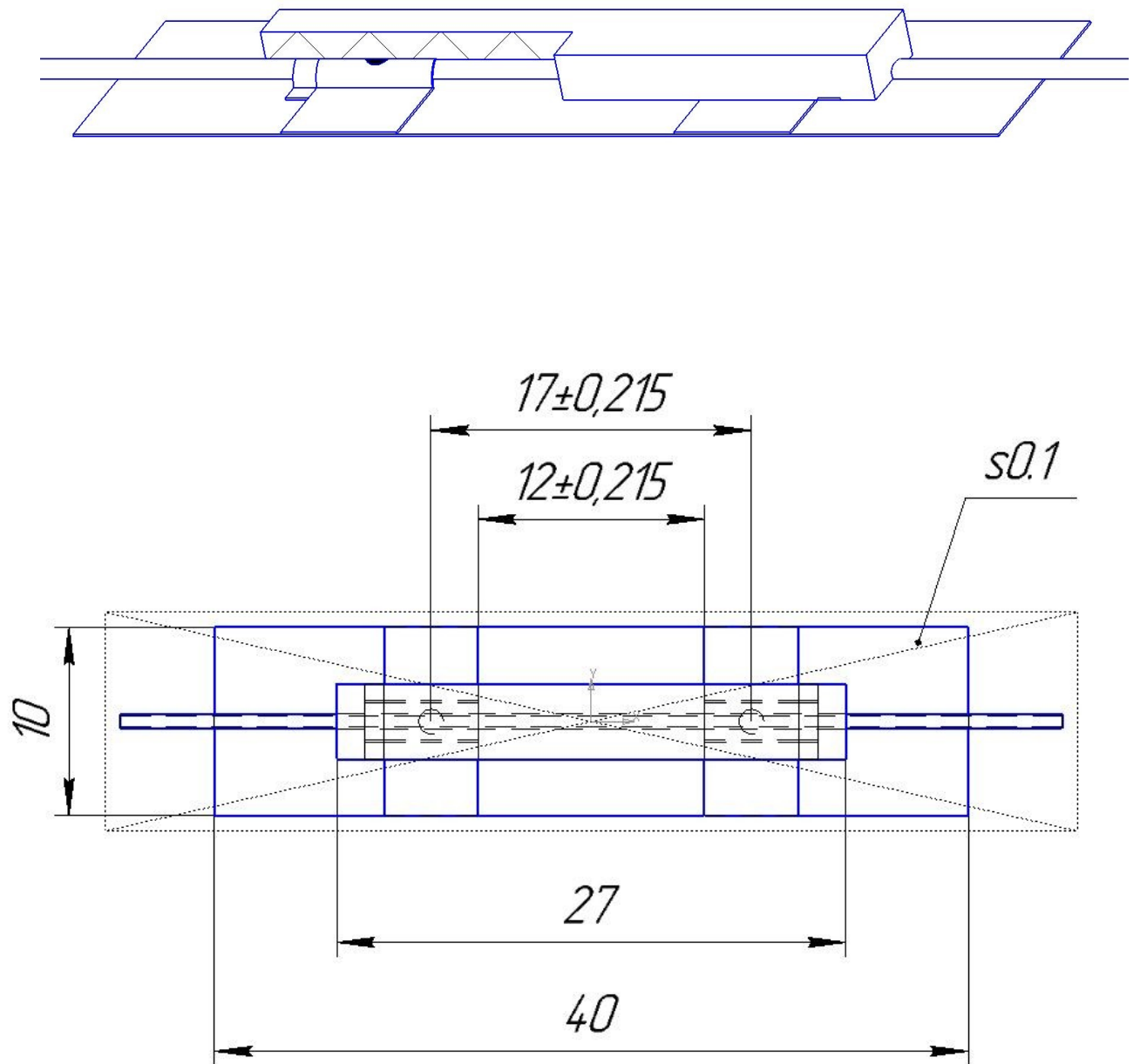


Рисунок 1 - Геометрические размеры датчика

2. Экспериментальное исследование частей волоконно-оптического датчика деформации.

Рассмотрим части датчика деформации, как отдельные части и исследуем их возможное влияние на показания. Большой объём всего датчика занимает подложка. Волокно соприкасается с подложкой, которая может испытывать неравномерность деформаций. Во время монтажа подложку приваривают с помощью точечной сварки к образцу. Явление точечной сварки образует новый материал со свойствами отличающимся от изначального. Значит места точечной сварки, подложка и волокно могут считаться местами содержащие факторы, которые могут оказывать влияние на показания датчика деформации

2.1 Экспериментальное исследование ВБР

Первоочередным шагом в исследование стоял вопрос о достоверности показаний, которые фиксирует брэгговская решетка. Для этого был спланирован эксперимент в котором использовались тензорезисторы и волоконной брэгговской решетки (ВБР) установленные на одни образцы. Рисунок 1 демонстрирует схему монтажа.

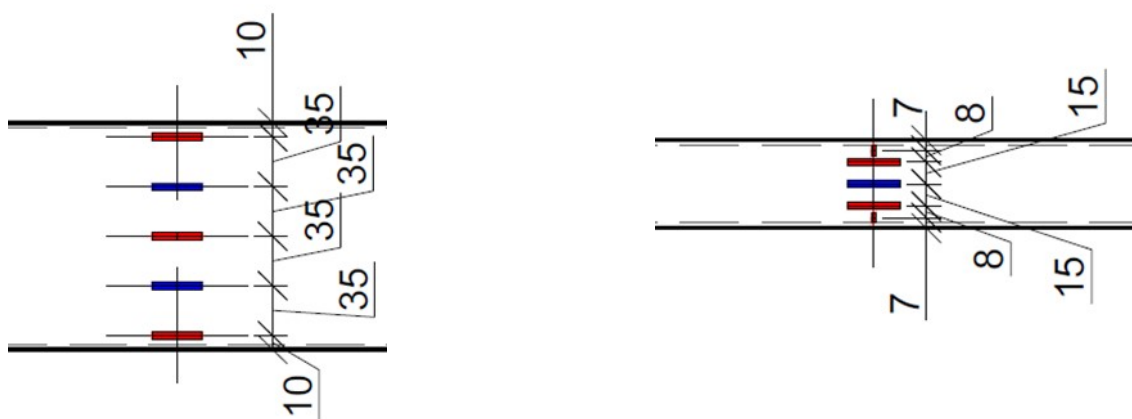
Целью эксперимента: Проверить точность измерения деформации волоконной брэгговской решетки (ВБР). Сравнить показания ВОДД с показаниями тензорезисторов.

На боковых гранях образцов датчики расположены на разном расстоянии от нейтральной оси, поэтому деформации

при изгибе будут различными. Напрямую показания ВБР и тензоресисторов можно сравнивать только на верхней и нижней гранях. На графиках, представленных на рисунках 4 и 5 показаны показания.

2.1.1 Описание эксперимента

Для испытаний были подготовлены 6 длинных и 8 коротких образцов с размещением датчиков согласно рисунку 1. На всех образцах были размещены ВБР, тензоресисторы были смонтированы на 4 длинных образца



и 2 коротких

Размещение датчиков
на боковых сторонах

Размещение датчиков
на верхней и нижней
сторонах

Рисунок 2- Схема размещения датчиков на образцах.

Красным цветом обозначены тензоресисторы, синим - ВБР

Длинные образцы испытывались по схеме нагрузки, представленной на рисунке 2. Короткие образцы испытывались по схеме четырехточечного изгиба (рисунок 3).

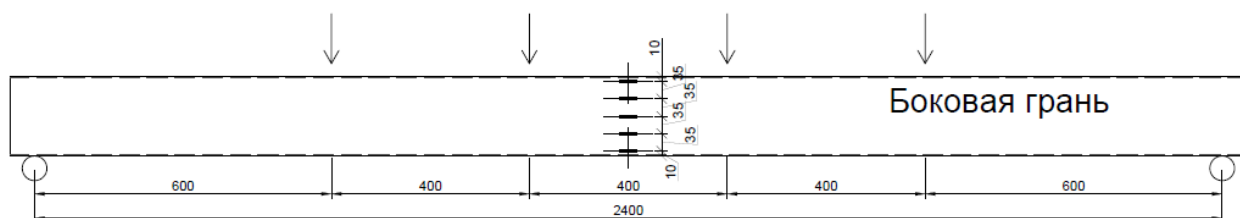


Рисунок 3 – Схема нагружения длинных образцов

2.1.2 Сравнение показаний ВБР и тензорезисторов

Сегодня для измерения деформации успешно применяются электрические сенсоры деформации (тензорезисторы). Разработанные более 50 лет назад, сегодня они технически усовершенствованы и доступны в различных вариантах исполнения. Не так давно для измерения деформации стали использовать и оптические (оптоволоконные) сенсоры. Во многих областях они стали хорошей альтернативой тензорезисторам. В оптоволоконных сенсорах деформации используется дифракционная решетка Брэгга, которая включает большое количество точек отражения, расположенных внутри волокна с определенным интервалом. тодом вытягивания. По сравнению с тензорезисторами оптические сенсоры деформации выдерживают существенно более высокие пиковые нагрузки и обеспечивают на порядок более высокую стойкость к переменным нагрузкам.

