

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Московский политехнический университет

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

На правах рукописи

Скворцов Павел Аркадьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОДАТЧИКА НА СТРУКТУРЕ
“КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ”**

Диссертация

На соискание ученой степени

кандидата технических наук

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Гаврюшин С.С.

Москва, 2019

Содержание

Список сокращений.....	4
Введение.....	5
Глава 1. Обзор литературы, посвященной расчету и проектированию тензодатчиков на структуре «кремний на сапфире».....	10
1.1. Сравнительный анализ структур полупроводниковых датчиков давления.....	12
1.2. Особенности расчета и проектирования полупроводниковых тензодатчиков на структуре «кремний на сапфире».....	31
1.3. Выводы по первой главе.....	48
Глава 2. Аналитические методы расчета упругого элемента мембранного типа полупроводникового датчика давления на структуре «кремний на сапфире».....	49
2.1. Расчет УЭ ТП на КНС по линейной теории изгиба пластин.....	52
2.1.1. Расчет УЭ ТП на КНС по линейной теории изгиба круглой пластинки, закреплённой по контуру.....	52
2.1.2. Плоская мембрана с жестким центром в области малых перемещений.....	56
2.2.1. Расчет плоской мембраны в области больших перемещений по теории абсолютно гибкой мембраны.....	60
2.2.2. Расчет плоской мембраны с жестким центром как абсолютно гибкой мембраны.....	64
2.3. Уточненный расчет плоских мембран при произвольных прогибах.....	66
2.4. Выводы по главе.....	69

Глава 3. Экспериментальное исследование чувствительного элемента ТП на структуре «кремний на сапфире».....	70
3.1. Экспериментальное исследование границы кремний-сапфир.....	70
3.2. Экспериментальное определение прочностных свойств припоя ПСР72.....	80
3.3. Выводы по главе.....	86
Глава 4. Численное моделирование полупроводникового датчика на КНС методом конечных элементов.....	87
4.1. Расчет напряженно-деформированного состояния УЭ тензодатчика на КНС в программном комплексе ANSYS.....	87
4.2. Анализ температурных напряжений в полупроводниковом датчике на КНС в программном комплексе ANSYS.....	97
4.3. Выводы по главе.....	99
Глава 5. Многокритериальная оптимизация.....	100
5.1. Алгоритм оптимизации.....	105
5.2. Выводы по главе.....	112
Глава 6. Результаты многокритериальной оптимизации.....	113
6.1. Экспериментальная проверка достоверности результатов.....	115
6.2. Выводы по главе.....	121
Выводы по работе.....	122
Список литературы.....	123
Приложение 1. APDL-файл алгоритма оптимизации	137
Приложение 2. Акт о внедрении результатов диссертационной работы	153

Список сокращений

КНС – кремний на сапфире;

ИС – интегральная схема;

ПЧЭ – полупроводниковый чувствительный элемент;

УЧЭ – упругий чувствительный элемент;

ТП – тензопреобразователь;

ТД – тензодатчик;

ТР – тензорезистор;

КНИ – кремний на изоляторе;

КНД – кремний на диэлектрике;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия;

КТР – коэффициент термического расширения;

ГПН – гистерезис первого нагружения;

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп;

Введение

Измерение давления жидких и газообразных сред является важной инженерной задачей. Благодаря активному развитию микроэлектроники и вычислительной техники, сегодня отдельную группу приборов, успешно справляющихся с данной задачей, представляют полупроводниковые тензодатчики. Благодаря высокой чувствительности электрических характеристик полупроводников к различным внешним воздействиям, общности исходных материалов для изготовления преобразователей, а также единству технологии изготовления, полупроводниковые датчики давления на сегодняшний день представляют класс высокоточных приборов, работоспособных при различных условиях окружающей среды.

Особую группу представляют датчики давления, выполненные на структуре «кремний на сапфире» (КНС). Основными преимуществами таких тензодатчиков, являются высокая чувствительность, радиационная стойкость и широкий диапазон рабочих температур. В настоящее время производством таких датчиков в нашей стране занимаются такие организации как ПГ МИДА (г.Ульяновск), ЭПО Сигнал (г. Энгельс), ЗАО НПК ВИП (г. Екатеринбург), ОАО НИИФИ (г. Пенза), ПГ Метран (г. Челябинск), а к числу зарубежных производителей следует отнести компании Honeywell (США), Kulite Semiconductor Products (США), Yokogawa (Япония), Druck (Англия), Sensonetics (США). [29-31, 51, 53, 54, 56-61, 87, 91, 98, 101, 104, 105, 114, 115, 117, 124, 127, 129,130]

Несмотря на то, что тензоэффект в полупроводниках был открыт более 50 лет назад, а полупроводниковые тензодатчики сегодня активно используются в различных сферах деятельности, на сегодняшний день расчет и проектирование данного типа датчиков представляет весьма сложную и наукоемкую задачу. Литературный обзор показал, что основными направлениями научных исследований в области полупроводникового приборостроения являются:

- оптимизация технологического процесса производства полупроводниковых ТД;
- исследование напряженно-деформированного состояния упругих элементов полупроводниковых ТД;
- поиск новых методов уменьшения погрешности измерений.

Следует отметить, что вопрос выбора математических моделей для расчета и проектирования полупроводниковых тензодатчиков по-прежнему является актуальным. Классические теории пластин и пологих оболочек [2,11,15-18,66,77,78,80,81], описывающие процесс деформирования упругих элементов, не позволяют с требуемой точностью описать распределение деформаций на поверхности чувствительного элемента [41]. Известные разработки конструкций датчиков основаны преимущественно на практическом опыте и интуиции разработчиков. Проектирование новых более совершенных датчиков требует более тщательного и научно-обоснованного подхода.

Актуальность работы подтверждается данными из реферативной базы данных SCOPUS, рис.1.

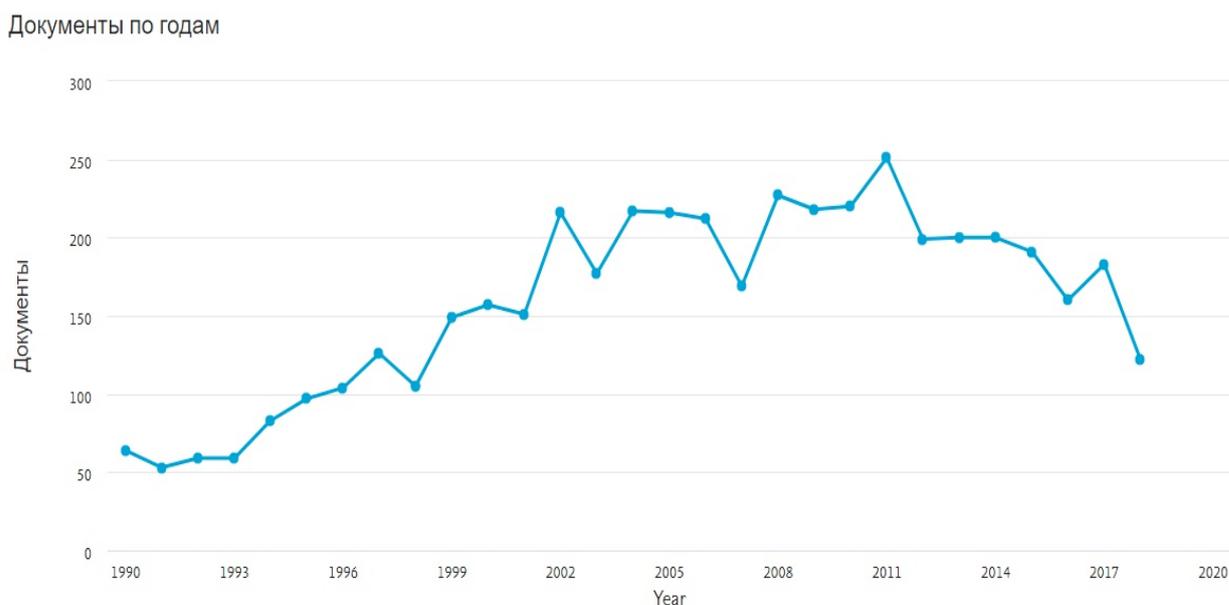


Рис. 1.1. Распределение по годам публикаций, связанных с исследованием структуры КНС на основе реферативной базы данных SCOPUS

Из рис.1.1. видно, что интерес к структуре КНС с годами не пропадает, а количество публикаций и заявок на изобретения говорит о том, что полупроводниковые датчики на КНС продолжают активно совершенствоваться. Лидирующие страны по числу публикаций результатов исследования структур КНС представлены на рис.1.2.

Документы по странам или территориям

Сравнить количество документов максимум по 15 странам/территориям

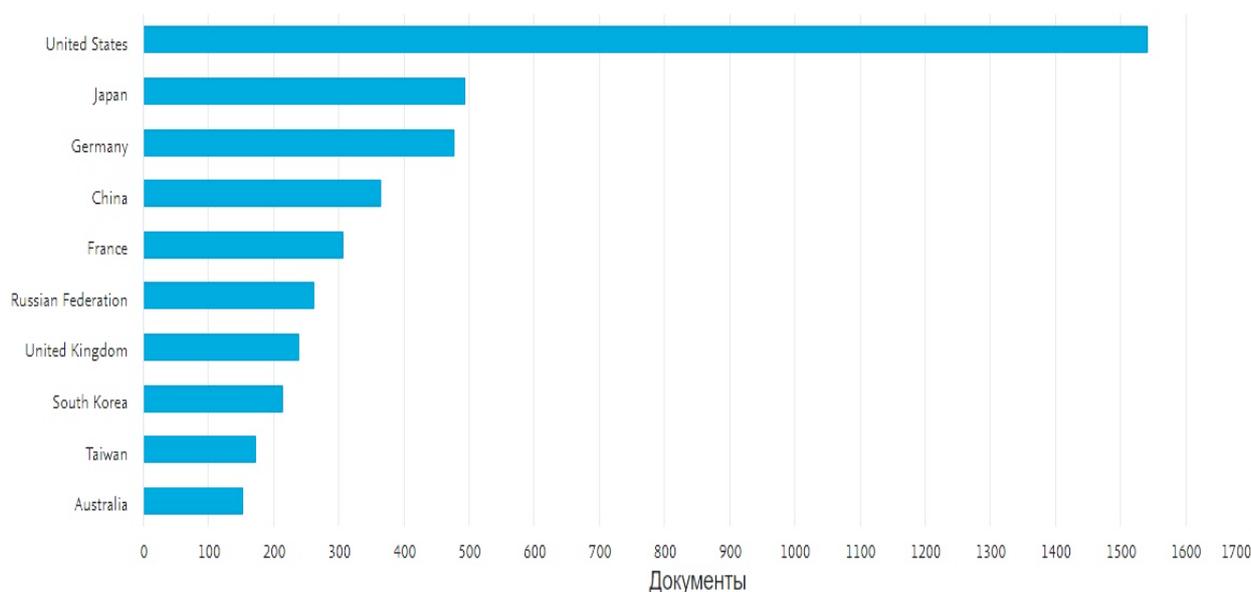


Рис.1.2. Распределение по странам публикаций, связанных с исследованием структуры КНС на основе реферативной базы данных SCOPUS

В последнее время для расчетов активно применяются численные методы (метод конечных элементов и др.), реализованные в программно-вычислительных комплексах (ANSYS, Abaqus, Nastran и т.п.). Вместе с тем расчеты, выполненные численными методами, дают решение для задачи анализа, а применять их для решения задачи синтеза весьма затруднительно. Зачастую процесс расчета требует весьма много времени (например, для построения сетки при варьировании геометрических параметров), а инженер должен владеть не только навыками работы с тем или иным программно-вычислительным комплексом, но и знать все особенности применения метода конечных элементов. Все это делает процесс проектирования весьма длительным и трудоёмким, что, в конечном счете, может привести к

недостаточной точности расчетов, к увеличению погрешности при работе прибора, а также низкому проценту выхода годных изделий.

Таким образом, **актуальность** диссертационной работы определяется необходимостью решения важной практической задачи: разработки методики расчета и проектирования рациональных конструкций датчиков давления на КНС-структуре.

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета и проектирования рациональных конструкций тензодатчиков на структуре КНС.

Объектом исследования является полупроводниковый датчик давления, выполненный на структуре «кремний на сапфире».

Предметом исследования является многопараметрический процесс расчета и проектирования датчиков, выполненных на структуре-КНС.

На защиту выносятся следующие положения диссертации, обладающие элементами научной новизны:

- методика и алгоритм многокритериального проектирования полупроводникового датчика давления на КНС;
- новые теоретические и экспериментальные результаты, объясняющие влияние конструктивных размеров и физико-механические свойств материалов на функциональные характеристики датчика;
- программа, созданная на языке C# с дружественным интерфейсом, позволяющая проектировщику и технологу выбрать рациональные варианты конструкций.

Публикации и выступления

По теме настоящего исследования были опубликованы следующие работы:

1. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Численное моделирование тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Машиностроение и инженерное образование. 2017. №3(52). С. 56-63. (Журнал перечня ВАК);

2. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Evaluation of output signal nonlinearity for semiconductor strain gauge // Solid State Phenomena. November 2017. Volume 269. P.60-70. (**Scopus Index**);
3. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A., Skvortsov A.A. Optimization of semiconductor pressure transducer with sensitive element based on “silicon on sapphire” structure // Periodico Tche Quimica 2018 .- Vol. 15 , Issue 30 .- C. 678 – 686. (**Scopus Index**);
4. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Многокритериальная оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Приводы и компоненты машин. 2018. №3-4. С.27-30. (**Журнал перечня ВАК**);
5. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Skvortsov A.A. Numerical modeling and optimization of the design of the corrugated pressure sensor membrane // Periodico Tche Quimica. 15. Special issue (1). P. 174-181. (**Scopus Index**);
6. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа» (ТПГУ, Тула 27 ноября – 1 декабря 2017 г.). С.41-48.
7. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Моделирование двухмембранного преобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 15–19 февраля 2016 г.): тезисы докладов. 2016. С. 80–81.

8. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Расчет упругого элемента тензодатчика на структуре кремний на сапфире (КНС) // Автоматизация и управление в машиностроении. – М., МГТУ «СТАНКИН». 2016. №1. С.52-56.
9. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация конструкции полупроводникового тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» (КНС) // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 19–23 марта 2018 г.): тезисы докладов. 2018. С. 77–78.
10. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Исследование напряженного-деформированного состояния чувствительного элемента полупроводникового датчика давления, выполненного на структуре «кремний на сапфире» // Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов (2-5 октября 2017г.): тезисы докладов. С.62.

Глава 1. Обзор литературы, посвященной расчету и проектированию тензодатчиков на структуре «кремний на сапфире»

Необходимость точного измерения давления жидкостей и газов в различных условиях представляет сложную и наукоёмкую задачу. Сегодня весьма остро стоит вопрос точного измерения давления в области авиакосмической и военной промышленности, атомной энергетики, химической промышленности, нефти и газодобычи. Для успешной работы в указанных областях современные приборы должны работать в широком диапазоне температур, иметь высокую чувствительность и стабильную характеристику выходного сигнала, а также противостоять химическому и радиационному воздействию. Общим у всех приборов является то, что давление преобразуется в некоторую величину, доступную для наблюдения. В зависимости от физического эффекта, который лежит в основе работы

первичного преобразователя давления все устройства можно условно разделить на следующие группы:

- датчики давления с механическими преобразователями;
- датчики давления с тензорезистивными преобразователями;
- датчики давления с пьезоэлектрическими преобразователями;
- датчики давления с электростатическими преобразователями;
- датчики давления с электромагнитными преобразователями;
- датчики давления с гальваномагнитными преобразователями;
- датчики давления с электрохимическими преобразователями;
- датчики давления с тепловыми преобразователями;
- датчики давления с оптоэлектрическими преобразователями.

Литературный обзор [1,4,5,7,9,10,12,14,37,43,45] показал, что среди датчиков давления сегодня лидируют тензодатчики, которые начали свой путь с использования в качестве чувствительного элемента наклеиваемых тензорезисторов. Обнаружение и глобальное изучение тензоэффекта в полупроводниковых материалах послужили причиной разработки новейшего класса тензодатчиков, обладающих надежностью и стабильностью, миниатюрными габаритами, высокой чувствительностью, осуществимостью групповой технологии производства, технологической соединимостью с интегральными микросхемами обработки сигнала, малогабаритными размерами полупроводниковых чувствительных элементов.

Высокий уровень выходного сигнала полупроводниковых тензодатчиков позволяет избавиться от тяжелого и громоздкого усилительного оборудования, т. е. кардинально уменьшить вес и габариты измерительной аппаратуры, что особенно важно для объектов, где эти факторы играют решающую роль. Миниатюрность и высокая тензочувствительность полупроводниковых тензодатчиков делают их чрезвычайно удобным инструментом для измерений на биологических объектах (датчики дыхания, мышечных напряжений и т. п.). С помощью таких датчиков возможно создание системы измерения и

телеметрической передачи напряжений в тканях внутренних органов. Миниатюрные полупроводниковые тензодатчики монтировались на диафрагме из пластика, которая хирургическим путем вживлялась во внутреннюю полость животного. Существуют Российские и импортные конструкции миниатюрных датчиков, используемых в медицине, в частности для точного измерения кровяного давления в области сердца. Введение таких датчиков в тело человека осуществляется с помощью катетера. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) США использует полупроводниковые тензорезистивные датчики в биологических системах. Применение данного типа преобразователей позволяет получить близкие к линейным повторяющиеся характеристики в широком интервале температур в виду реализации улучшенных способов компенсации нелинейности выходных характеристик и температурных погрешностей при увеличенном времени работы устройств. Тензодатчики давления успешно справляются с перегрузкой, выдерживают высокий уровень вибраций, справляются с ударными нагрузками. Датчики данного класса успешно функционируют в жидких и газообразных средах, сильных щелочах, кислотах и различных видах топлива и смазочных материалов. Известны попытки использования полупроводниковых тензодатчиков в датчиках давления, работающих при криогенных температурах. [10].

Поэтому полупроводниковые тензопреобразователи привлекают к себе внимание приборостроителей во всем мире. Об этом свидетельствует большое число патентов и заявок на изобретение [56-61].

1.1. Сравнительный анализ структур полупроводниковых датчиков давления

На сегодняшний день полупроводниковые датчики давления чаще всего производятся на основе следующих структур:

- объемный кремний;
- карбид кремния;
- кремний на диэлектрике;

- кремний на сапфире.

В настоящее время также ведутся разработки и внедрение полупроводниковых датчиков с ЧЭ, выполненными из фосфата галлия (GaP) или платины. Каждая структура обладает рядом преимуществ и позволяет производить на её основе полупроводниковые датчики давления, обладающие хорошими метрологическими характеристиками.

Датчики давления на базе полупроводниковых микроэлектромеханических систем (МЭМС), имеющие в основе чувствительный элемент (ЧЭ) на основе объёмного кремния (рис.1.3), отличаются технологичностью, сравнительной дешевизной, миниатюрными размерами, высокой точностью измерений, возможностью работы в агрессивных средах. В данной структуре тензорезистивные элементы формируются непосредственно в упругом элементе – кремниевой мембране и связаны с ней на атомарном уровне, что позволяет исключить погрешности при передаче деформации от упругого элемента к тензорезистору и исключить явление гистерезиса. Изоляция электрической схемы обеспечивается р-п переходом, а полупроводниковые датчики успешно функционируют до температуры 120 °С.

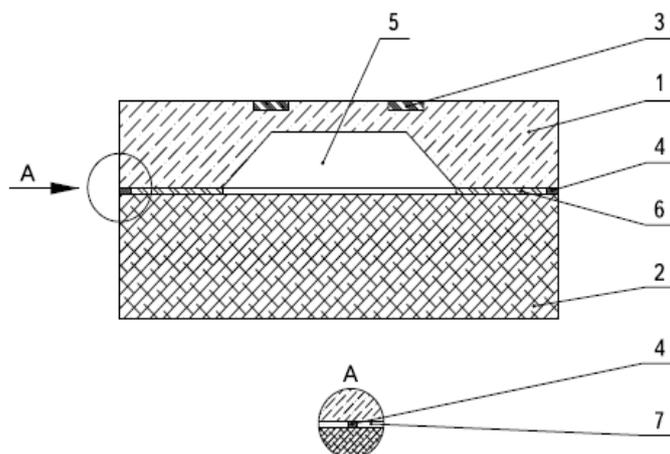


Рис.1.3 а. Конструкция чувствительного элемента датчика давления, выполненного по технологии объёмной микромеханики

1 – кремниевая пластина, 2 – стеклянная пластина, 3 – тензорезистивная схема, 4 – локальные выступы, 5 – вакуумная полость, 6 – площадь соединения, 7 – зазор

Диффузионные
тензорезисторы

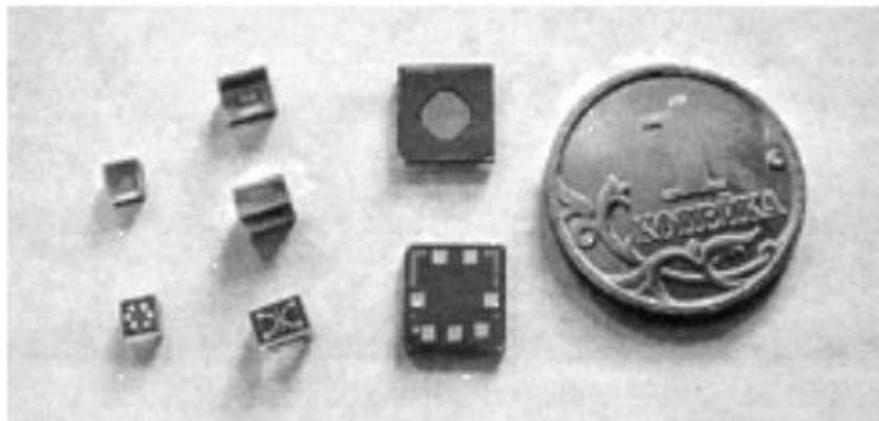
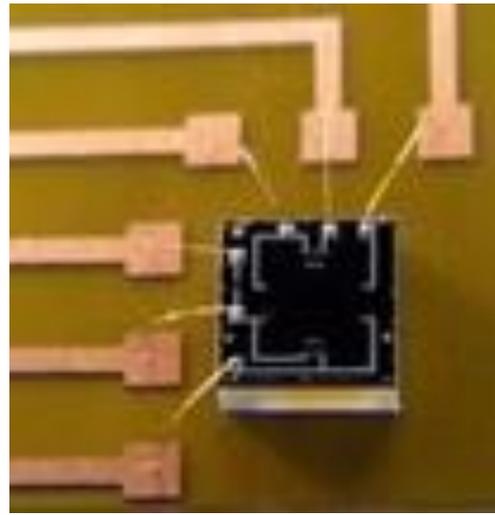
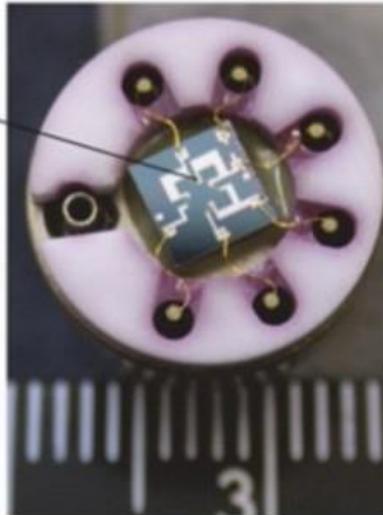


Рис.1.3б. Фотографии чувствительных элементов на основе технологии
объемной микромеханики

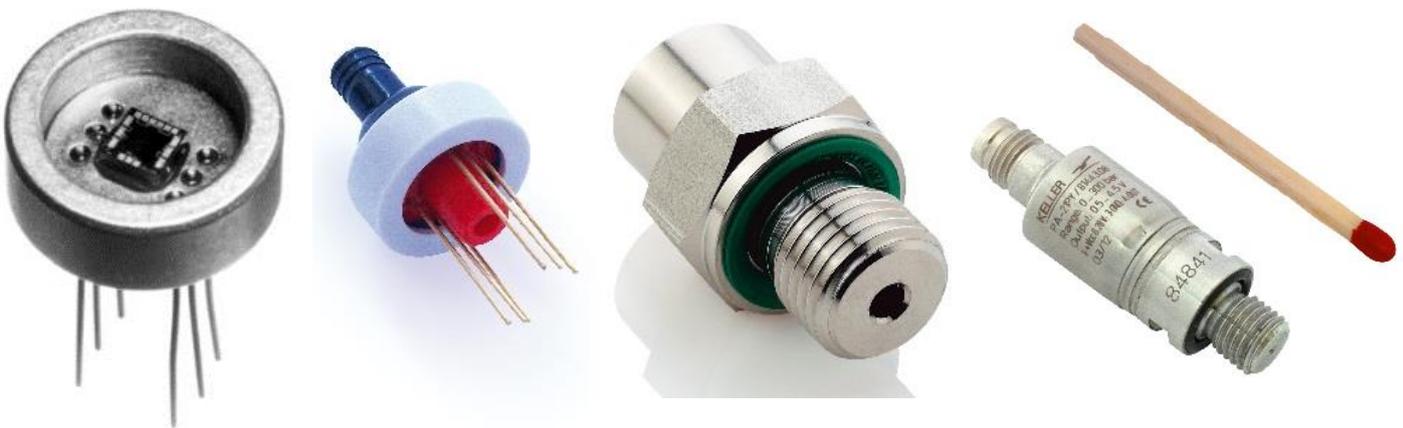


Рис.1.3в. Фотографии датчиков, разработанных фирмой Keller (Швейцария), с
ЧЭ на объемном кремнии

К недостаткам данного типа датчиков следует отнести:

- Снижение быстродействия из-за наличия изолирующего p-n перехода;
- Наличие токов утечки;
- Максимальная рабочая температура 120 °С;
- Анизотропия кремния.