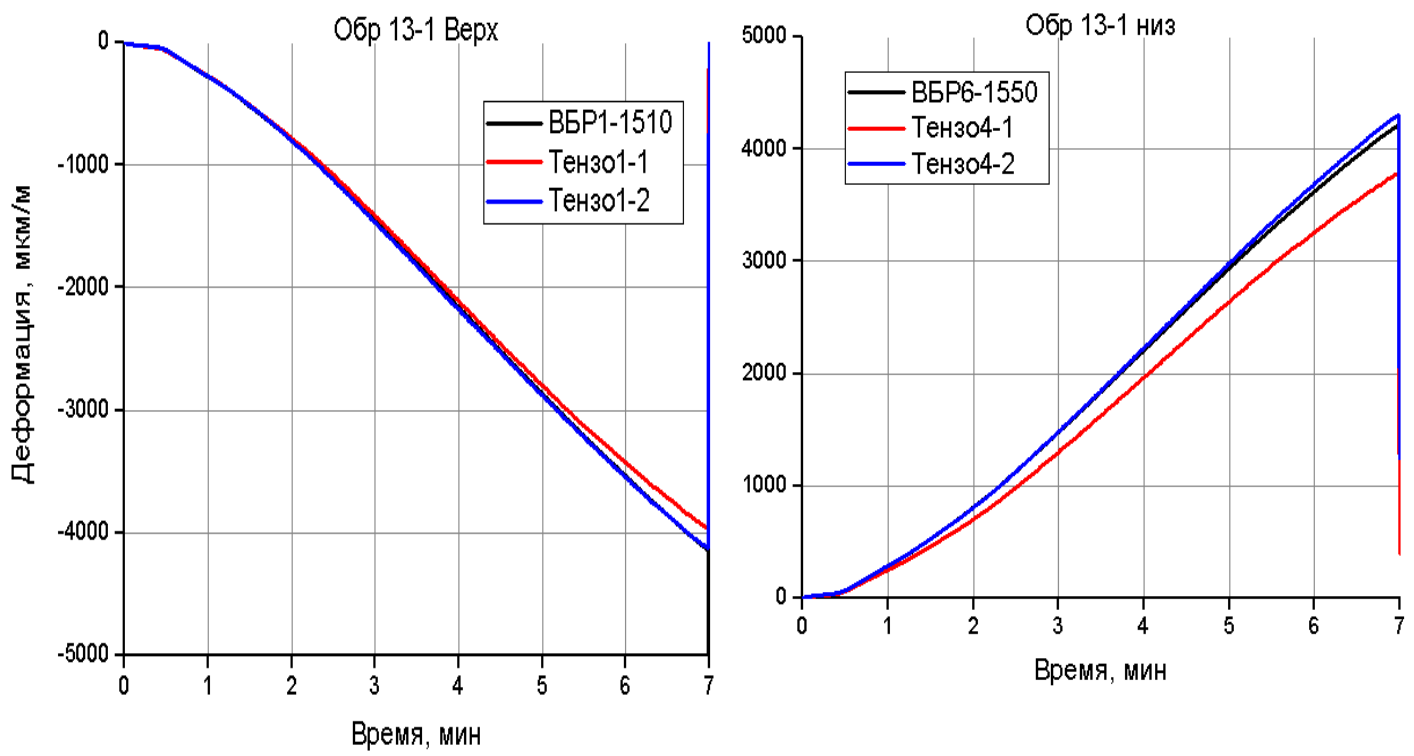


Рисунок 4 – Сравнение показаний ВБР и тензорезисторов на образце 13-1

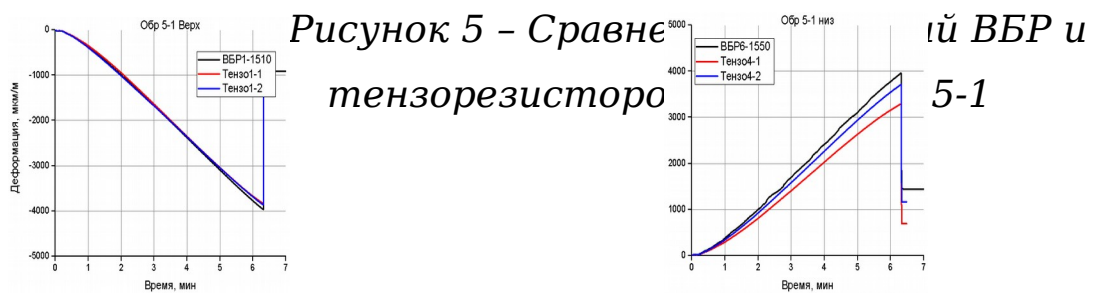


Таблица 1 -Деформация по датчикам в момент разрушения образца

Положение датчиков	Деформация, мкм/м		
	ВБР	Тензорезистор 1	Тензорезистор 2
Обр 13-1 верх	- 4141	-3967	-4126
Обр 13-1 низ	421 4	3777	4304
Обр 5-1 верх	- 3963	-3835	-3865
Обр 5-1 низ	396 12	3291	3712

На графиках, представленных на рисунках 4 и 5 показаны показания. Показания ВБР хорошо согласуются с показаниями тензодатчиков (Таблица 1).

После исследования ВБР можно сделать вывод, что данные фиксируемые с испытанием и их точность измерения сопоставима с точностью измерения деформаций тензорезисторами. Значит необходимо рассмотреть конструкцию самого датчика для определения факторов влияющих на показания датчика деформации.

2.2 Явление гистерезиса в датчике деформации

В теории упругости явление гистерезиса наблюдается в поведении упругих материалов, которые под воздействием больших давлений способны сохранять деформацию и утрачивать её при воздействии обратного давления (например, вытягивание сжатого стержня). Во многом именно это явление объясняет анизотропию механических характеристик кованных изделий, а также их высокие механические качества.

Различают два вида упругого гистерезиса — динамический и статический.

Динамический гистерезис наблюдают при циклически изменяющихся напряжениях, максимальная амплитуда которых существенно ниже предела упругости. Причиной этого вида гистерезиса является неупругость либо вязкоупругость. При неупругости, помимо чисто упругой деформации (отвечающей закону Гука), имеется составляющая, которая полностью исчезает при снятии напряжений, но с некоторым запаздыванием, а при вязкоупругости эта составляющая со временем исчезает не полностью. Как при неупругом, так и вязкоупругом поведении величина не зависит от амплитуды деформации и меняется с частотой изменения нагрузки. Также динамический гистерезис возникает в результате термоупругости, магнитоупругих явлений и изменения положения точечных дефектов и растворённых атомов в кристаллической решётке тела под влиянием приложенных напряжений.

2.3 Испытания точечной сварки

В ходе испытаний ВБР и датчиков деформации было выявлено, что на одном и том же образце датчики имеют значительный гистерезис, при этом у ВБР гистерезис либо отсутствует, либо на порядок меньше. Возможные причины гистерезиса: сварное соединение с образцом либо клей в скобах датчика.

Для причин был предложен следующий эксперимент: приварить голые подложки (без скоб) к образцу, затем приклеить на них ВБР и провести эксперимент. В этом случае отсутствует клей в скобках.

Цель: определить, проявится ли гистерезис на приклеенных к подложкам ВБР

Критерий годности: По отсутствию гистерезиса на приклеенных к подложкам ВБР можно сделать вывод, что причиной гистерезиса является клеевое соединение под скобками. Наличие гистерезиса позволит сделать вывод что его причина в сварном соединении подложки и образца.

Оборудование и материалы:

1. Балка №5 с 4 приклеенными к подложкам ВБР
2. Балка №4 с 4 датчиками и 4 ВБР
3. Балка №3 с 4 датчиками и 1 ВБР

2.3.1 Методика испытания

Балка предварительно нагружалась тренировочными циклами до деформации 3100 мкм/м по показаниям индикатора перемещений 2 раза. Затем задавалась предварительная нагрузка 100 мкм/м и обнулялись показания датчиков и индикатора перемещений.

Измерительный цикл состоит в нагрузке до деформации 3000 мкм/м с шагом 500 мкм/м и выдержкой на каждой ступени не менее 20 с. После 3 измерительных циклов балка переворачивалась, проводились циклы преднагрузки, задавалась начальная деформация 100 мкм/м и снова проводились 3 измерительных цикла.

2.3.2 Результаты испытания

В ходе испытаний выяснилось, что у приклеенных ВБР в ходе эксперимента искажается спектр, затрудняя корректное измерение длины волны. Среди полученных данных только в испытаниях на растяжение удается проанализировать часть данных (рис. 9)

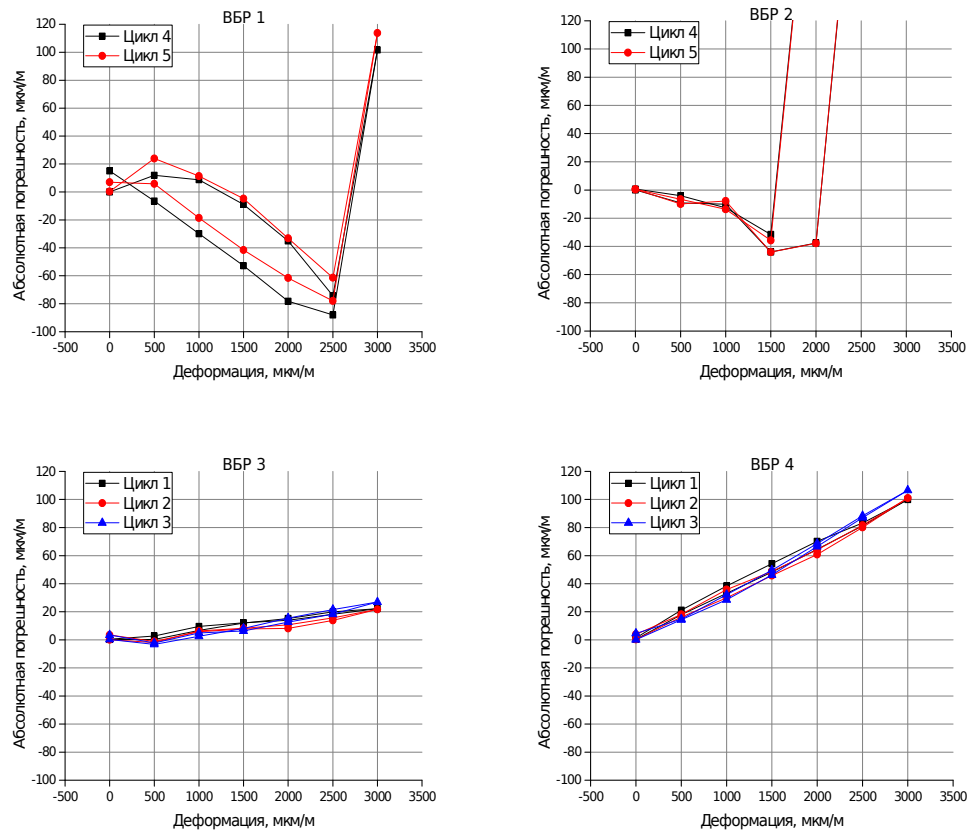


Рисунок 6 – Погрешность измерения деформации для приклеенных на подложки ВБР

По представленным данным только ВБР 1 имеет гистерезис в 47 пм, для остальных гистерезис не превышает 6 пм. Учитывая спектр ВБР 1 (рис. 2), который имеет плохую форму даже при 500 мкм/м, учитывать ее показания некорректно.

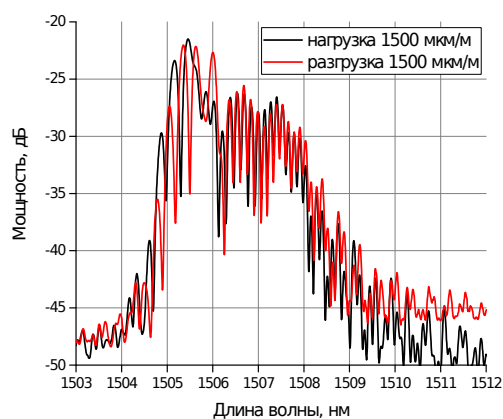


Рисунок 7 – Спектр ВБР 1 при деформации 1500 мкм/м на этапе нагрузки и разгрузки

По результатам аналогичных испытаний проведенного ранее для приклеенной ВБР гистерезис не превосходит 10 мкм/м. Это позволяет сделать вывод, что причина гистерезиса не в приварке подложки.

Так же в параллельных испытаниях для одного из датчиков (1019-307) так же гистерезис не превышал 10 мкм/м. Можно сделать вывод, что причина гистерезиса в некорректной технологии вклейки чувствительного элемента.

Так же были испытаны датчики, у которых в результате температурных испытаний упал натяг на 1,5 нм. Гистерезис до и после температурных испытаний остался на том же уровне (Таблица 2). Это говорит, что даже проскальзывание волокна в клее или оболочке не является причиной увеличения гистерезиса.

Таблица 2 – Сравнение гистерезиса до и после падения натяга в датчике

S/ N	До падения натяжения волокна	После падения натяжения волокна
ВБР1		
ВБР2		

Выводы

- Точечную сварку можно исключить из причин возникновения гистерезиса для .
- Даже при падении натяжения волокна в датчиках гистерезис и погрешность не меняется.
- Вероятная причина гистерезиса – взаимодействие клея и металлических частей датчика.

2.4 Испытания точечной сварки на разрыв

Цель: исследовать подложку датчика на нелинейность деформаций в зоне точечной сварки.

Оборудование и материалы:

Образец:

- Подложка датчика (4шт)
- Пластина 80*100*0,3(2шт)

1.Разрывная машина SHIMADZU

2.Видеоэкстензометр

2.4.1 Методика испытания

Образец, состоящий из 4х подложек датчика попарно сваренных точечной сваркой друг с другом внахлест, (зазор примерно 1мм) и 2х пластин 80*100 мм приваренных точечной сваркой к подожкам.

На образец помещаются точечные отметки, обозначающие нулевое положение (16 точек). Выбирается две исследуемые точки для фиксации перемещений с помощью видеоэкстензометра (точки F, E рис.1.).

Готовый образец помещается в разрывную машину, закрепляется в захватах. Расстояние между захватами 110 мм.

Скорость нагружения составляла 0.5 мм/мин

Проведения испытания на разрыв. Во время проведения эксперимента видеоэкстензометр фиксирует изменения расстояния между двумя заданными точками.



Рисунок 8 -Расположение образца с отметками для видеоэкстензометра

Результаты испытания

- Разрушение образца произошло через 36сек, после начала испытания.
- Первое разрушение произошло в области 1, затем произошло разрушение в области 2.(рис.2)
- Выбранные для видеоэкстензометра точки (точки F, E рис.1.) в окрестности линии точечной сварки, линейно отдаляются друг от друга (Рис.3).
- При увеличении под микроскопом сварочного шва, можно отметить, что область 1(рис.2) в месте отрыва имеет из 8 мест точечной сварки, только одно, позволяющее осуществить надежную сварку(рис.4).



Рисунок 9- места отрыва образца

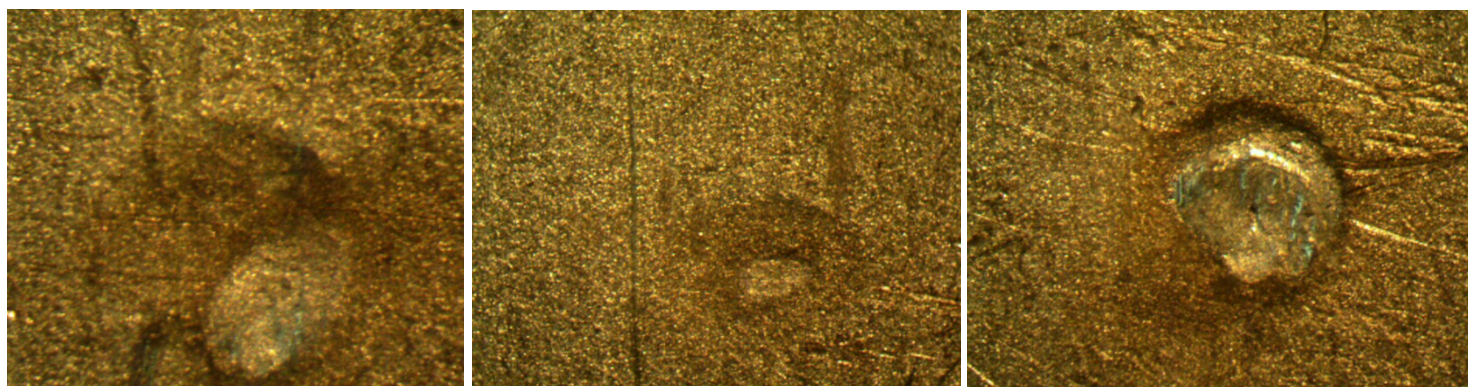


Рисунок 10-Места точечной сварки в месте отрыва под микроскопом

Выводы

- Образец разрушился слишком быстро, выбранный режим сварки не пробил достаточную толщину для приварки. Необходимо изменить режим при подготовке следующих образцов.
- Для получения более наглядной картины, рекомендовано на паре сваренных подложек провести исследование и построение поля деформаций на базе лаборатории ИМСС.
- Для новых образцов использовать только одну пару подложек и большее число контрольных точек. Рассмотреть возможность нанесения сетки.

3. Создание цифрового двойника датчика деформации

Цифровой двойник- цифровая копия процесса. Концепция «цифрового двойника» появилась во время четвертой промышленной революции и направлена на предсказание результатов работы механических объектов, что в дальнейшем помогает производить более качественный продукт. Термин Digital Twins («цифровые двойники») появился еще в начале 2000-х, но с каждым годом, по мере развития технологий, он получает новое наполнение.

Чаще всего цифровые двойники создаются с целью моделирования объектов, напрямую связанных с промышленным производством.

Для построения комплексной модели цифровых двойников применяются различные инструменты, в частности, используются численные методы моделирования физических процессов в материалах объекта с целью прогнозирования реакции изделия на различные эксплуатационные нагрузки, например, на базе метода конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) - основной метод современной строительной механики, лежащий в основе подавляющего большинства современных программных комплексов, предназначенных для выполнения расчетов строительных конструкций на ЭВМ.

Метод конечных элементов впервые был применен в инженерной практике в начале 50-х гг. XX в. Первоначально он развивался по двум независимым один от другого направлениям – инженерному и математическому. На

раннем этапе формулировки МКЭ основывались на принципах строительной механики, что ограничивало сферу его применения. И только когда были сформулированы основы метода в вариационной форме, стало возможным распространение его на многие другие задачи. Быстрое развитие МКЭ шло параллельно с прогрессом современной компьютерной техники и ее применением в различных областях науки и инженерной практики.

В основе метода конечных элементов лежат две идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечные множества элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

Основная задача получить численную модель распределения напряжений в датчике деформации прикрепленному к образцу, для измерения деформации в диапазоне до 3000 мкм/м, испытываемый на растяжение. Определение НДС датчика и выявления зон необходимых в улучшение.

3.1 Методика испытания

Граничные условия				
Жесткая заделка		Растягивающая сила F	Ограничение перемещение больше 3000мкм по оси O	

Основная задача получить численную модель распределения напряжений в датчике деформации

прикрепленному к образцу (габаритные размеры 170*70*30мм), для измерения деформации в диапазоне до 3000 мкм/м, испытываемый на растяжение.

Рисунок 11-Граничные условия

3.2. Описание работы

С помощью математического пакета строиться модель (рис 1), приближенная к реальному датчику деформации. С помощью моделирование воспроизведен эксперимент на растяжение образца с приваренным на него датчик деформации. Материал образца-сталь. Растягивающая сила подобрана так, чтобы вызывать деформацию образца до 300мкм/м. На рисунке 2 представлена сетка конечных элементов. Таблица 3 содержит физико-механические свойства материалов, использованные при расчете.

Таблица 3-. Физико-механические свойства материалов

материал	$E, \text{ Па}$	ν
Сталь	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3
Оптоволокно	$714 \cdot 10^6$	0,1 7
Эпоксидный клей	$3 \cdot 10^9$	0,3 2

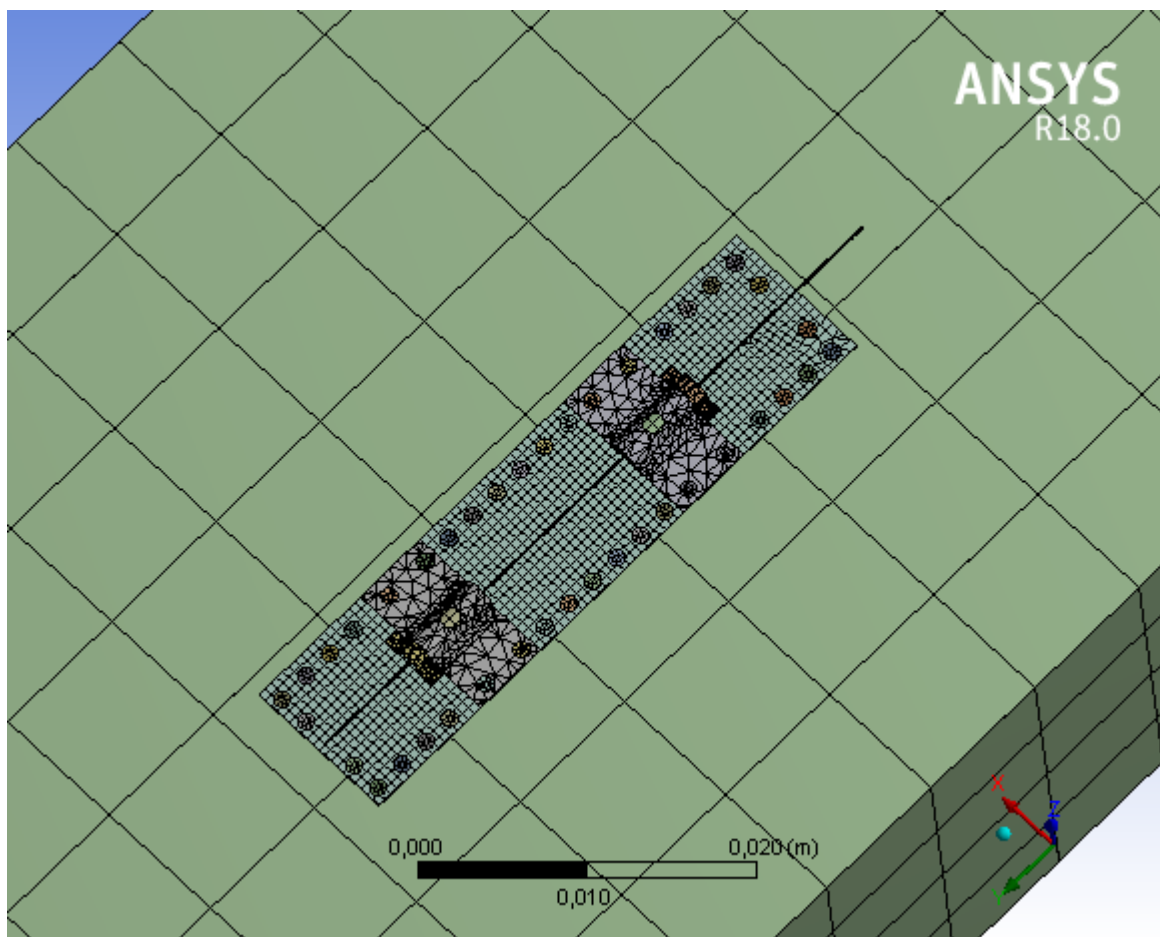


Рисунок 12- Сетка конечных элементов

3.3. Выбор параметров сетки конечных элементов

Была проведена серия расчетов и выбрана оптимальная плотность конечно-элементной сетки. Для оптимальной плотности сетки использовалась процедура сходимости значений собственных частот при равном сгущении сетки. Для проверки была построена модель пластины, теоретически рассчитано решение для свободно опертой пластины по двум противоположным сторонам.

Получено решение первой изгибной частоты и построено численное решение для сеток разной плотностью и размером.

Будем искать решение дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} - k^4 \omega = 0,$$

$$p_{ij} = \pi^2 \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{Dg}{yh}}, i, j = 1, 2, 3 \dots,$$

$$F_j(y) = A_i \sin \frac{j\pi y}{b}$$

Низшие формы колебаний соответственно $i = j = 1, i = j = 2$



*Рисунок 13- График сходимости при изменении
количества элементов в сетке*

По графику сходимости можно сделать вывод, что для нашей модели нас устраивает количество элементов от 4000 ед., что позволит получить точное решение в заданных граничных условиях.

3.4. Результаты испытания

В таблице 4 представлены результаты математического моделирования при различном нагружении. Сравниваются показания деформации волокна и образца и клея.

На рисунке 18 представлены точки выбора при сравнении деформаций, на образце

Таблица 4-. Значения деформаций в различных тестах

	Волокно деформация, мкм/ м	Образец деформации, мкм/ м
Тест1	2590	2600
Тест2	1285	1300
Тест3	2080	2095
Тест 4	3010	3000

На рисунке 14 можно отметить завышенные показания деформаций. Значения представлены в таблице 3. В среднем значения в малой скобе на 30% больше, чем на образце. На рисунке 25 представлены деформации в большой скобе, там отсутствует подобное завышение деформаций, как в малой. Максимальные деформации большой скобы равны 3600мкм.