Другой перспективной структурой, позволяющей производить высокоточные датчики давления, оказалась структура «карбид кремния на диэлектрике» (SiC) рис.1.4.а,б. Карбид кремния химически инертен, стоек к механическому воздействию, имеет большую ширину запрещенной зоны, чем кремний, и более высокую температуру плавления (2730 °С). Это делает возможным работу устройств рис.1.4.г на его основе при высокой температуре (600 °С). Также к преимуществам структуры SiC следует отнести: широкий диапазон рабочих температур (от -100 до 600 °С), малый ток утечки, высокое напряжение пробоя, высокую теплопроводность, которая упрощает проблему отвода тепла и радиационную стойкость. В качестве примера на рис.2а показан ЧЭ на основе карбида кремния, а на рис.2б показан ЧЭ в котором карбид кремния используется не только в качестве материала для приборного слоя МЭМС, но также в качестве материала для механической мембраны. На рис.2в приведены полученные с помощью микроскопа изображения чувствительных элементов на карбиде кремния, которые используются в высокотемпературных датчиках давления.



Рис.1.4а. ЧЭ на основе SiC, разработанный в Case Western Reserve University (США)

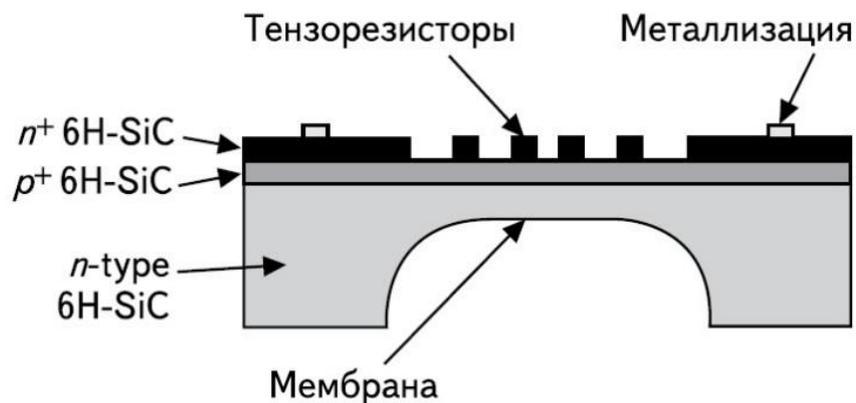


Рис.1.4б. ЧЭ на основе SiC фирмы Kulite (США)

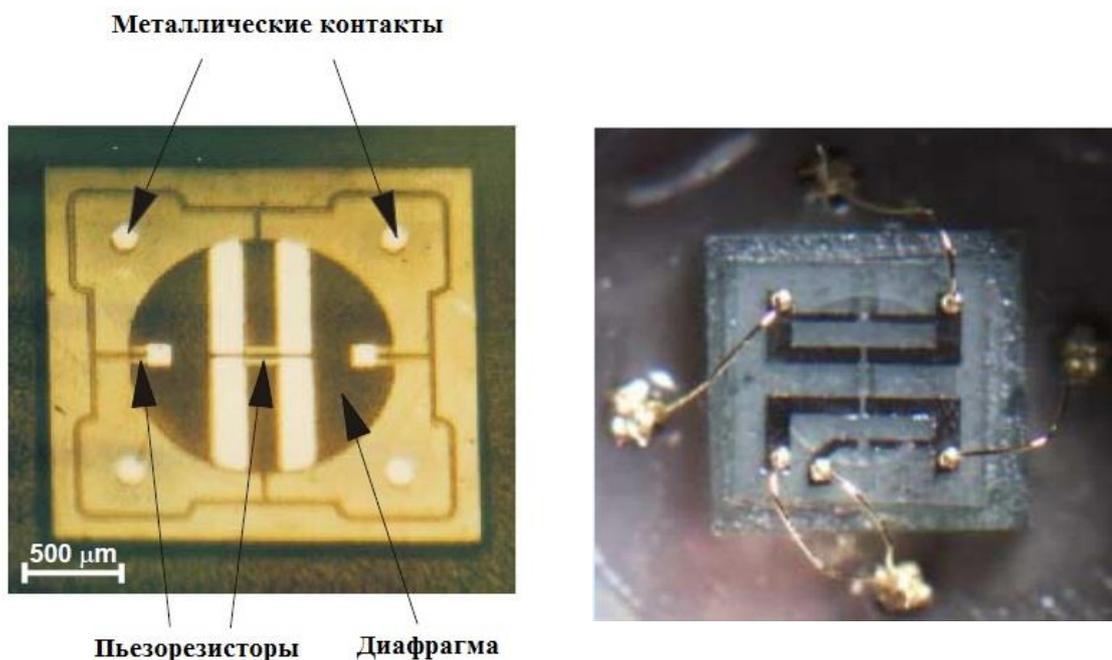


Рис.1.4в. ЧЭ высокотемпературного датчика давления на основе карбида кремния

Однако использование структуры SiC имеет ряд недостатков:

- низкий коэффициент тензочувствительности (20 - 30);
- значительная остаточная термическая деформация после воздействия больших температур;
- нелинейное изменение сопротивления тензорезисторов в широком интервале температур;
- сложность технологического процесса производства структуры SiC.



Рис. 1.4г. Высокотемпературный датчик давления с ЧЭ на основе карбида кремния

Другой хорошо изученной и освоенной в производстве является структура «кремний на диэлектрике». В отличие от структур на базе объёмного кремния, где изоляция тензорезисторов осуществляется за счёт свойств обратнорасположенного р-п-перехода, в структурах «кремний на диэлектрике» (КНД) изоляция тензорезисторов обеспечивается слоем диэлектрика (оксид кремния, нитрид кремния и др.). Это позволяет практически исключить токи утечки, а наличие диэлектрической изоляции позволяет расширить температурный диапазон работы датчиков. В полупроводниковой промышленности стандартным методом обеспечения электрического соединения между чувствительным элементом и датчиком является распайка выводов рис.1.5а.

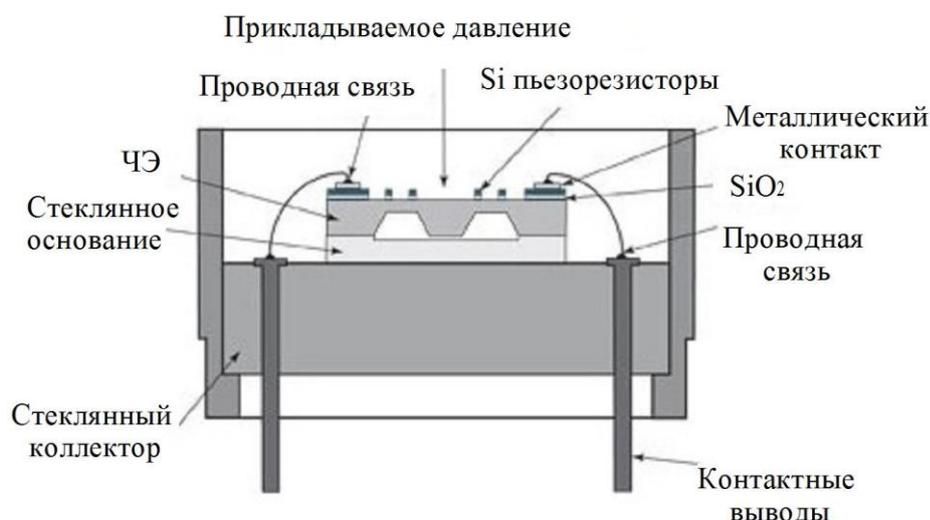


Рис.1.5а. Конструктивная схема с распайкой выводов датчика давления на структуре КНД

Однако ультразвуковая микросварка может приводить к дополнительному дефектообразованию в слое металлизации и контактах, что в последующем способствует ускоренному отказу прибора. К тому же давление среды находится в прямом взаимодействии с напряженно-чувствительной цепью, выводы и соединения которой могут выходить из строя при высоких температурах и в присутствии агрессивных химических веществ.

Новой ступенью в развитии полупроводниковых приборов стала разработка фирмой Kulite «безвыводного» датчика давления рис.1.5.б.

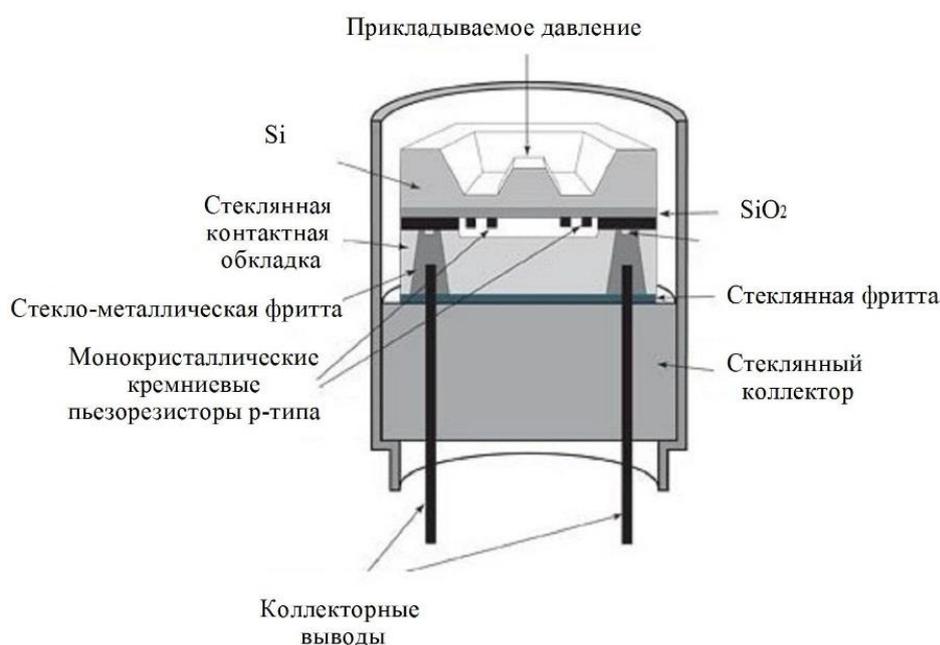


Рис.1.5б. Конструктивная схема безвыводного датчика давления с закрывающей мембраной на структуре КНД

Такой датчик использует высокотемпературные металло-стеклянные смеси для обеспечения электрического соединения между чувствительным элементом и датчиком. Корпус «безвыводного» датчика состоит из двух основных частей – чувствительный элемент и закрывающая пластина, которые собираются воедино. Такой подход позволил создать датчики, работающие при температуре до 600 °С и демонстрирующие отличные статические и динамические характеристики.

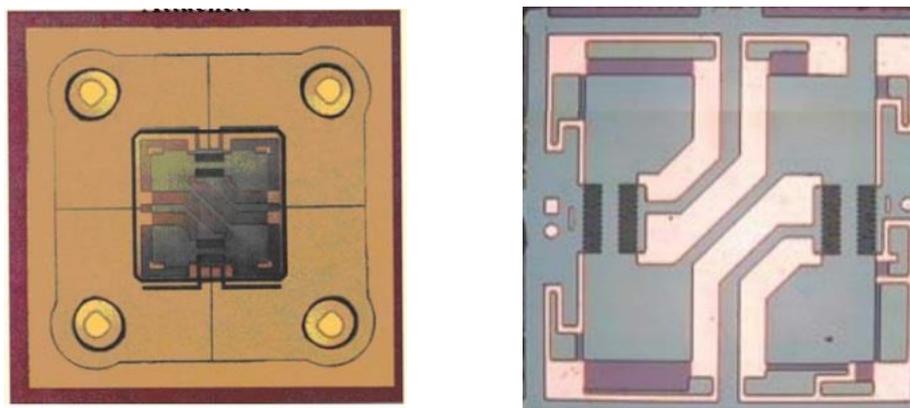


Рис.1.5в. Чувствительные элементы, выполненные по технологии КНД



Рис. 1.5г. Датчик давления фирмы Kulite (США), выполненный по технологии КНД

К недостаткам структуры КНД следует отнести:

- малую технологичность производственного процесса из-за высоких расходов на обработку одной пластины;
- структуры имеют невысокую временную стабильностью из-за дислокаций, диффузии загрязняющих примесей при долговременной обработке с применением высокотехнологичного оборудования. В результате происходит снижение надежности при температуре выше 150 °С;
- дефектность нанесенного слоя двуокиси кремния (SiO_2).