Таблица 5- Значения деформаций в скобе

	Деформации в скобе, мкм/м
Точка5	5100
Точка 4	4200
Точка 3	3400
Точка 2	2600
Точка 1	2000

Предел упругости для нержавеющей стали принимаем в диапазоне от 450-635 Мпа. Как видно на рисунках 19-21

в некоторых местах, а именно скобе и точеной сварки возникают напряжения больше диапазона предела упругости для материала. Следовательно ожидать в этих местах пластических деформаций.

Месте стыковки большой скобы и клея, возникают деформации выше, чем на образце на 15% больше.

На рисунках 23 и 24 представлены пластические деформации возникающие в скобе и местах точеной сварки, полученные при расчете в упруго-пластичной постановке.

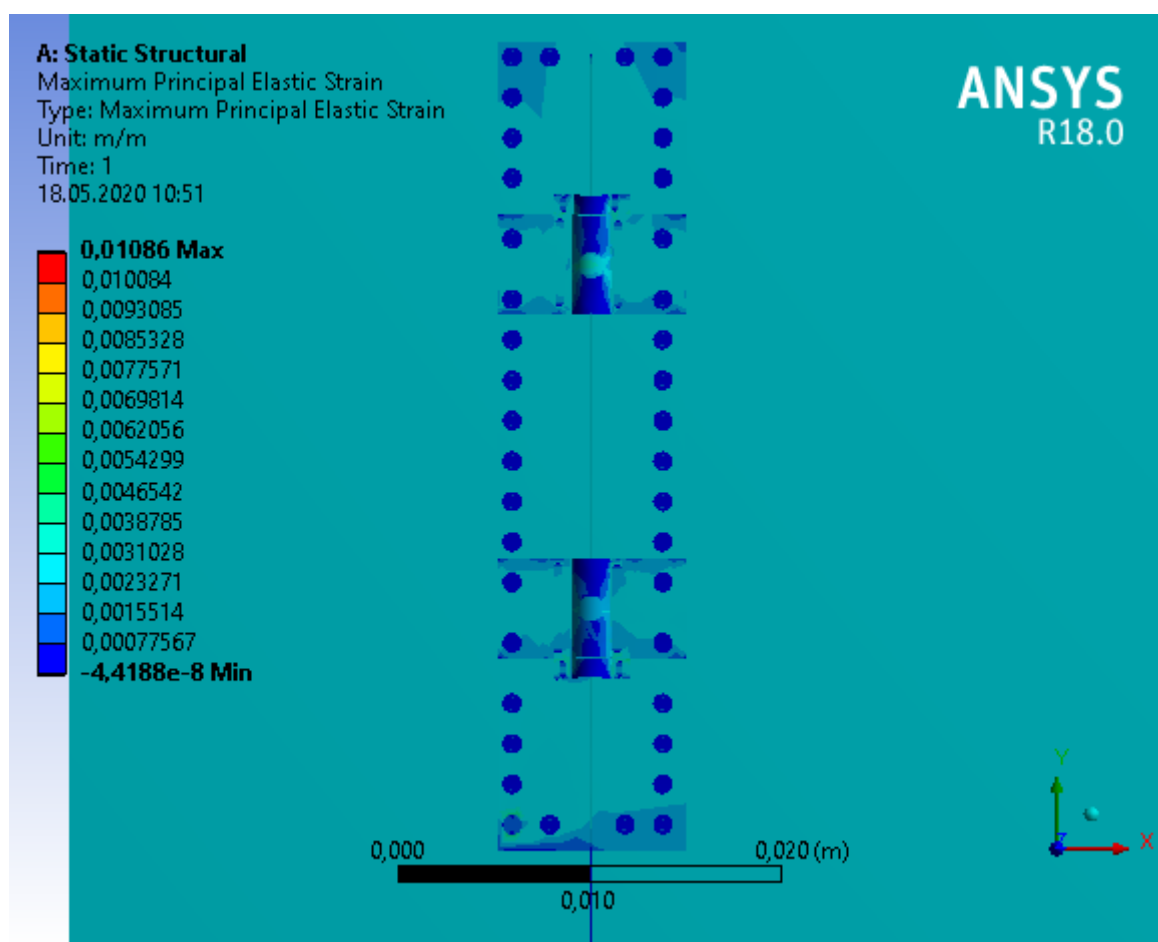


Рисунок 14- Деформации образца и датчика в направлении оси OY

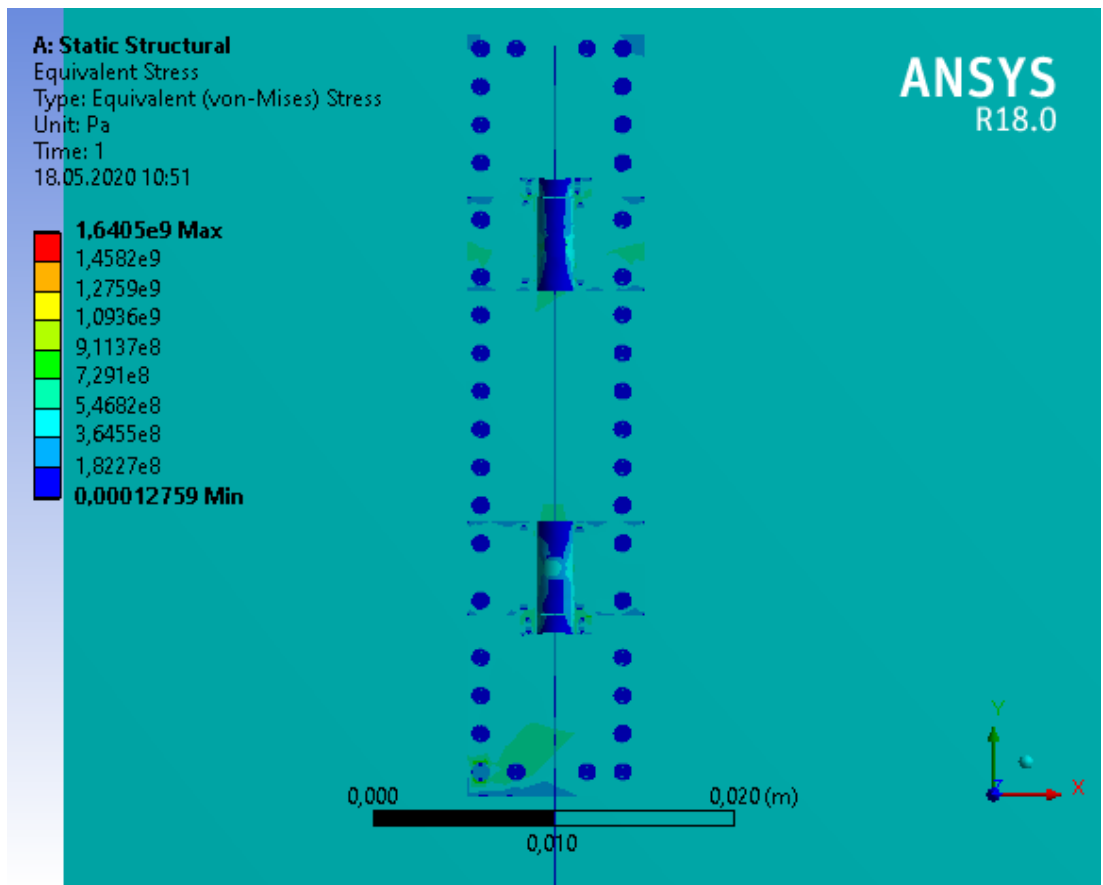
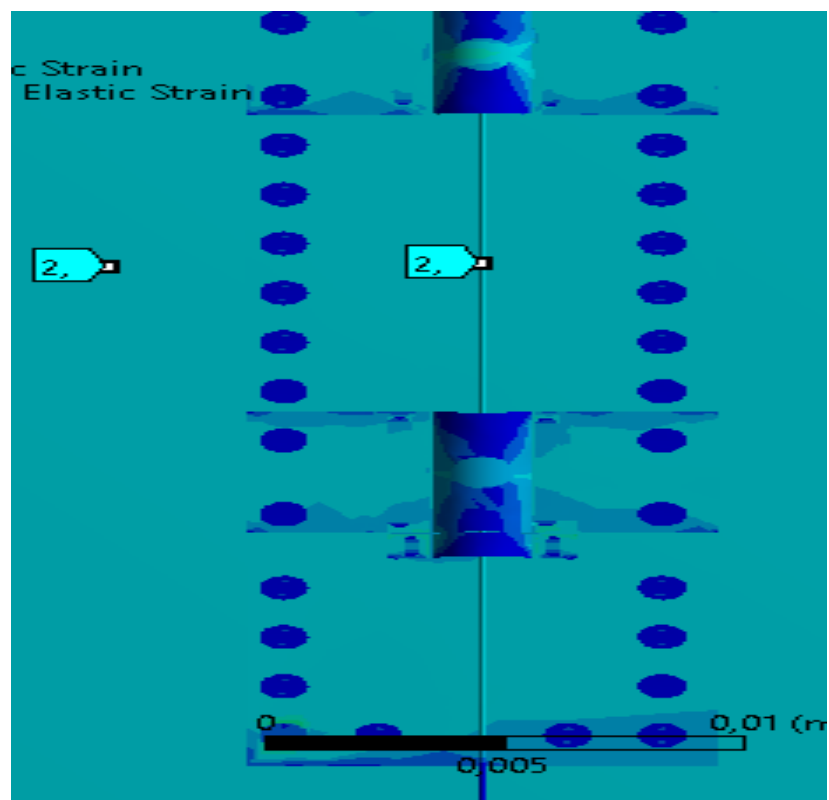


Рисунок 15- Напряжения образца и датчика в направлении оси OY



*Рисунок 16- Точки для сравнения показаний волокна и
образца*

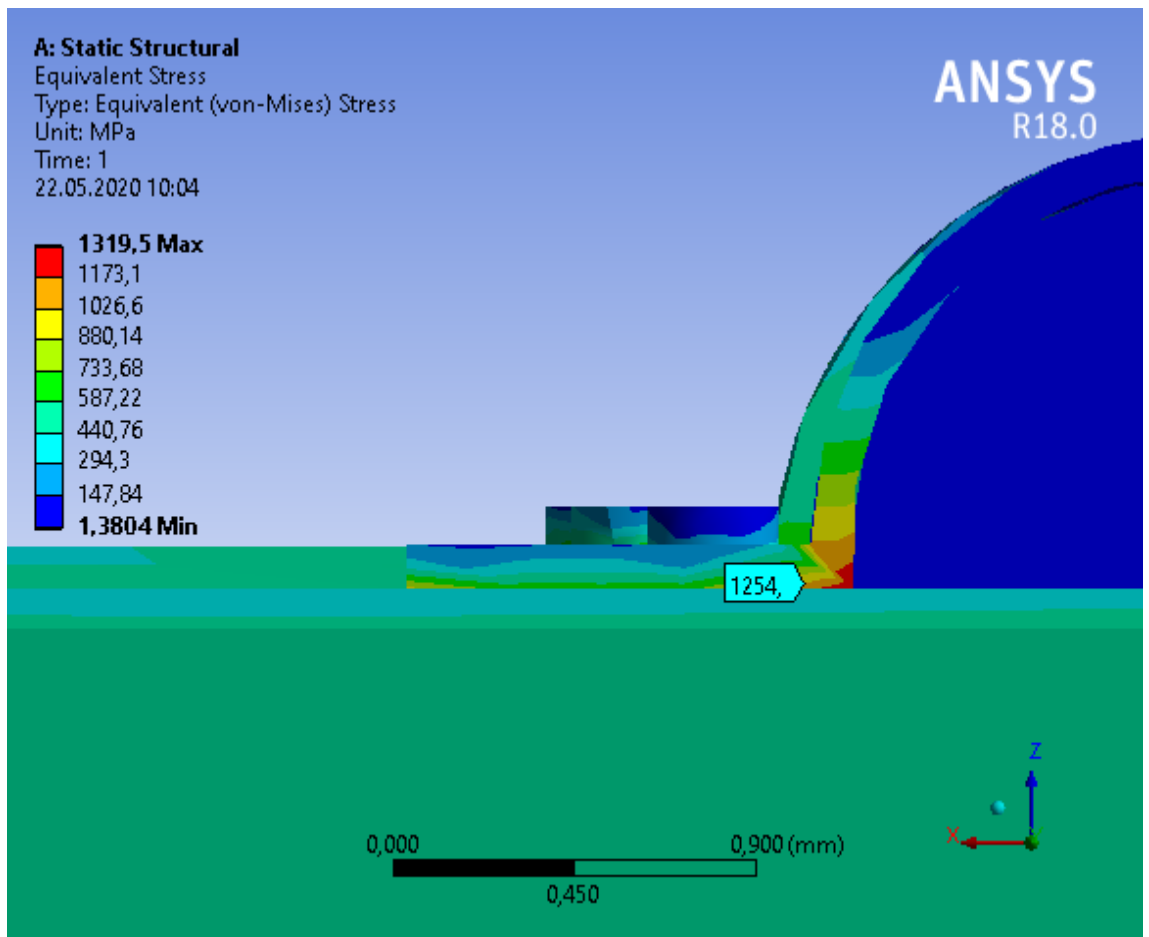


Рисунок 17- Напряжения в клее и малой скобе в направлении оси OY

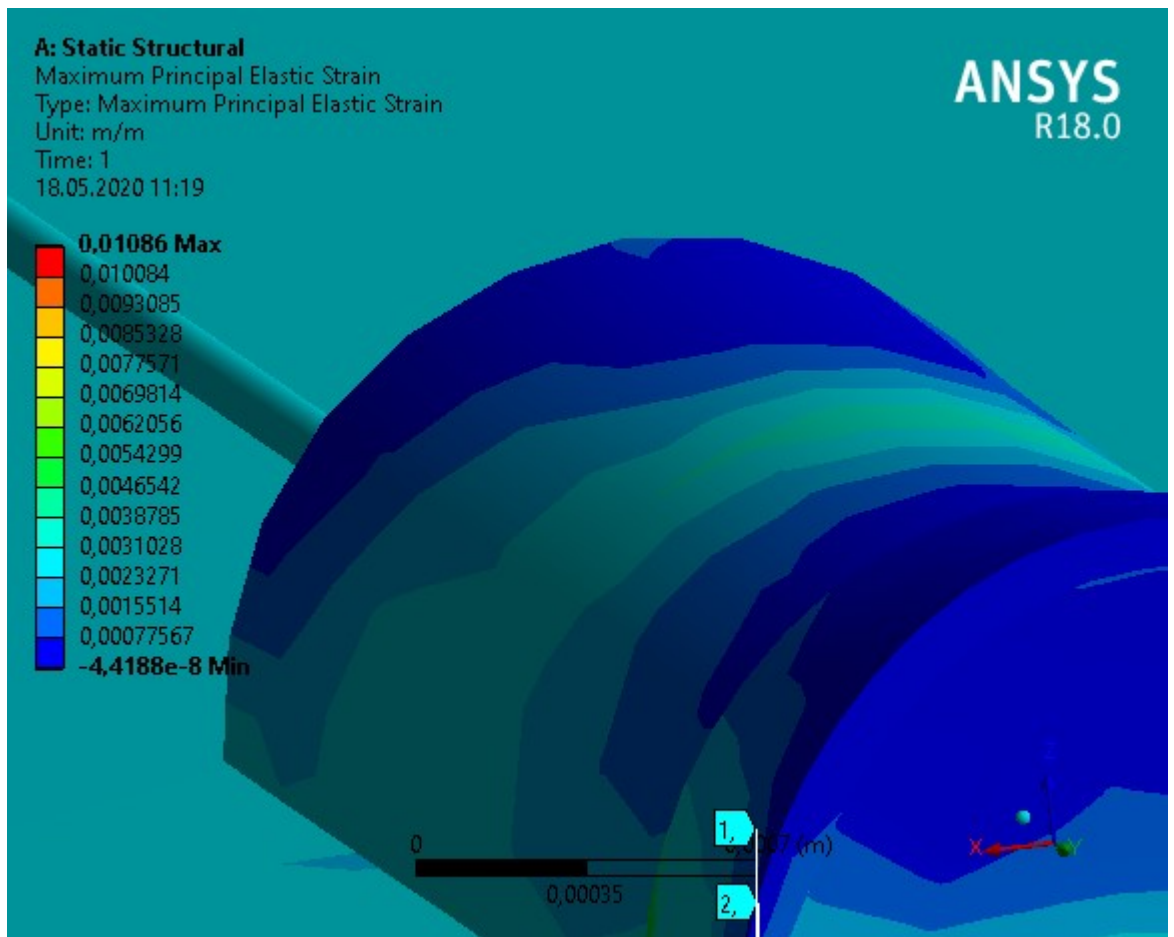


Рисунок 18- Деформации клея (Место соединения клея и большой скобы)

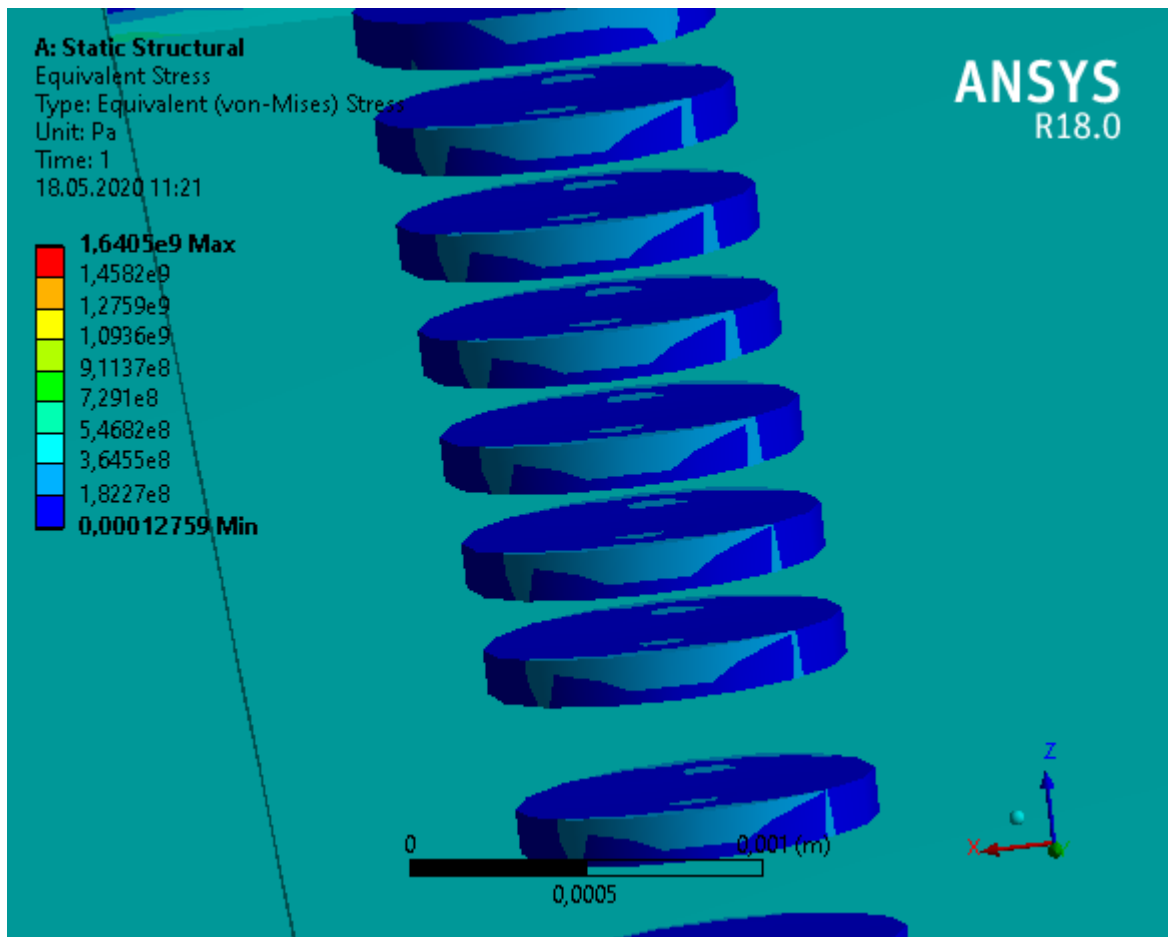


Рисунок 19- Напряжения в месте контактной сварки(снаружи)

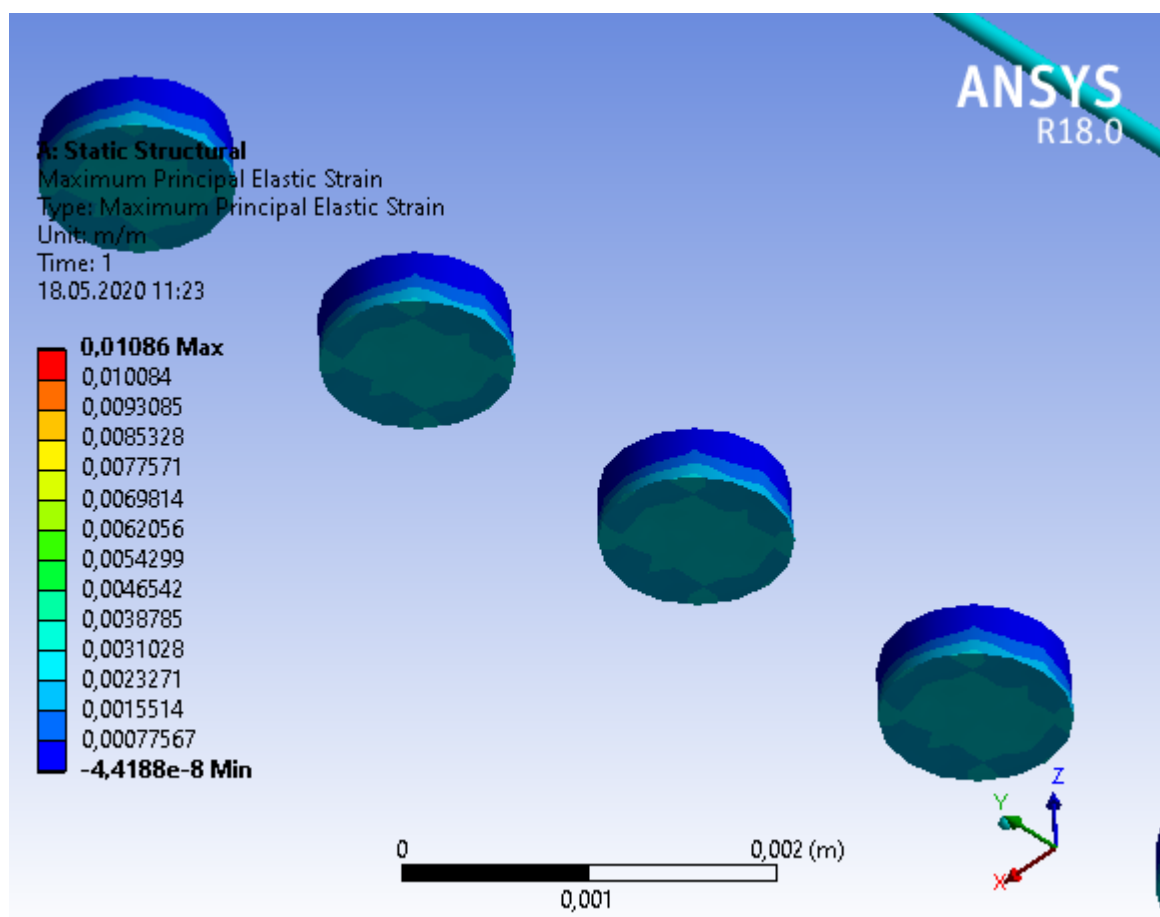


Рисунок 20- Деформации в месте контактной сварки(внутри)