Тонкоплёночная технология на стали является другой перспективной структурой, позволяющей получить высокие характеристики надёжности и продолжительной стабильности. В военной технике, ракетостроении обычно

требуются высокоточные и стабильные измерения, обеспечить которые способны датчики давления, выполненные с применением данной технологии.

Чувствительный элемент такого датчика является многослойным, толщиной несколько нанометров. Формирование тонких плёнок, образующих чувствительный элемент, происходит на металлической мембране, материалом которой обычно является сталь марки 36НХТЮ. Использование структуры V-Au даёт возможность формирования слоя контактной группы и позволяет создавать переключки, контактные площадки, проводники. Мостовая схема из одинаковых радиальных и тангенциальных тензорезисторов образуется в гетерогенной структуре в результате применения методов травления и фотолитографии.



Рис.1.6. Фотографии датчиков фирмы Trafag, выполненных с использованием тонкоплёночной технологии на стали

Недостатками данной структуры являются: снижение метрологических характеристик из-за сильного влияния разницы коэффициентов температурного расширения материалов, входящих в состав конструкции, низкая вибрационная прочность датчиков. Также технологический процесс создания тонкой плёнки является причиной неравномерного распределения величины удельного поверхностного сопротивления по подложке. Это

приводит к рассеиванию номиналов тензорезисторов по партии ЧЭ и по поверхности каждого ЧЭ.

Структура «кремний на сапфире» (КНС) рис.1.7а является частным случаем КНД-структуры и имеет следующие преимущества:

- сапфир не является химически активным материалом и обладает радиационной стойкостью;
- температура плавления сапфира выше, чем у кремния, что приводит к минимизации деформаций при высокотемпературной обработке;
- технологическая возможность пайки жёстким серебросодержащим припоем для прочного соединения с металлическими мембранами из титановых сплавов;
- быстроедействие приборов, обусловленное отсутствием токов утечки через подложку.
- возможность проведения вторичной обработки сапфира в виду его высокой прочности.

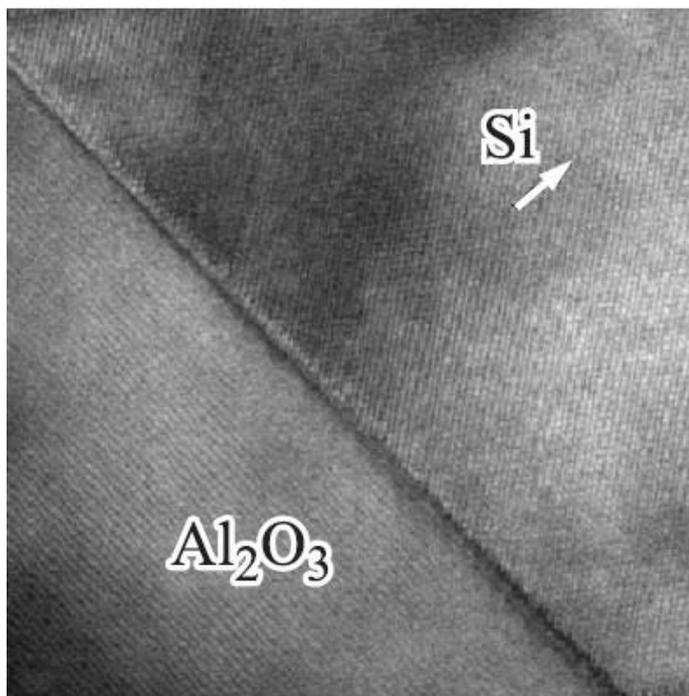


Рис.1.7а. Изображение КНС-структуры, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии

Принцип работы датчиков давления рис.1.7б на структуре КНС заключается в том, что давление преобразуется в деформацию упругой мембраны, на которой, с помощью пайки, закреплен ЧЭ (рис.1.7в). ЧЭ представляет собой тонкий слой монокристаллического кремния, выращенного на сапфировой (Al_2O_3) подложке. В дальнейшем в слое кремния формируются тензорезисторы и соединяются в мостовую схему. Давление приводит к разбалансу моста и, как следствие, к изменению выходного сигнала.

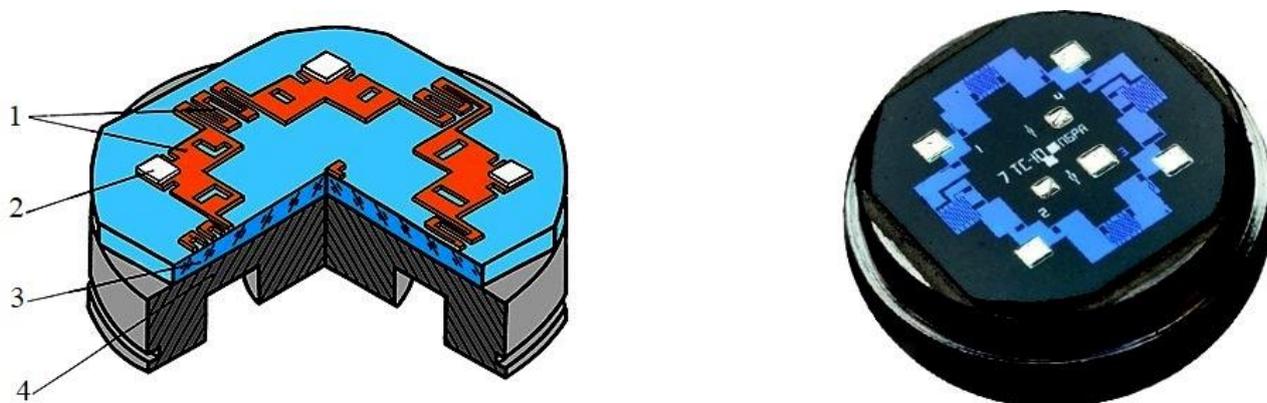


Рис.1.7б. Конструкция двухмембранного тензопреобразователя на КНС.
1 – тензометрический мост Уитстона из монокристаллического кремния; 2 – контактные площадки; 3 – сапфировая мембрана; 4 – мембрана из титанового сплава

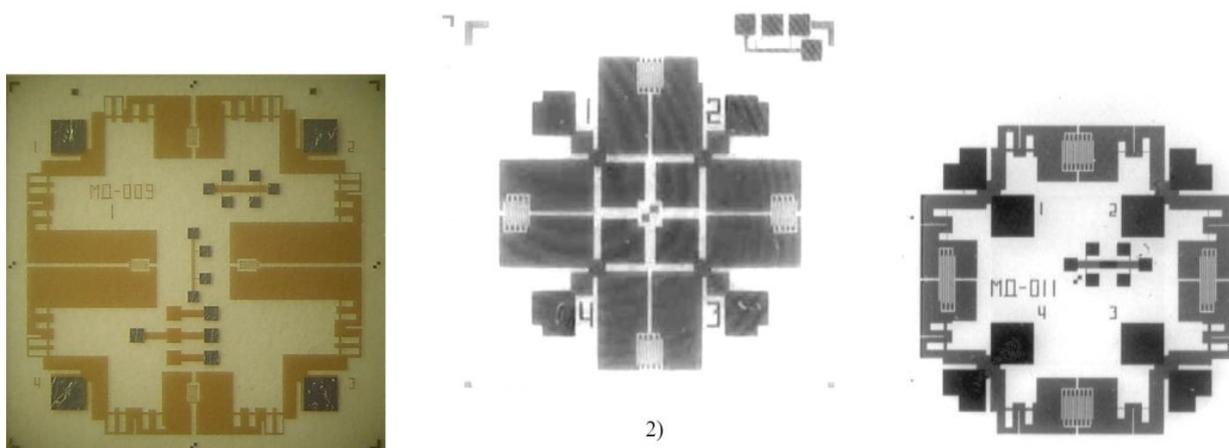


Рис.1.7в. Топологии ЧЭ на КНС

В нашей стране производством тензодатчиков (ТД) и тензопреобразователей (ТП) давления на КНС занимаются такие предприятия как ПГ «МИДА» г.Ульяновск, ЭПО «Сигнал» г.Энгельс, НПК «ВИП» г. Екатеринбург, ЗАО «Орлэкс», г.Орёл, ПГ «Метран», г.Челябинск. К ведущим зарубежным производителям следует отнести такие фирмы как Honeywell, Sensonetics, Minebea, ESI, Omega.

Конструкции ТП на КНС могут быть весьма различны и отличаться друг от друга. Так на рис.1.8 представлен ТП на КНС биомедицинского назначения, выполненный в виде тонкой сапфировой мембраны диаметром 0,9 мм, ограниченной кольцом из сапфира с наружным диаметром 1,6 мм.

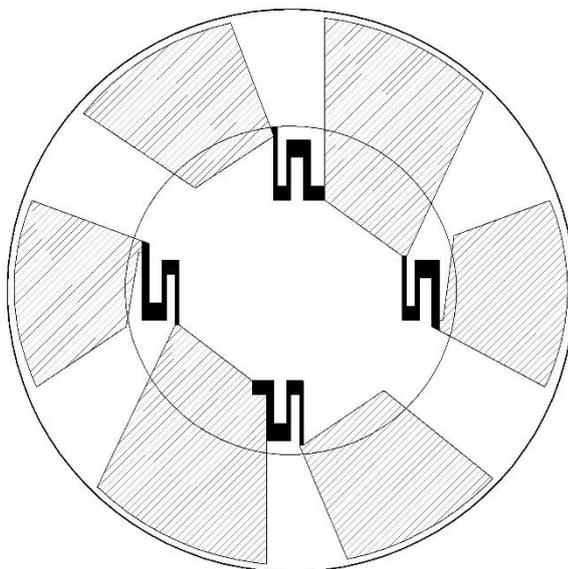


Рис.1.8. Тензопреобразователь на КНС биомедицинского назначения.
Вид сверху.

Толщина мембраны составляет 2-6 мкм, толщина обрамляющего кольца 70-100 мкм. Толщина кремниевой гетероэпитаксиальной плёнки ориентации (100) составляет 2 мкм. Удельное сопротивление плёнки $\rho=0,005-0,009 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Разброс сопротивлений отдельных резисторов на мембране достигал 10%, что объясняется микронеоднородностями в кремнии и неоднородностью механических напряжений на границе кремний-сапфир. Эти же причины

определяют большой разброс в температурном коэффициенте сопротивлений (ТКС) резисторов. Контактные площадки изготовлены из золота с подслоем титана или хрома. Конструкция датчика обеспечивает герметичность соединения тензоэлемента с корпусом, надежность электрических контактов и отсутствие токсических материалов, контактирующих с биологической средой. Диаметр конструкции не превышает 2 мм, высота равна 2 мм.

Также хорошо зарекомендовала себя конструкция тензодатчика на КНС, состоящая из однослойного упругого элемента из сапфира.

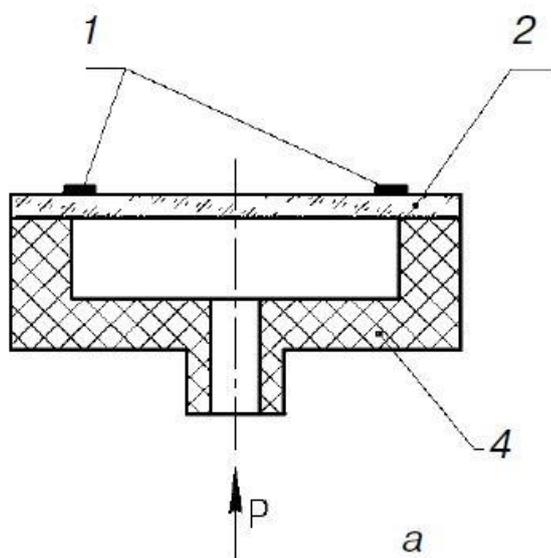


Рис.1.9. Схематичное представление ТП на КНС с однослойным упругим элементом из сапфира: 1 – ТР, 2 – ПЧЭ, 3 – металлическая упругая мембрана, 4 – керамическое основание

Несмотря на то, что наиболее широко применяются двухслойные ТП, рис.1.10, они имеют сильную температурную зависимость выходного сигнала. В характеристики двухслойных ТП значительный вклад дают свойства металла и соединительного слоя. ТП с однослойным УЭ представляет собой ПЧЭ, напаянный на керамическое основание. В качестве припоя используют стеклопорошок. Точностные параметры такого ТП сравнимы с серийно-выпускаемыми двухслойными ТП рис.1.10.