Учет одних только упругих свойств материала в инженерных расчетах является общепринятой и адекватной реальности практикой в случаях, когда конструкции испытывают малые деформации и гарантированно восстанавливают свою первоначальную форму после снятия нагрузки. Основными преимуществами здесь являются необходимость задания только модуля упругости и коэффициента Пуассона в качестве свойств материала, а также решение большинства относительно простых задач всего за одну итерацию. Тем не менее в реальности бывает так, что даже при проектных нагрузках в конструкции возникают необратимые деформации. Для металлов в этом

случае гипотеза о линейном поведении материала перестает работать, а напряжения, превышающие предел текучести, могут вызвать существенные пластические деформации.

Необратимость перемещений в конструкции как результат пластического течения материала говорит о зависимости процесса неупругого деформирования от пути нагружения (порядка приложения нагрузок). Таким образом, аналитическое моделирование такого процесса необходимо выполнять уже по шагам для того, чтобы учесть реальный путь нагружения.

Практически во всех КЭ пакетах трехмерное напряженное состояние в модели с помощью критериев текучести (как правило критерия Мизеса) сводится к одноосному напряженному состоянию. Это позволяет сопоставить напряжения в модели с пределом текучести материала, определяемом при стандартном одноосном растяжении стержня.

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

A: Static Structural
Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1
22.05.2020 10:21

ANSYS
R18.0

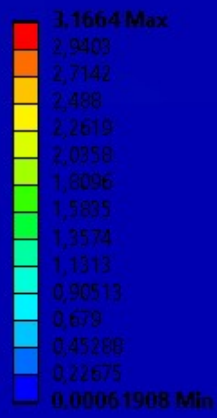


Рисунок 21- Пластические деформации в скобе

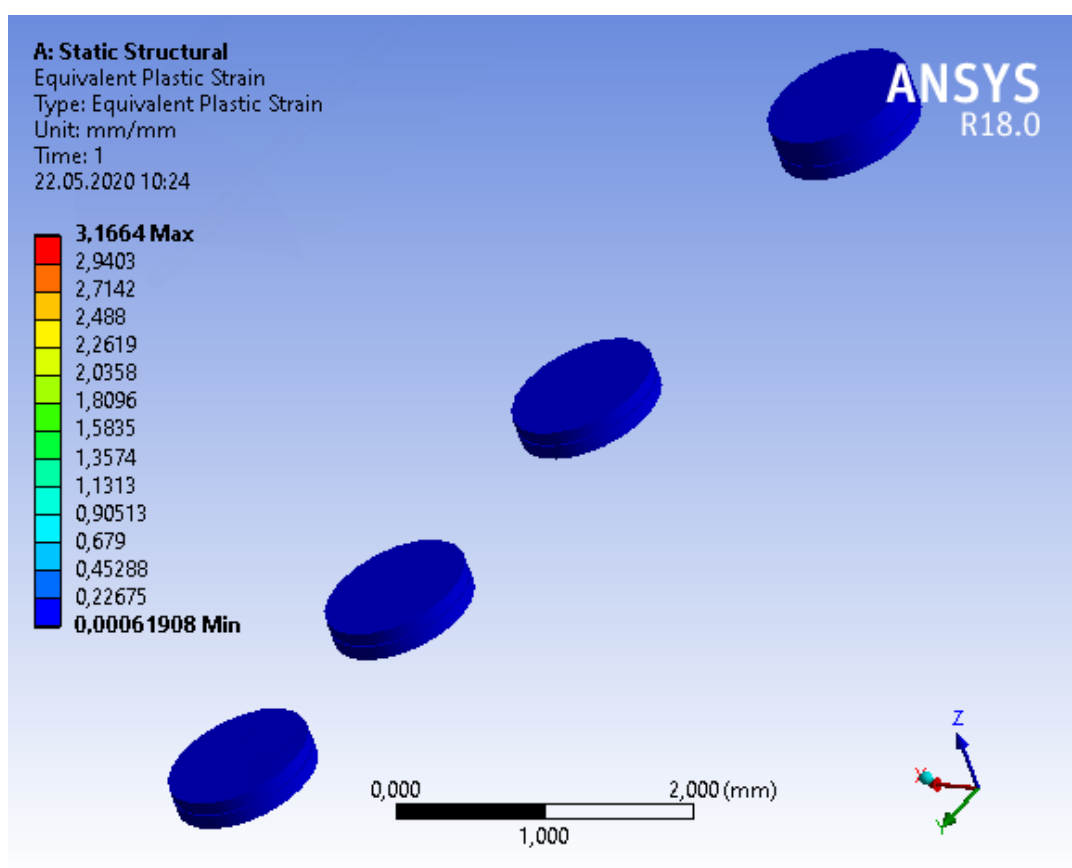


Рисунок 22- Пластические деформации в точечной сварке

4. Моделирование точечной сварки

Для того, чтобы разобраться, что происходит в местах точечной сварки, было принято решение поварьировать параметры нового материала. Ширина сварного шва 1мм. Полученное сварное соединение будет состоять из нового

материала, отличного от исходного. Основной параметр, который может измениться в ходе кристаллизации металла- это модуль упругости. Сварной шов будет обладать структурной неоднородностью, которая может изменяться в зависимости от ширины и глубины шва. В отличии от твердости- модуль упругости не является чувствительным к структурным изменениям, а напрямую зависит от параметров кристаллической решётки нового материала. Возможное уменьшение модуль упругости в зоне сварного шва, обусловлено тем, что уменьшатся плотность нового материала из-за наличия микропор. В дальнейшем для исследования будет определяться оптимальные модуль упругости.

<i>Материал</i>	<i>Модуль упругости, Па</i>
<i>Сталь 1</i>	$2,1 \cdot 10^{11}$
<i>Сталь 2</i>	$1,5 \cdot 10^{11}$
<i>Сталь 3</i>	$2,5 \cdot 10^{11}$

За счет учета неоднородности модуля упругости в математической модели можно получить увеличение расчетной величины деформаций до 25%[23].

Таблица 6- модуль упругости для исследуемых материалов

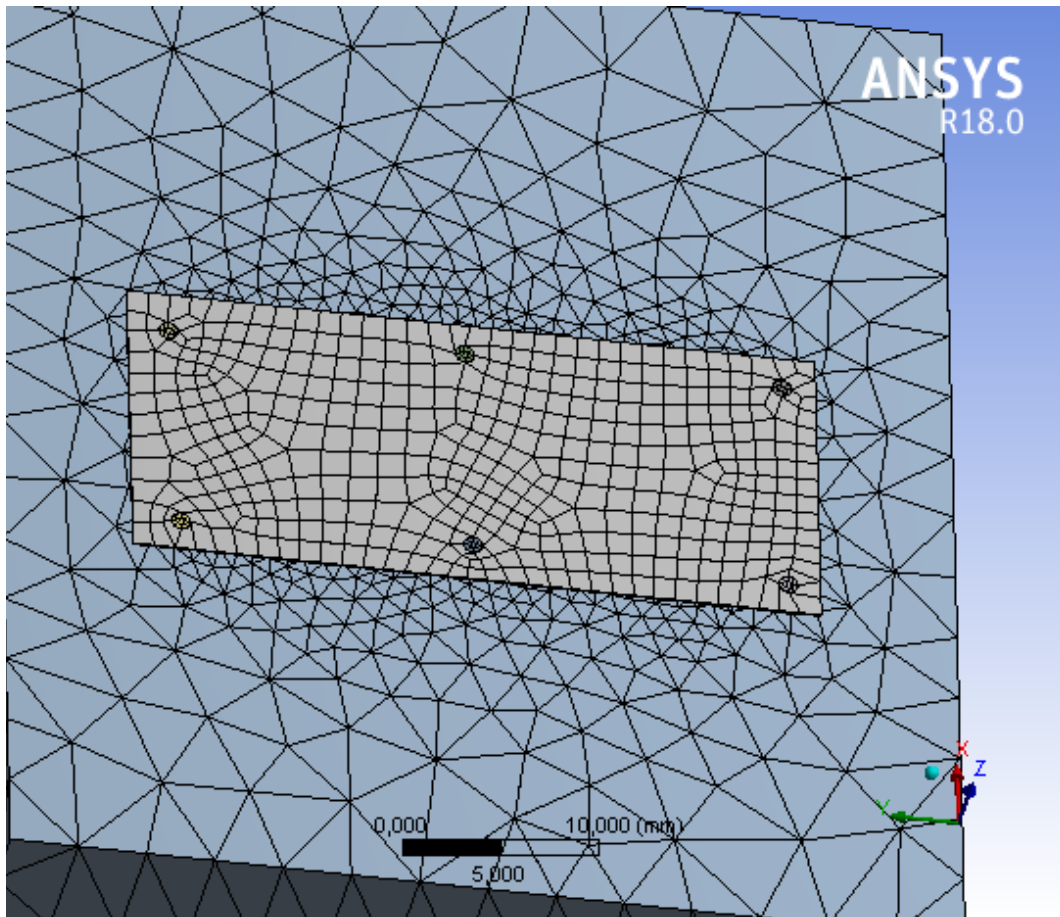
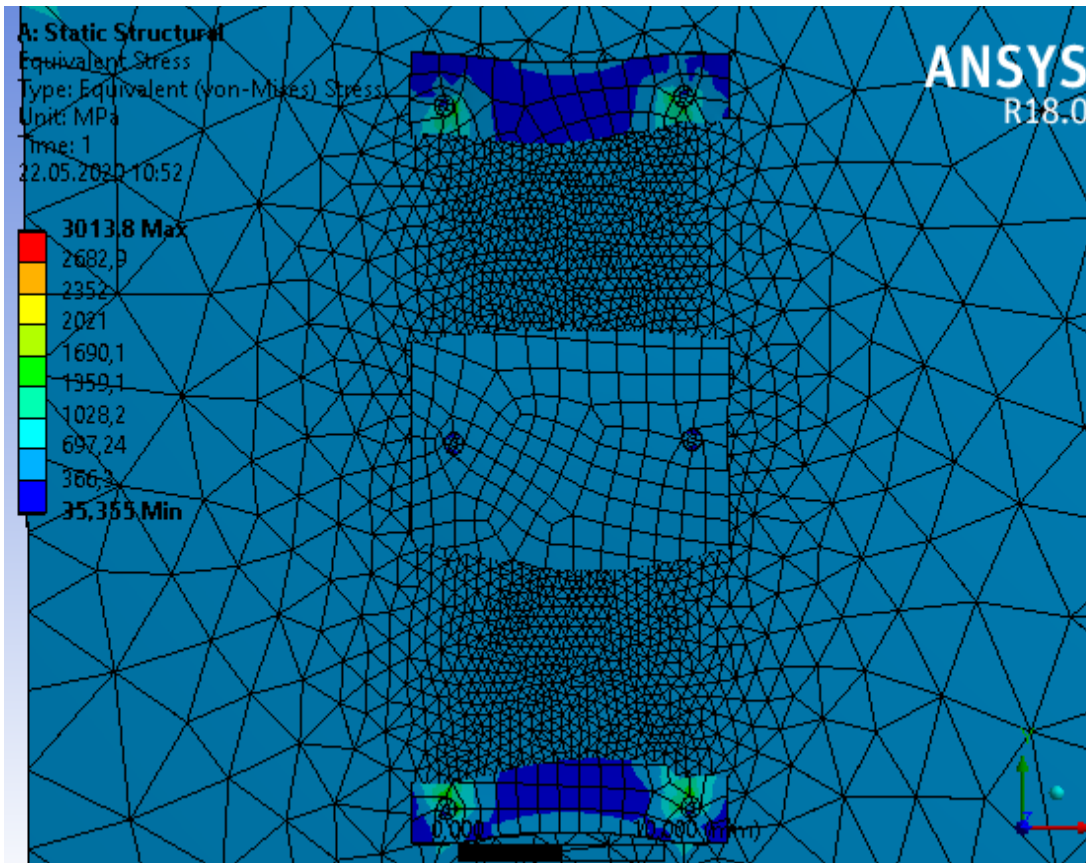


Рисунок 23- Модель для исследования сварных швов

Было выбрано три материала нержавеющей стали с обычным, повышенным и пониженным модулем упругости. Значения модуля упругости представлены в таблице 6.

Учет неоднородности модуля упругости при дальнейшем моделировании различных материалов и сплавов в зоне точечной сварки приблизит нашу модель к реальной. Данный метод позволяет увеличить точность расчетов параметров напряженно-деформированного состояния сварного соединения.



4.1 Результаты

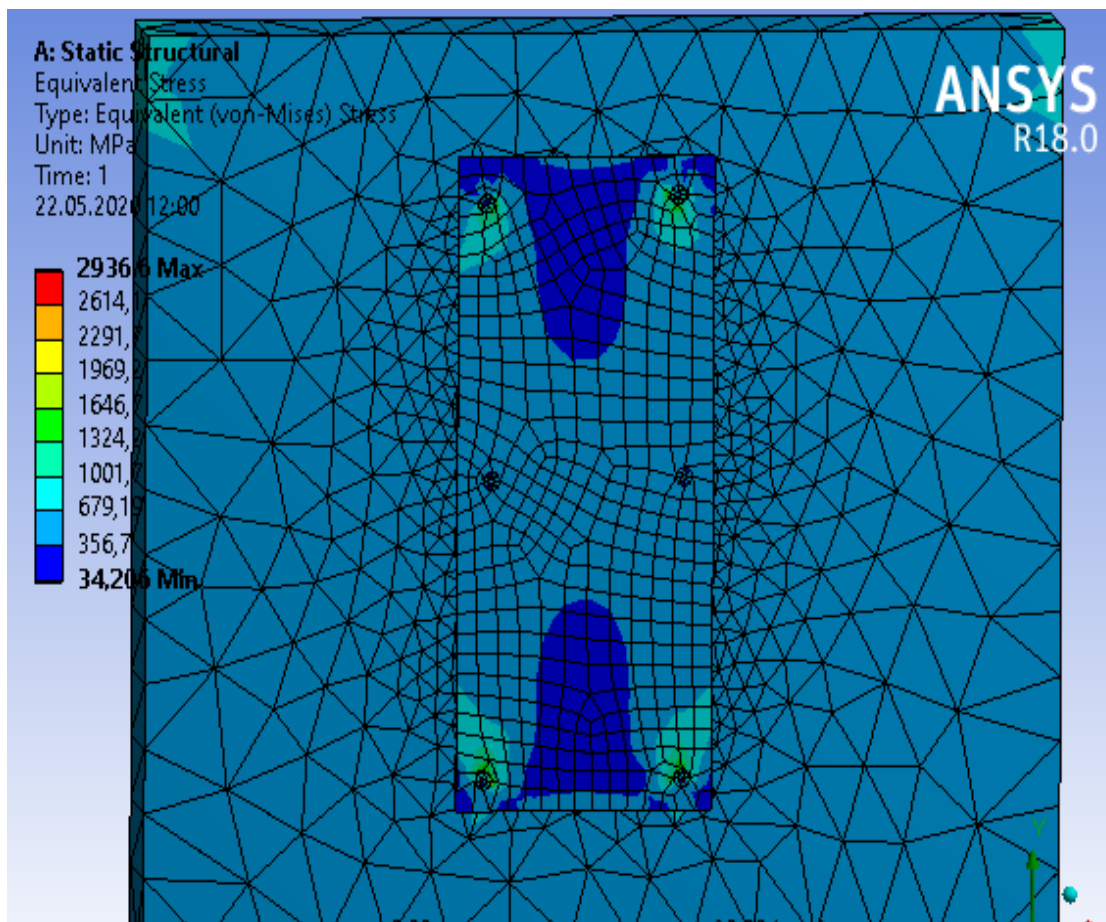


Рисунок 24а- нержавеющая сталь с пониженным модулем упругости, б- нержавеющая сталь, в- нержавеющая сталь с повышенным модулем упругости