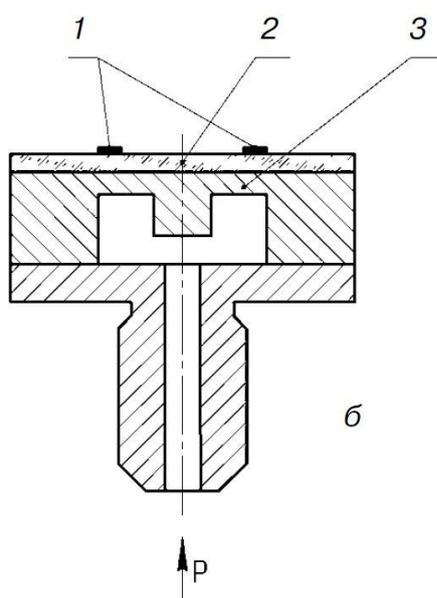


Рис.1.10. Схематичное изображение конструкции ТП давления с двухслойным УЭ из сапфира и металла: : 1 – ТР, 2 – ПЧЭ, 3 – металлическая упругая мембрана

Тензодатчики на структуре КНС успешно производятся уже более 30 лет. Несмотря на различия во внешнем виде, некоторых метрологических характеристиках и технологии производства, у всех тензодатчиков на КНС прослеживаются общие закономерности в конструкции. Дальнейший анализ существующих конструкций направлен на выявление ключевых мест в геометрии тензодатчика и влиянии их на выходной сигнал.

На рис.1.11 представлен тензодатчик на КНС, разработанный предприятием ЭПО «Сигнал». Важную роль в работе данного устройства играет титановая мембрана. Её конструкция обуславливает величину выходного сигнала, её нелинейность, топологию ЧЭ. Данный прибор позволяет успешно производить измерение давления до 3 МПа.

При производстве данного датчика возникает ряд технологических погрешностей, избежать которых невозможно. В частности:

- погрешности при токарной обработке корпуса;
- остаточные термические напряжения после сварки штуцера;
- погрешности при шлифовке поверхности;
- остаточные термические напряжения после пайки кристалла;

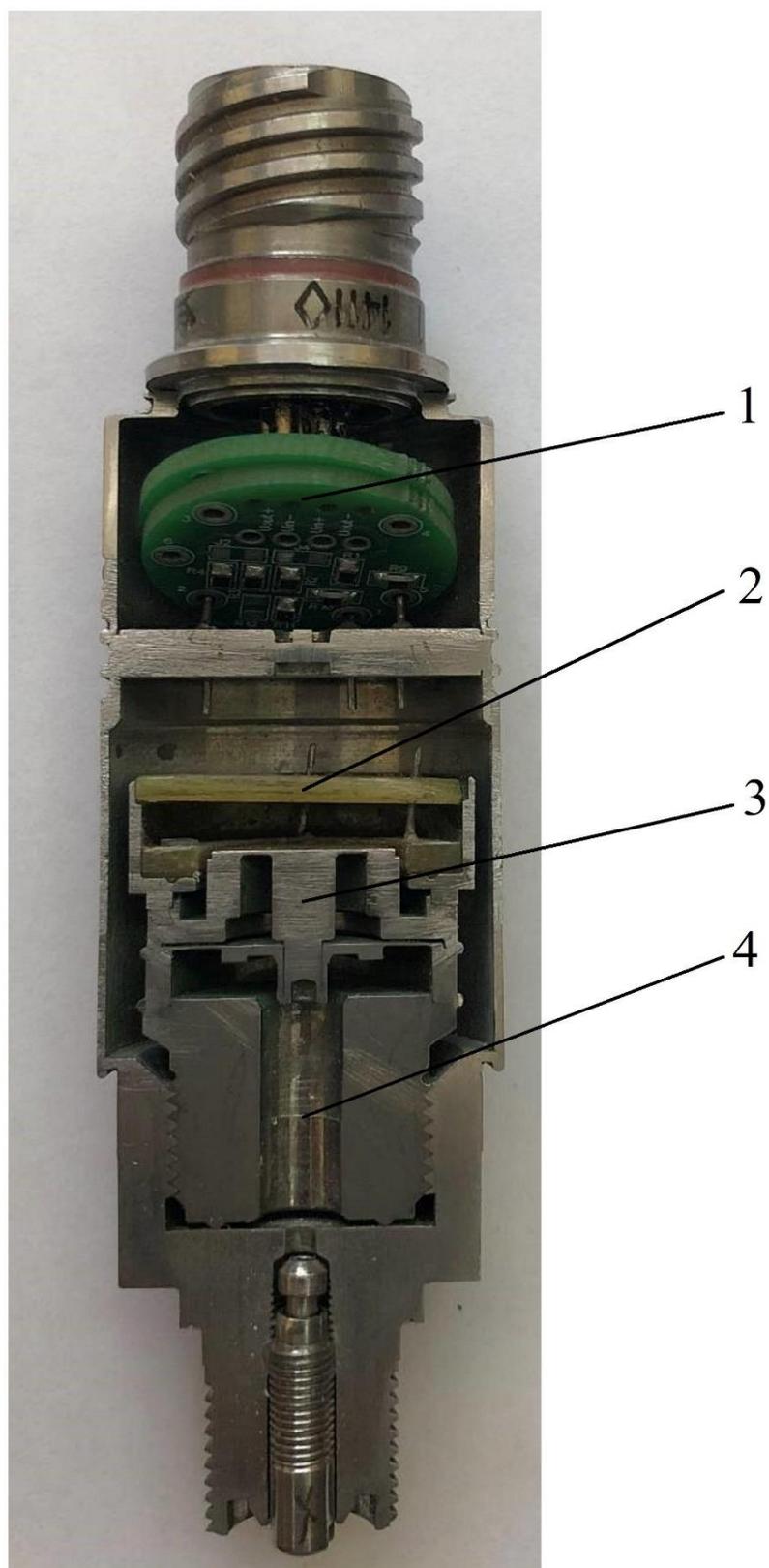


Рис.1.11. Полупроводниковый датчик давления на КНС,
разработанный ЭПО «Сигнал» [87]

1- блок электроники; 2 – коллектор для снятия сигнала; 3 –
двухмембранный упругий элемент из титанового сплава ВТ-9; 4-
область для подачи давления

- погрешности приклеивания коллектора;
- анизотропия сапфира и кремния;
- неточность позиционирования ЧЭ.

Все это значительно усложняет процесс дальнейшей настройки, что негативно сказывается на точности измерений и стоимости изделия.

Другим ведущим Отечественным производителем тензодатчиков на структуре КНС сегодня является ПГ «МИДА» (г. Ульяновск).

Тензопреобразователь датчика рис. 1.12 имеет в своей конструкции две мембраны: приёмную и измерительную, которые соединены штоком. На измерительной мембране посредством пайки закреплён полупроводниковый чувствительный элемент, который выполнен в виде сапфировой подложки с нанесёнными на поверхность кремниевыми тензорезисторами, алюминиевыми проводниками, разваренными при помощи ультразвуковой сварки на выводы коллектора и чувствительный элемент.

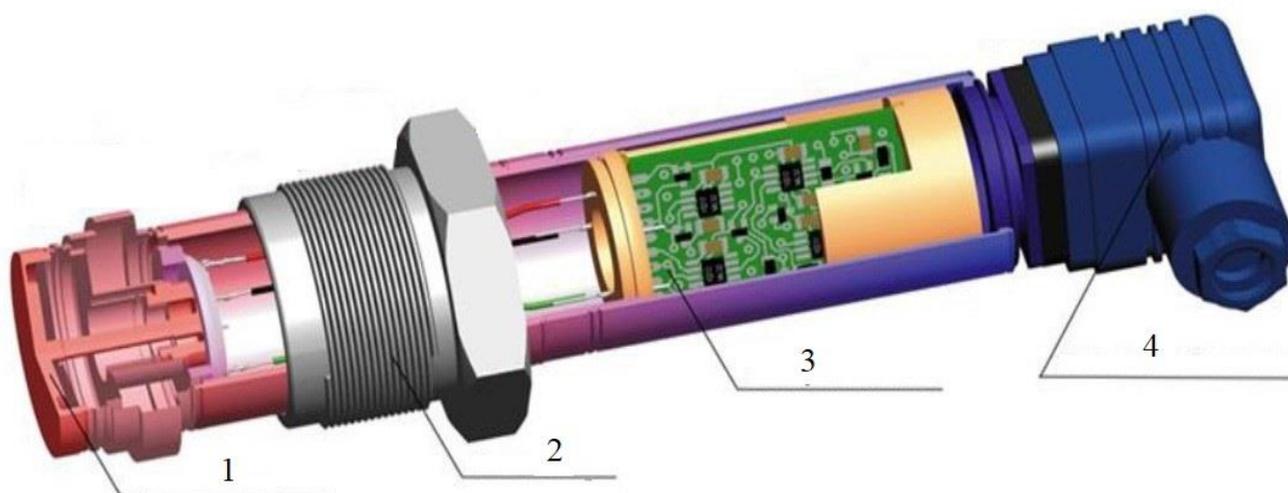


Рис.1.12. Датчик МИДА-ДИ-12П-05 [30]

- 1- приёмная мембрана; 2 – монтажная гайка; 3 – блок электроники;
4 – узел ввода кабеля связи

Датчики успешно работают в следующих температурных диапазонах: измеряемого вещества: от минус 40 до плюс 300 °С; окружающего электронный блок воздуха: от минус 40 до плюс 80 °С.



Рис. 1.13. Датчик с отдельным электронным блоком
МИДА-ДИ(-ДВ)-12П-06-К [30]

Таким образом, электронный блок может располагаться на определенном расстоянии от области действия повышенной температуры измеряемого вещества, что позволит обеспечить на нём необходимую для успешной работы температуру. Соединение электронного блока с контактной колодкой сальникового узла осуществляется специальными монтажными проводами. В датчиках совмещённой конструкции первичный преобразователь конструктивно объединён с электронным блоком. В датчиках разнесённой конструкции рис. 1.13 первичный преобразователь и электронный блок разделены и соединяются кабельной перемычкой, длина которой может быть до 5 м.

Для защиты ЧЭ датчика давления от воздействия гидроударов или пульсаций измеряемых сред применяется гаситель пульсаций давлений (демпфер) рис.1.14. Эффективность гашения пульсаций давления

длительностью не более 20 мс составляет не менее 90 %. Демпфер предназначен для работы при температуре измеряемой среды от минус 60 (без замерзания измеряемой среды в приемной полости) до плюс 300°С.

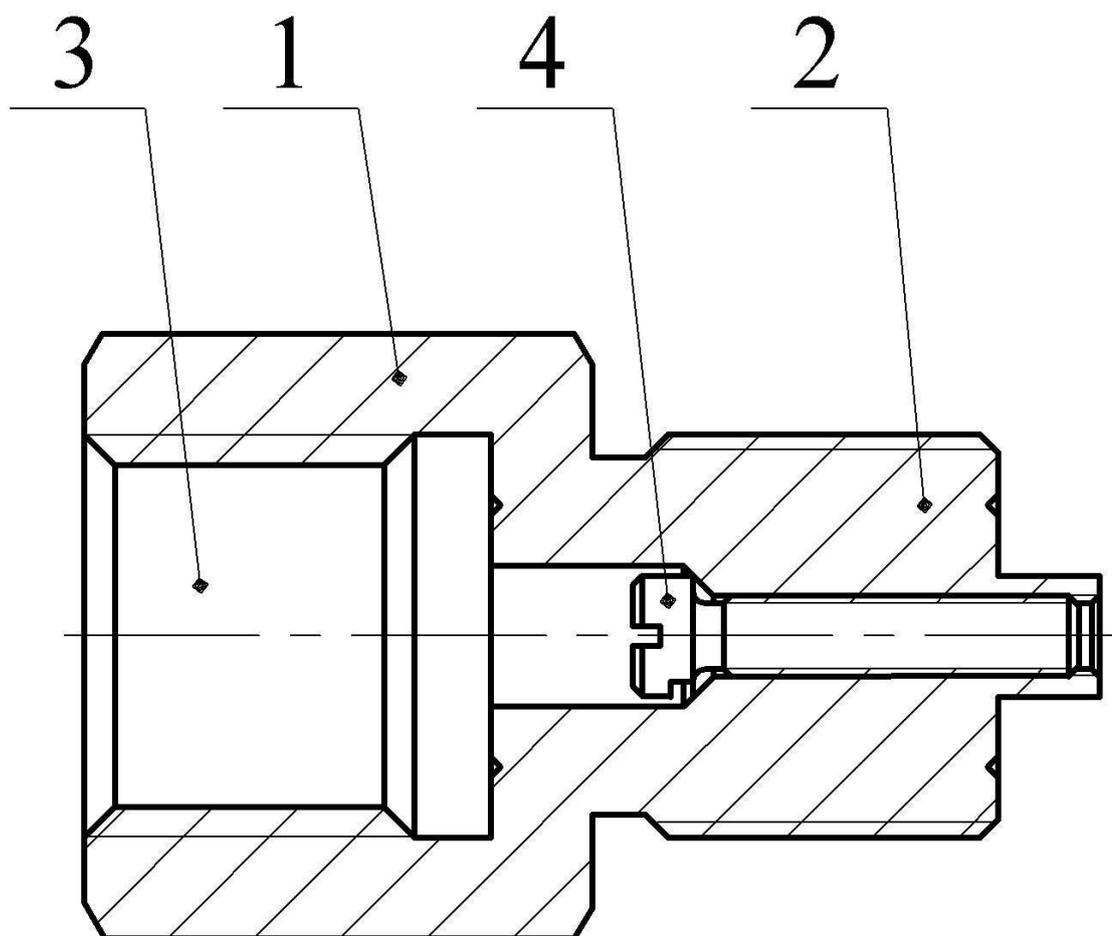


Рис.1.14. Конструкция гасителя пульсаций [30]

Конструкция демпфера представляет собой корпус 1, в котором имеется штуцер 2, посадочное отверстие для монтажа датчика давления 3, специальная вставка 4, которая является винтом М4х0,7. Принцип работы демпфера заключается в том, что жидкость или газ заполняет капиллярный канал, который образован винтовой нарезкой корпуса 1 и вставкой 4 и попадает в полость датчика, оказывая воздействие на воспринимающую мембрану. Процесс демпфирования пульсаций давления измеряемой среды и компенсации гидравлических ударов происходит в капиллярном канале.