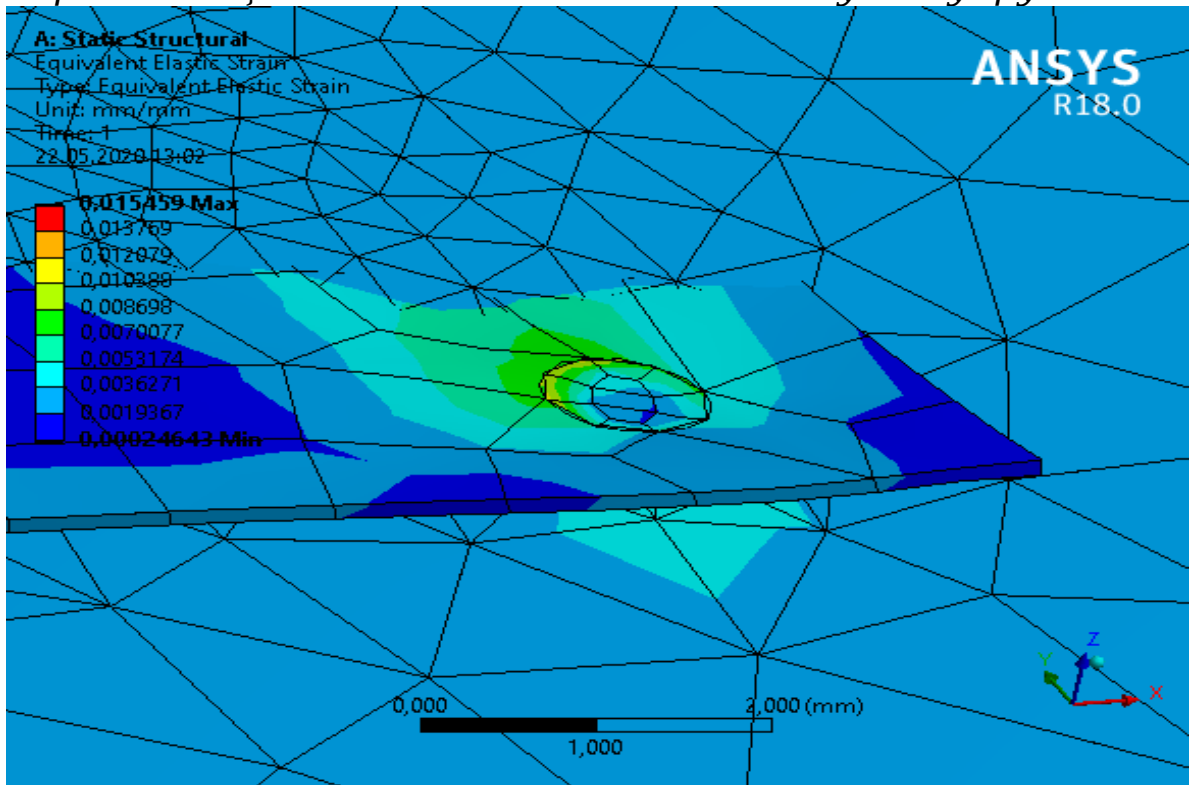


Рисунок 25 -Поле деформаций в зоне точечной сварки для нержавеющей стали

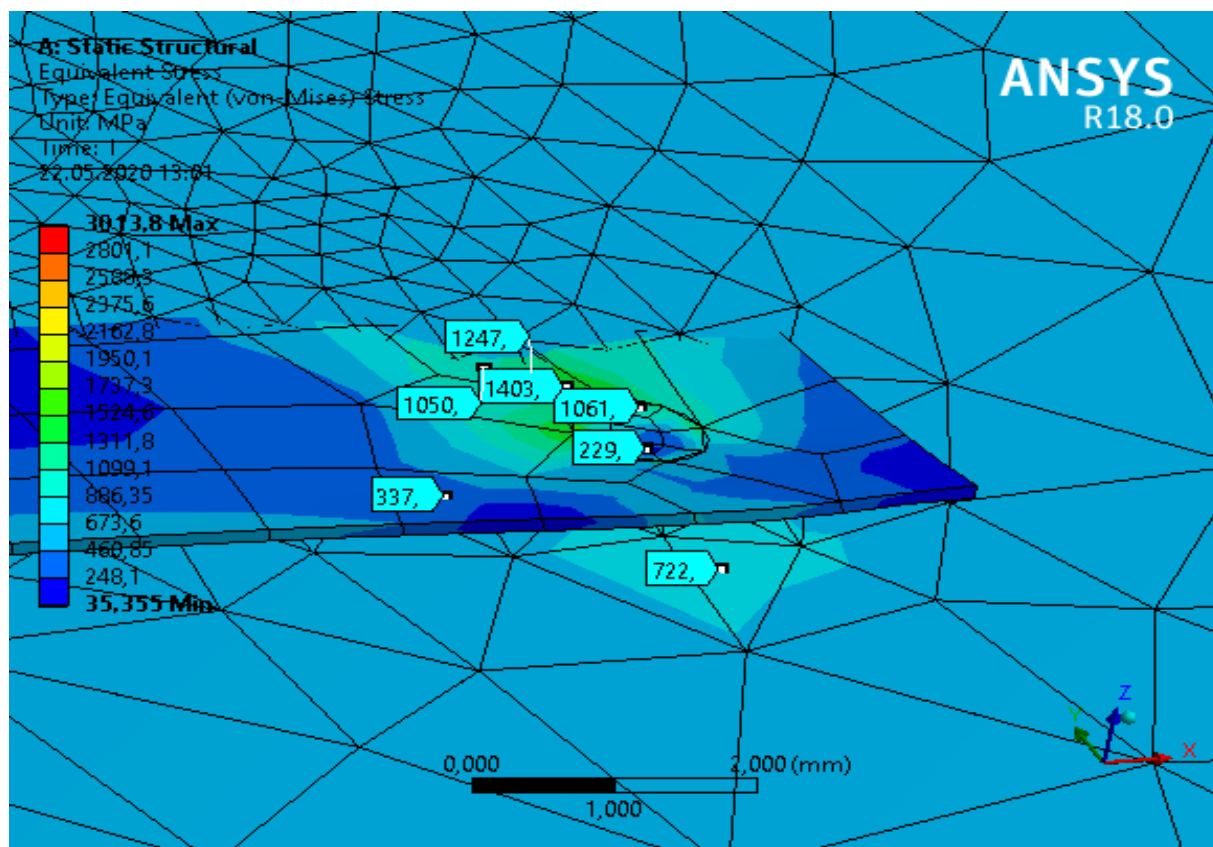


Рисунок 26-Поле напряжений ϵ в зоне точечной сварки для нержавеющей стали

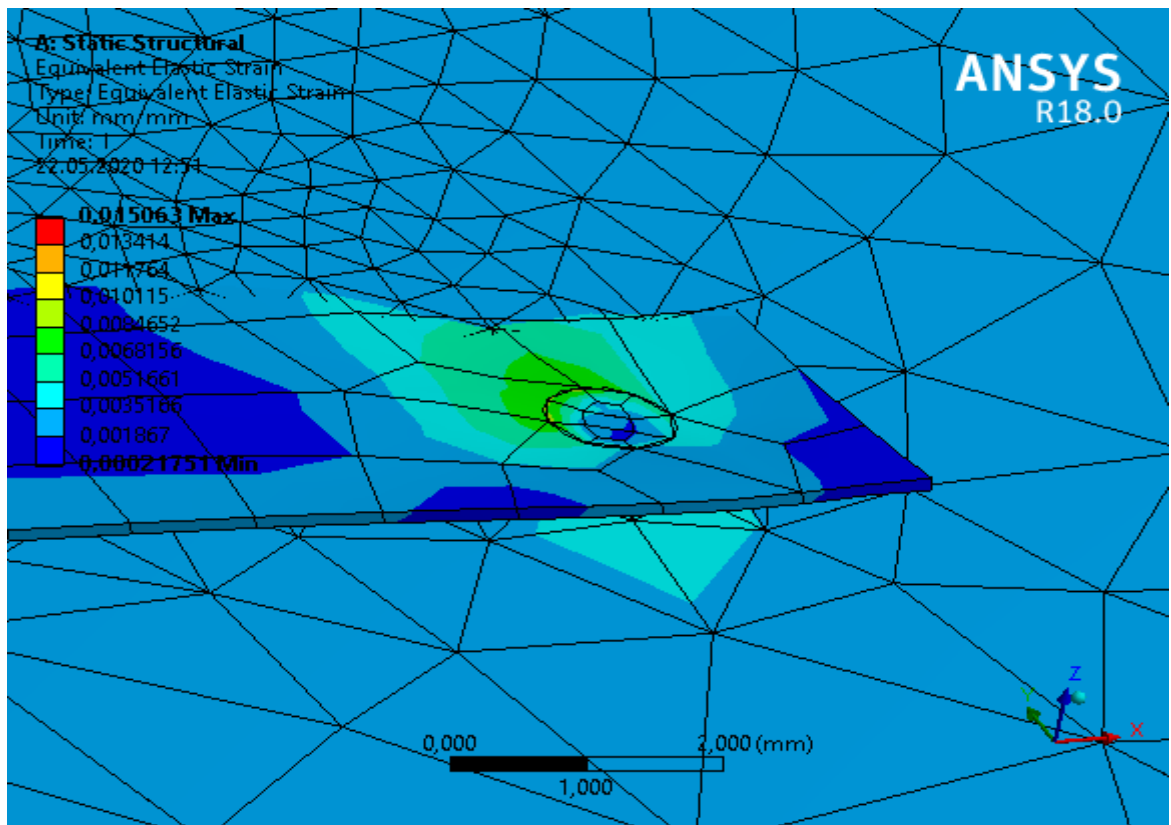


Рисунок 27-Поле деформаций в зоне точечной сварки для нержавеющей стали с повышенным модулем упругости

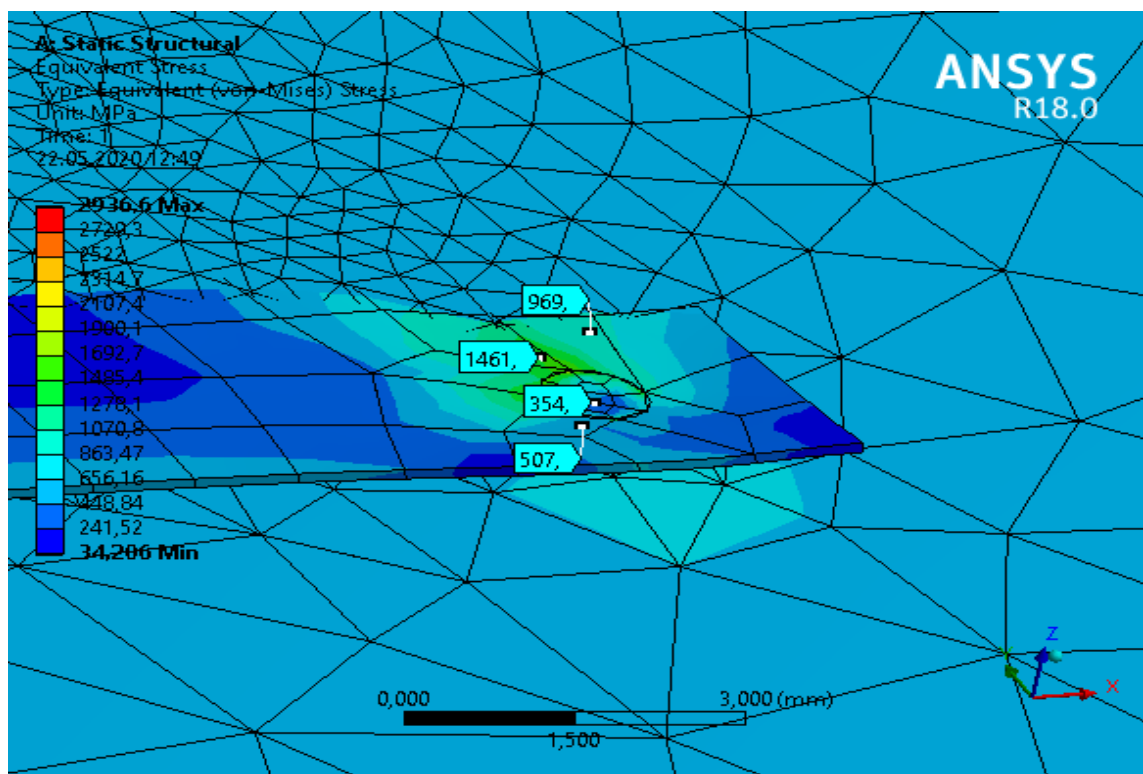


Рисунок 28-Поле напряжений в зоне точечной сварки для нержавеющей стали с повышенным модулем упругости

Заключение:

В ходе работы разработана математическая модель деформационных процессов, возникающих в элементах волоконно-оптического датчика деформации при взаимодействии его с поверхностью исследуемого объекта.

Экспериментально рассмотрена зона соединения датчика деформации с поверхностью и построена математическая модель. По результатам моделирования установлено наличие зон превышающих предел упругости. В зоне точечной сварки доказано наличие пластических деформаций. По итогам экспериментального исследования и наличия точек не пробивающих поверхность образца, рекомендовано оптимизировать процесс приварки и повторить испытания.

Экспериментально исследована волоконно-оптическая решетка и доказана ее точность измерений в сравнение с тензорезисторами.

Экспериментально исследовано влияние клея на показания датчика. Установлено, что большое количество клея вызывает явление гистерезиса, т. е. уменьшает точность показания самого датчика. Рекомендовано уменьшить его количество и повторить исследование.

Список литературы

1. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1977, p. 1-10.
2. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1964.
3. M. Corke, F. Gillham, A. Hu, D. W. Stowe, and L. Sawyer, *Fiber Optic Pressure Sensors Employing Reflective Diaphragm Techniques*, Proc. SPIE 985, 164-171 (1988).
4. G. W. Day and A. H. Rose, *Faraday Effect Sensors: The State of the Art*, Proc. SPIE 985, *Fiber Optic and Laser Sensors VI*, Boston, 1988, p. 138-150.
5. W. H. Glenn and R. G. Tomlinson, *Optical Pressure Sensor*, U.S. Patent 4, 368, 645 (1983).
6. G. Hernandez, *Fabry-Perot Interferometers*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
7. D. A. Jackson, A. Dandridge, and S. K. Sheem, *Measurements of Small Phase Shifts Using a Single Mode Optical Fiber Interferometer*, Opt. Lett. 5, 139 (1980).
8. N. Lagakos, T. Litovitz, P. Macedo, and R. Mohr, *Multimode Optical Fiber Displacement Sensor*, Appl Opt. 20, 167-168 (1981).
9. Loebner E. E. *Optoelectronic devices and networks*//Proc. 1EEE. 1955. V. 43. N 12. P. 1897 - 1906
10. W. F. Meggers and C. G. Peters, *Measurements on the Index of Refraction of Air for Wavelengths from 2218 to 9000A*, Bull. Bur. Stand. 14, 697-740 (1918).
11. A. Perot and C H. Fabry, *Sur un Voltmetre Electrostatique Interferential pour Etalonnage*, J. Phys. 7, 650-659 (1898).
12. E. W. Saaski and R. L. Skaugset, *An Optical Temperature Sensor for High Voltage Applications*, Proc. 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 1979, p. 208-212.
13. W. B. Spillman, Jr., D. R. Patriquin, and D. H. Crowne, *Fiber Optic Linear Displacement Sensor Based upon a Variable Period Diffraction Grating*, Appl. Opt. 28(17), 3550 (1989).
14. W. B. Spillman, Jr., and D. H. McMahon, *Schlicren Multimode Fiber-Optic Hydrophone*, Appl. Phys. Lett. 37(2), 145 (1980).

15. Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Быковский В.А. Экспериментальное исследование волоконно-оптических датчиков для контроля деформаций железобетонных конструкций // Проблемы современного бетона и железобетона: Докл. Международного симпозиума – Минск, 2009.
16. Егоров Ф.А., Ткачев О.И., Неугодников А.П., Рубцов И.В., Поспелов В.И. Волоконно-оптический датчик деформаций // Технологии строительства. – 2005. – №3.
17. Наймушин И.Г., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Численный анализ деформационных процессов в оптоволоконном датчике // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – №1. – с. 104-116.
18. Неугодников А.П., Ахлебенин М.Ю., Егоров Ф.А., Быковский В.А. Строительный мониторинг на базе волоконно-оптических датчиков. Опыт и результаты применения для высотных зданий // Проблемы современного бетона и железобетона: Докл. Международного симпозиума – Минск, 2009.
19. Неугодников А.П., Егоров Ф.А., Ахлебенин М.Ю., Волчок А.С. Мониторинг строительных конструкций в промышленном и гражданском строительстве: концепция, реализация, перспективы // Проблемы современного бетона и железобетона: Докл. Международного симпозиума – Минск, 2009.
20. Окуси Т. и др. Волоконно-оптические датчики/Т. Окуси, К. Окамото, М. Оцу. Х. Нисихара, К. Кюма. К. Хататэ; Под ред. Т. Окуси: пер с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.; ил.
21. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
22. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2006 – 592 с.
23. Смирнова С.В., Пугачева Н.Б., Мясникова М.В., Смирнова Е.О. Структурная неоднородность сварного соединения алюминиевого сплава и моделирование его упругой деформации// Физическая мезомеханика, 17(1), 2014