Весьма схожую конструкцию имеют датчики и зарубежного производства.

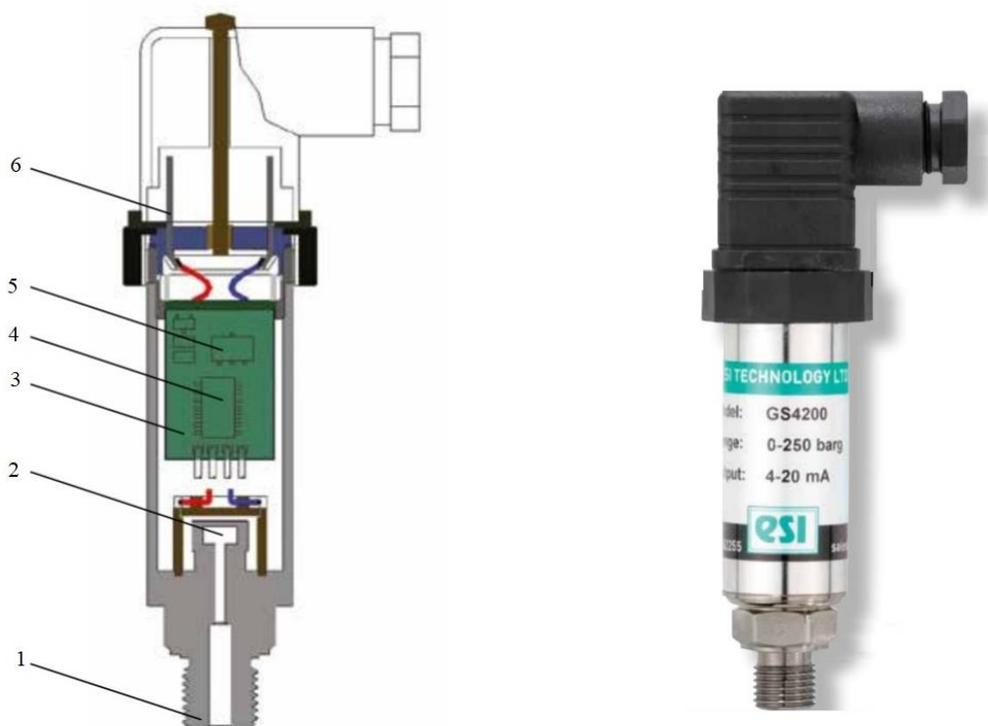


Рис.1.15 а. Полупроводниковые датчики давления на структуре КНС фирмы ESI [91]

1 – область для подачи давления; 2 – усилитель сигнала; 3 – микроконтроллер; 4 – конвертер сигнала; 5 – электрические выводы



Рис. 1.15 б. Полупроводниковые датчики давления фирмы Sensonetics [124]

1.2. Особенности расчета и проектирования полупроводниковых тензодатчиков на структуре КНС

Литературный обзор показал, что несмотря на большое число публикаций в области полупроводниковых датчиков давления на КНС, вопросы расчета и проектирования остаются актуальными.

Надежность и точность приборов зависят от упругого элемента и от строгости и степени точности его расчета. В полупроводниковых датчиках на КНС чаще всего применяется упругий элемент мембранного типа. Основные принципы расчета упругих элементов изложены в фундаментальных работах [2, 11, 15, 16, 17, 18, 66, 77, 78, 80, 81, 120-122] и основаны на теоретических исследованиях в области пластин и оболочек. Вопросы расчета плоских мембран подробно рассмотрены в работах Л.Е. Андреевой, С.Д. Пономарёва, В.И. Феодосьева. Расчету пластинок и оболочек посвящены работы С.П. Тимошенко, Э. Рэйснера, Х.М. Муштари, Л. Донелла, В.З. Власова. Теория пологих оболочек, основанная пренебрежением рядом малых величин в основных соотношениях рассматривалась в работах К. Маргера, В.В. Новожилова. Нелинейная теория оболочек получила развитие в работах К.З. Галимова, Э.И. Григолюка, Д.В. Вайнберга, А.А. Синявского, Н.В. Валишвили, С. Лукасевича, Б. Будянского, В. Койтера, Г. Крауса, И. Сандерса, С.С. Гаврюшина.

Однако, хорошо зарекомендовавшие себя подходы при проектировании традиционных типов упругих элементов оказываются или малопригодными для рассматриваемого класса изделий, а в отдельных случаях не позволяют в полном объеме и с требуемой точностью учесть все особенности нелинейного деформирования.

В работе [41] было показано, что напряжения, возникающие на поверхности полупроводникового ТП на КНС, отличаются от решения по теории пластин тем, что проникают за границы мембраны, в сторону жесткого основания. В связи с этим необходимо, для получения максимальной

чувствительности, располагать центр базы тензорезистора на границе тонкой части мембраны.

Вопрос погрешностей полупроводниковых датчиков давления хорошо рассмотрен в работе [40]. Российские стандарты регламентируют основную погрешность, которая определяется как максимальное отклонение действительного выходного сигнала датчика от стандартного, отнесенное к диапазону изменения выходного сигнала. Нетрудно видеть, что основная погрешность включает в себя, кроме нелинейности и вариации выходного сигнала, также точность установки начального («нуля») и максимального выходного сигналов датчика, что определяется используемой электроникой и квалификацией пользователя. Кроме того, основная погрешность жестко связывается с дополнительной температурной погрешностью, что в сумме определяет класс датчика.

По-другому определяется точность датчиков давления за рубежом. Как правило, точность определяется как среднеквадратичная сумма нелинейности, гистерезиса и повторяемости выходного сигнала прибора. При этом нелинейность определяется как максимальное по модулю отклонение зависимости действительного выходного сигнала U от давления P от линейной:

$$U(P) = U_0 + A \cdot P, \quad (1.1)$$

отнесенное к диапазону изменения выходного сигнала

$$U_d = U(P_{\max}) - U(P_{\min}) \quad (1.2)$$

Гистерезис (вариация) определяется как максимальная разница между выходными сигналами при прямом и обратном ходе, отнесенная к U_d . Повторяемость определяется как максимальная разность между выходными сигналами при последовательных (обычно двух) циклах нагружения прибора давлением, отнесенная к U_d .

Гистерезис выходного сигнала преобразователей давления определяется прежде всего свойствами материалов преобразователя. В

монокристаллических материалах с высокими упругими характеристиками гистерезис практически отсутствует (если при изготовлении преобразователи в этот материал не вносятся дефекты). В основной массе конструкций преобразователей давления используются металлические упругие мембраны, изготовленные из сплавов ВТ-9 или ЗБНХТЮ` и чувствительные элементы из структур КНС, припаянные к мембране из титанового сплава ВТ-9 жёстким припоем ПСР72. Металлические элементы преобразователей соединяются либо сваркой (если они изготовлены из титановых сплавов), либо высокотемпературной пайкой.

В таких преобразователях источниками гистерезиса являются в основном места сварки и пайки, а также те места конструкции, в которых при работе уровень деформации близок к пределу текучести металла. Для снижения гистерезиса используются методы технологической стабилизации: термоциклирование, отжиг, циклическое нагружение давлением. В результате значения гистерезиса серийных преобразователей не превышают 0.05%. Примерно такие же значения характерны и для повторяемости.

Дополнительная температурная погрешность — это одна из самых существенных составляющих погрешности микроэлектронных преобразователей давления, поскольку практически все характеристики полупроводниковых тензорезисторов сильно и нелинейно зависят от температуры. Кроме того, существенный вклад в эту составляющую погрешности вносят температурные зависимости механических свойств материалов и термические напряжения, возникающие в местах соединения разнородных материалов.

Принято выделять две различные по происхождению причины температурной зависимости выходного сигнала тензопреобразователей. Первая причина — разница температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов в смежных плечах мостовой схемы. Это приводит к температурной зависимости начального выходного сигнала (температурному дрейфу нуля). В процессе пайки чувствительного элемента на титановую

мембрану возникает сильная термическая деформация сапфировой подложки, что и является причиной температурного дрейфа нуля в преобразователях на основе КНС. Исследования, проведенные в ПГ МИДА, показали, что значения ТКС тензорезисторов на поверхности ЧЭ существенно зависят от их положения и ориентации относительно радиуса мембраны [10], причём вид распределения ТКС для одно- и двухмембранных преобразователей заметно различается. Соответственно расположение тензорезисторов смежных плеч мостовой схемы в местах с минимальным различием в ТКС позволяет значительно уменьшить температурный дрейф нуля. Однако при этом необходимо учитывать и возможное снижение чувствительности преобразователя к давлению; тем не менее, в результате оптимизации топологии тензочувствительной схемы разработчикам удалось снизить температурный дрейф нуля в 3-6 раз по сравнению с предыдущими конструкциями преобразователей.

Температурный дрейф чувствительности является второй составляющей температурной погрешности. Причиной температурного дрейфа является зависимость упругих характеристик материалов от температуры, а также пониженная тензочувствительность кремниевых резисторов при повышенной температуре. Снизить температурный коэффициент чувствительности возможно повышением уровня легирования кремния, в то время как воздействие другими физико-технологическими методами на данную составляющую не оказывает существенного влияния. Дальнейшее снижение температурной зависимости выходного сигнала возможно схемотехническими методами. Одним из них является использование постоянных резисторов, не зависящих от температуры. Такую схему можно располагать в любом удобном месте, не заботясь о равенстве температур преобразователя и корректирующих элементов. Реально на практике при производстве преобразователей применяются два типа схем коррекции температурной погрешности (рис.1.17 а,б). Резистор R_d , включаемый последовательно с мостовой схемой служит для компенсации

температурного дрейфа чувствительности, а резисторы, подключенные параллельно плечам моста - для компенсации температурного дрейфа нуля. При использовании схемы (а) последующая балансировка тензомоста производится с помощью подстроечных кремниевых резисторов R_6 , расположенных на сапфировом ЧЭ, что широко используется в современных преобразователях на основе КНС. Однако, при этом изменяются значения сопротивлений плеч моста, что приводит к погрешности термокомпенсации с использованием расчетного резистора $R_{ш}$, как следствие, к необходимости дополнительной эмпирической поправки компенсационного резистора.

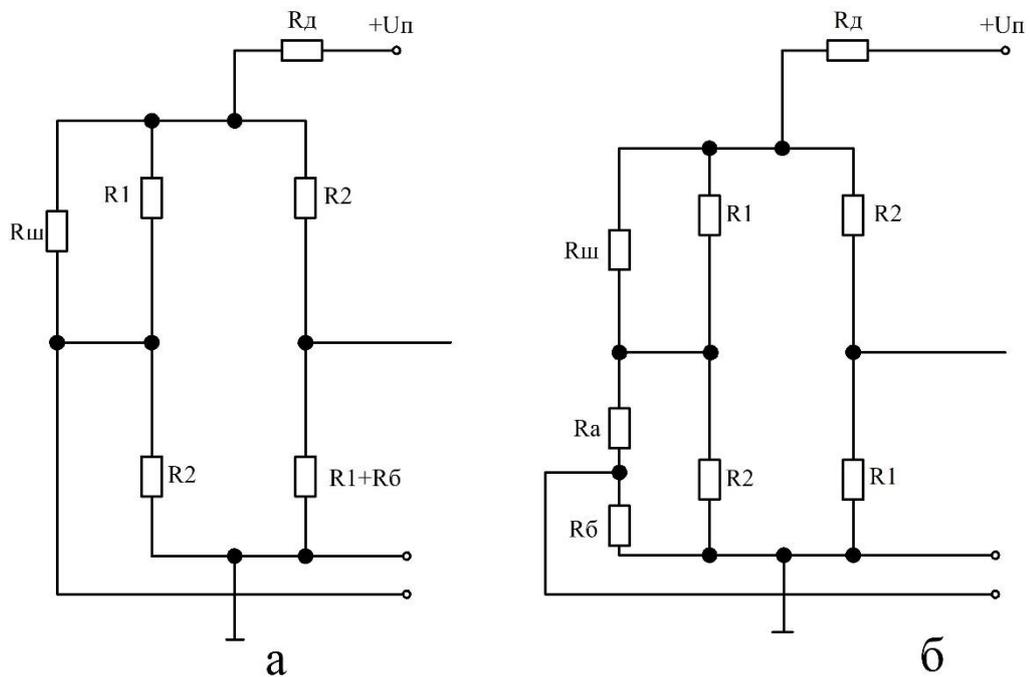


Рис.1.17. Схемы компенсации температурной погрешности

Более удобной является схема (б). Во-первых, при ее использовании нет необходимости в технологической балансировке моста. Это позволяет упростить топологию тензочувствительной схемы, уменьшить размеры ЧЭ` существенно упростить технологию температурной компенсации при отсутствии доступа к ЧЭ (например преобразователях абсолютного давления). Во-вторых, подбором элементов схемы легко производить подстройку величины начального сигнала преобразователей, унифицируя их характеристики. Наконец, при использовании расчетных резисторов схемы термокомпенсация осуществляется с большей точностью.

В целом же при рассмотрении вопроса о повышении точности преобразователей давления необходимо иметь в виду, что разные составляющие точности имеют разную важность для измерительных систем.

Нелинейность преобразователей давления определяется двумя составляющими — нелинейностью механического преобразования измеряемого давления в деформацию сапфирового чувствительного элемента и нелинейностью тензорезистивного эффекта, т.е. преобразования деформации в относительное изменение сопротивления кремниевых тензорезисторов на сапфировой подложке. При питании тензорезисторной мостовой схемы постоянным напряжением возникает еще одна составляющая нелинейности выходного сигнала, которая исчезает, если изменения сопротивлений смежных плеч моста одинаковы.

В работе [75] показано, что тензорезистивный эффект в кремнии нелинеен, и зависимость относительного изменения сопротивления ТР от деформации может быть определена по формуле:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \parallel, \perp = k_{\parallel, \perp} \varepsilon + A_{\parallel, \perp} \varepsilon^2, \quad (1.3)$$

где k и A - линейный и квадратический коэффициенты тензочувствительности, а символы \parallel и \perp относятся к продольному и поперечному ТР. Однако данный вид нелинейности достаточно легко снижается последующей обработкой выходного сигнала, например микропроцессорной электронной схемой. К тому же величина A имеет значение в 10^3 меньшее, чем k , поэтому данный вид нелинейности можно исключить и в дальнейшем пользоваться более упрощенной формулой:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = m_{44} \varepsilon, \quad (1.4)$$

где m_{44} – основной коэффициент эластосопротивления, ε – деформация ТР. Следует отметить, что m_{44} сильно зависит от температуры, рис.1.18.

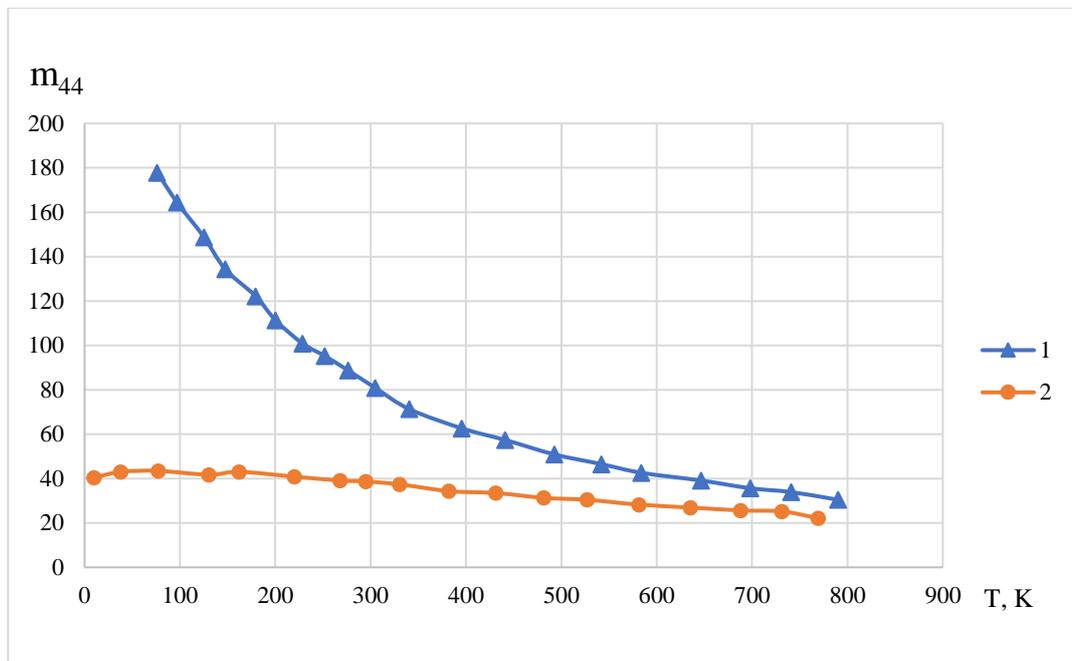


Рис.1.18. Температурная зависимость основного коэффициента эластосопротивления m_{44} .

1- концентрация дырок $4,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 2 - концентрация дырок $2,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

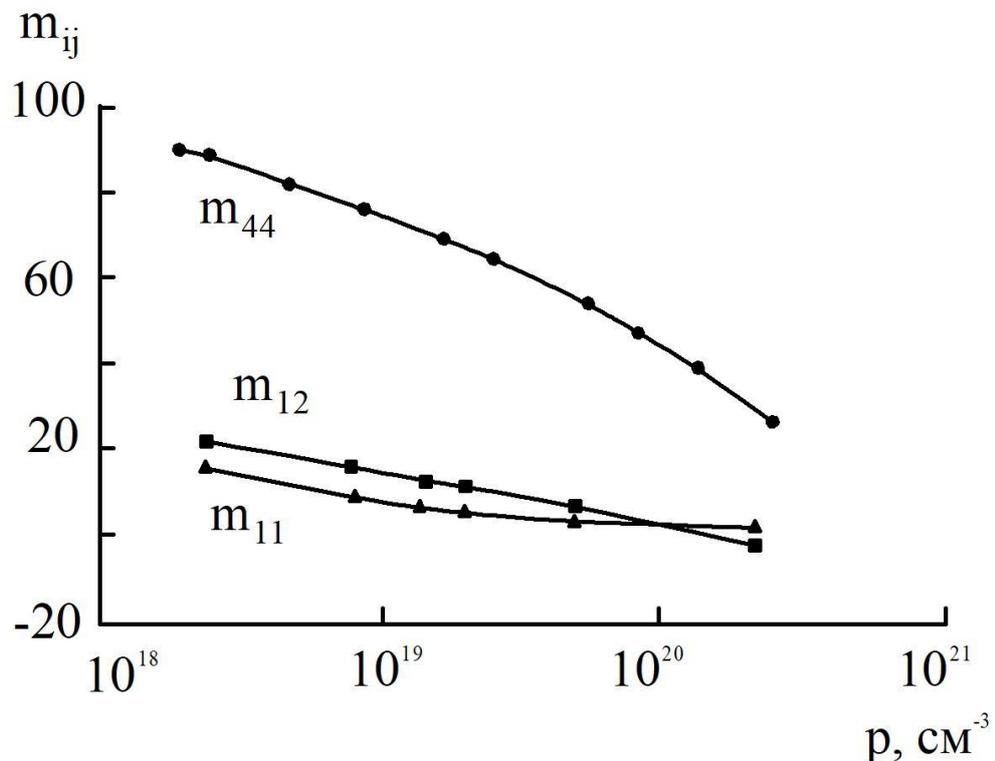


Рис.1.19. Зависимость коэффициентов эластосопротивления р-КНС от концентрации основных носителей заряда при комнатной температуре

В работе [39] говорится о необходимости численного моделирования конструкции двухмембранного ТП на КНС, в связи с тем, что, во-первых, геометрия имеет концентраторы напряжений в виде скруглений, а, во-вторых, поверхность ЧЭ является трехслойной (титановая мембрана, припой, сапфир), что делает невозможным использовать аналитические формулы для расчета НДС на поверхности ТП на КНС.

Численное моделирование датчиков давления было произведено в работах [41,103,107,113,118,132, 19-26]. Однако, хочется отметить, что в работе [103] в качестве критерия максимальной чувствительности тензодатчика берется максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу, что не совсем корректно, ведь тензорезистор воспринимает, в зависимости от ориентации, только радиальное или тангенциальное напряжение. Также в данной работе при оптимизации используется только один параметр качества – выходной сигнал, в то время как нелинейность, и вариация не учитываются.

Существует достаточно много работ, посвященных исследованию механических характеристик материалов, но нет данных по механическим свойствам припоя ПСР 72, а также нет данных о том, как ведут себя модуль упругости и коэффициент термического расширения при отрицательных температурах.

Вопросы оптимизации конструкции датчиков на КНС рассмотрены в работах [39,46,108,134,137], однако здесь не делается вывод, является ли решение оптимальным и могут ли быть получены еще варианты, не уступающие полученному по параметрам качества. Экономический эффект от оптимизации до сих пор рассмотрен не был, а ведь пластина со структурой КНС является весьма дорогостоящим объектом и даже незначительное уменьшение размера чувствительного элемента даст положительный экономический эффект.

В работе [88] рассмотрен вопрос анизотропии сапфира. Анизотропия механических свойств связана с кристаллической структурой и ее типом симметрии. Известно, что по виду симметрии кристаллы сапфира относят к кристаллам с гексагональной сингонией. Они обладают одной осью симметрии. В силу анизотропии упругие свойства, прочность, скорость распространения волн зависят от направления. Положение кристаллографических плоскостей, представляющих наибольший интерес приведено на рис. 1.20.

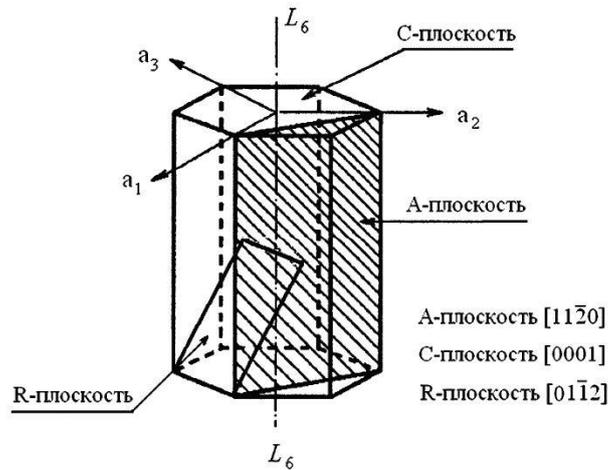


Рис.1.20. Кристаллографические плоскости сапфира

Связь между напряжениями и деформациями для тела общего вида анизотропии можно представить в виде:

$$\begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{22} \\ p_{33} \\ p_{23} \\ p_{13} \\ p_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Для случая гексагональной сингонии, характерной для сапфира, число независимых упругих констант в выражении (1.5) равно 5, а для случая C-ориентации рис., когда оси локальной системы координат $Ox'_1x'_2x'_3$ параллельны осям глобальной системы координат $Ox_1x_2x_3$, зависимость между напряжениями и деформациями приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{22} \\ p_{33} \\ p_{23} \\ p_{13} \\ p_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{11} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{13} & A_{13} & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (A_{11} - A_{12})/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

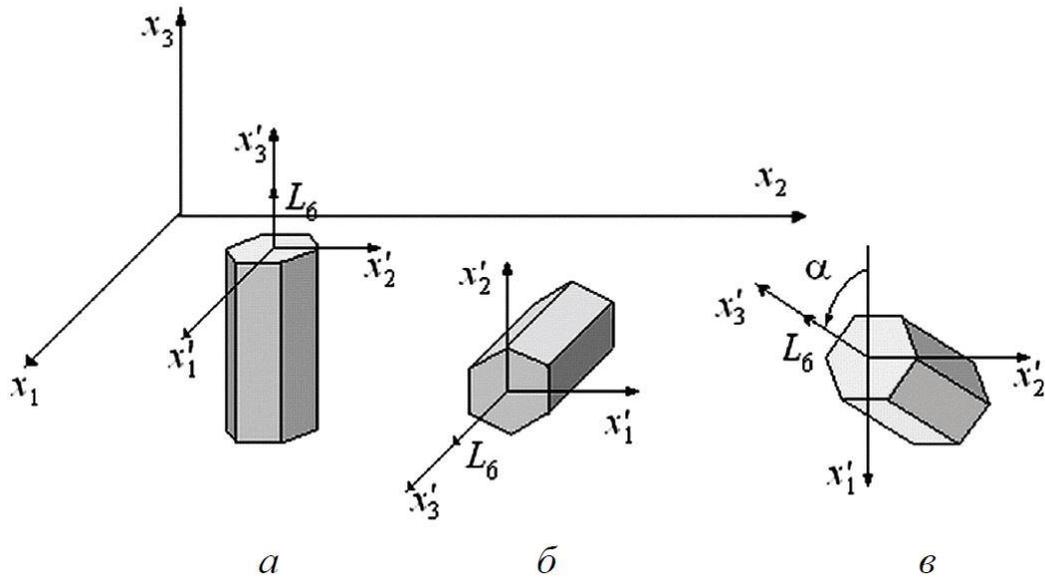


Рис.1.21. Системы координат и расположение кристаллографических осей сапфира: а – сапфировый стержень С-ориентации, б – сапфировый стержень А-ориентации, в – сапфировый стержень, наклонённый под углом α к оси Ox_3 .

Используя формулу (1.5) для случая А-ориентации сапфира (рис.1.21.б), получим следующую зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\begin{pmatrix} p_{11} \\ p_{22} \\ p_{33} \\ p_{23} \\ p_{13} \\ p_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{33} & A_{13} & A_{13} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 \\ A_{13} & A_{12} & A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (A_{11} - A_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Значения упругих констант сапфира $A_{11} = 496$ ГПа, $A_{12}=164$ ГПа, $A_{13}=115$ ГПа, $A_{33}=498$ ГПа, $A_{44}=148$ ГПа. [90].

Проведя ряд математических преобразований, можно получить формулы для модуля упругости С-ориентации(1.8) и А-ориентации(1.9) сапфира:

$$E = A_{33} - \frac{2A_{13}^2}{A_{11}+A_{12}} = 457,9 \text{ ГПа} \quad (1.8)$$

$$E = A_{11} + \frac{2A_{12}A_{13}^2 - A_{11}A_{13}^2 - A_{33}A_{12}^2}{A_{11}A_{33} + A_{13}^2} = 430,76 \text{ ГПа} \quad (1.9)$$

В работе [88] был проведен эксперимент, по определению скорости волны деформаций в сапфировых стержнях А и С ориентации. Скорость волны связана с модулем упругости следующим соотношением:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6), \quad (1.10)$$

где E – модуль упругости, ρ – плотность материала (для сапфира $3,97$ г/см³), V – скорость волны деформаций. Экспериментальный процесс распространения волн в сапфире проводился методом широкополосного тензометрирования. В результате были получены следующие значения для скорости волны:

$$\text{А-ориентации : } V = 10419 \text{ м/с} \Rightarrow E = 430,96 \text{ ГПа};$$

$$\text{С-ориентации : } V = 10752 \text{ м/с} \Rightarrow E = 458,95 \text{ ГПа}.$$

Разница между теоретическими и экспериментальными значениями незначительна, а разница в модуле упругости для С-ориентации и А-ориентации составляет $\approx 3\%$. На фоне разброса характеристик остальных материалов явлением анизотропии при расчете ТП на КНС можно пренебречь. В ряде случаев учет анизотропии приведет к такому отличию от изотропного случая, которое практически проверить весьма сложно.

Однако, следует отметить, что большие температурные деформации сжатия в пленках КНС, возникающие из-за разницы в коэффициентах теплового расширения (КТР) кремния и сапфира, приводят к анизотропии удельного сопротивления материала в узких резисторах из КНС, причем степень анизотропии зависит от отношения ширины b резисторов к толщине d

пленки кремния. Формирование тензорезисторов на ПЧЭ в виде мезаструктуры, соединенной с сапфировой подложкой только нижним основанием, приводит к зависимости относительного изменения сопротивления тензорезисторов при деформации ПЧЭ от величины b/d . Жесткое соединение ПЧЭ с металлическим упругим элементом ТП вызывает дополнительные термические напряжения пленки кремния из-за различия КТР сапфира и металла, что также изменяет характеристики тензорезисторов.

Вопрос разработки топологии тензосхемы для полупроводниковых датчиков на КНС подробно рассмотрен в работе [39]. Топология тензочувствительной схемы определяется из условия обеспечения максимума тензочувствительности при минимальных погрешностях измерений. В работе [38] было показано, что тензочувствительность кремниевых тензорезисторов минимальна при ориентации ПЧЭ в плоскости (001). При этом изменения сопротивления тензорезисторов в смежных плечах мостовой схемы близки по абсолютным значениям, и в результате обеспечивается минимальная нелинейность выходного сигнала тензомоста. При ориентации ПЧЭ в плоскости (001) кремния максимальная чувствительность мостовой тензосхемы мембранного ТП давления имеет место при расположении точечных тензорезисторов на внешнем контуре мембраны параллельно и перпендикулярно радиусу по кристаллографическим направлениям $\langle 110 \rangle$. Однако с учетом конечного сопротивления R тензорезисторов их приходится делать в виде меандров конечной длины, занимающих определённую площадь мембраны. В этом случае минимальная потеря тензочувствительности происходит при ориентации меандров параллельно друг другу рис.1.22.

ТП на КНС очень чувствительны к изменению температуры. Из-за различия коэффициентов термического расширения титанового сплава, сапфира и припоя, при изменении температуры измеряемой среды на границах припой-титан и припой-сапфир возникнут дополнительные напряжения.

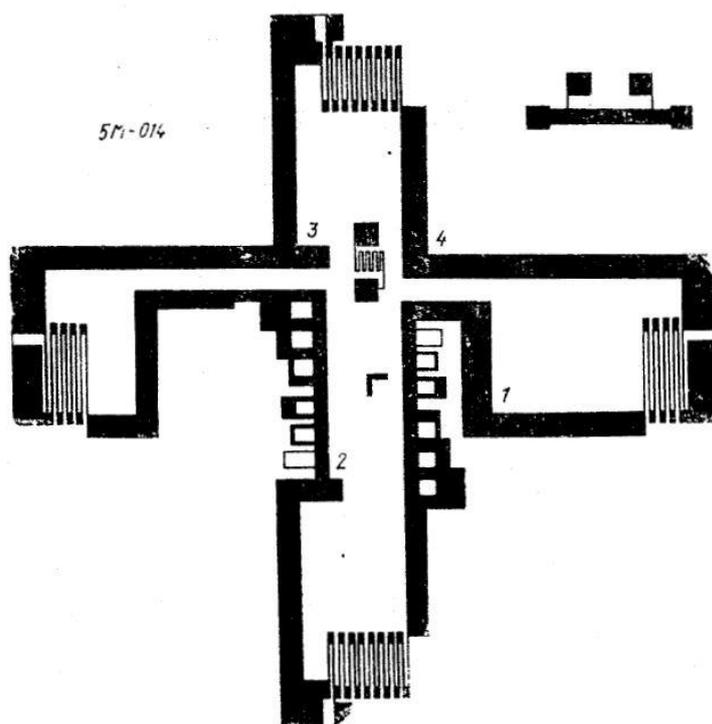


Рис.1.22. Общий вид ПЧЭ на КНС с тензорезистивной мостовой схемой для ТП давления

Вопрос температурной компенсации достаточно подробно рассмотрен в работах [113, 116, 135, 137], однако до сих пор должного внимания не было уделено учету остаточных напряжений после пайки ЧЭ и сварки двухмембранного модуля.

При исследовании структуры КНС в работе [69], говорится о наличии дефектного слоя на границе кремний-сапфир. Данное явление может приводить к возникновению дополнительных напряжений, что негативно скажется на точности измерений. Однако, в работе [49] был предложен способ фотостимулированной релаксации внутренних механических напряжений, который заключается в миллисекундном лазерном отжиге структуры КНС, что приводит в последствии к уменьшению дефектности эпитаксиальной пленки кремния. Вопрос пайки ЧЭ подробно рассмотрен в работе [72-74]. Проведённые исследования показали, что соединительный слой рис. 1.23,1.24. между

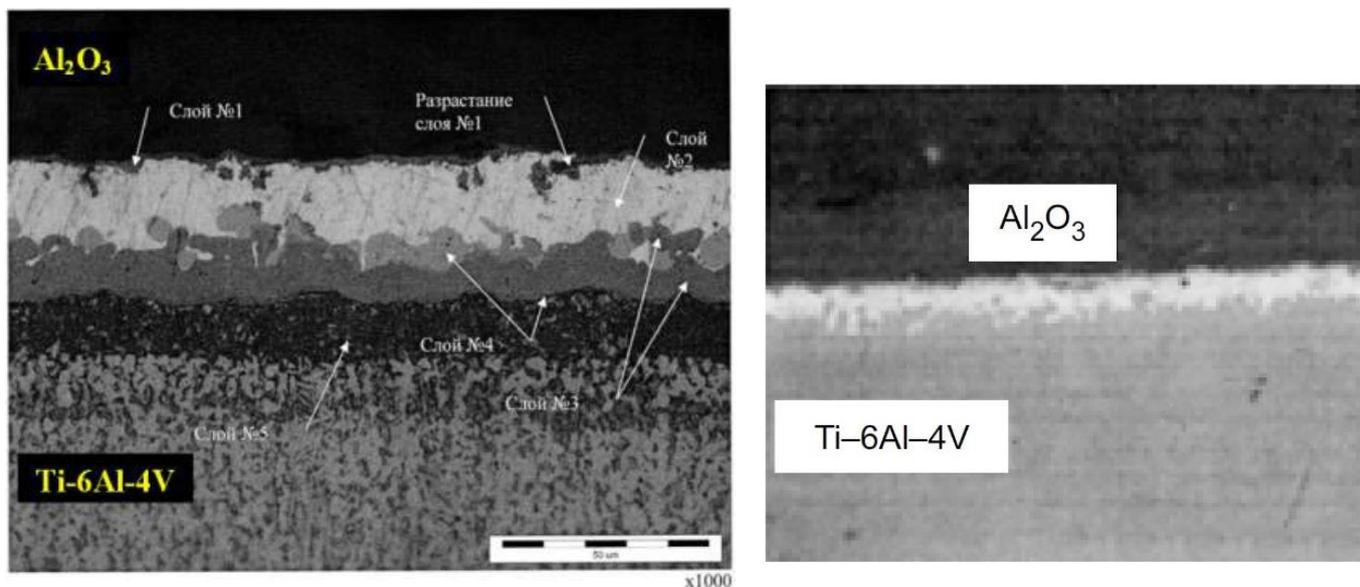


Рис.1.23. Оптическое изображение переходного слоя

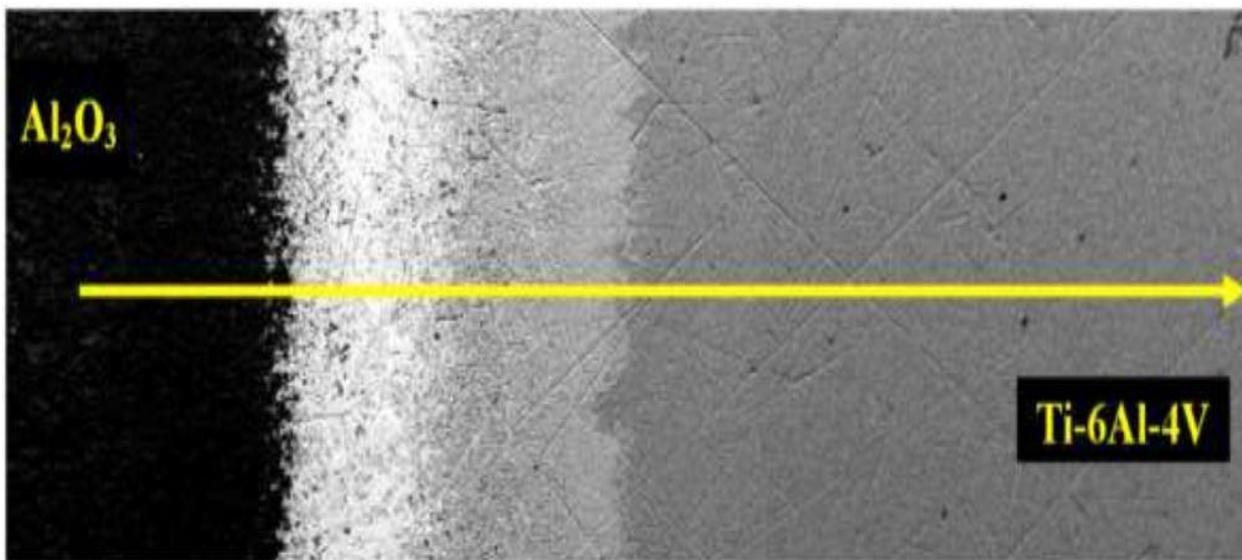


Рис.1.24. Электронно-микроскопическое изображение косо́го шлифа, с указанием пути сканирования

титановой мембраной и сапфировой подложкой ПЧЭ в тензопреобразователях давления на основе структур КНС, полученных стандартной пайкой припоем ПСр 72, сильно неоднороден по составу и механическим характеристикам: составляющие припоя серебро и медь

разделяются и перемещаются соответственно серебро к сапфиру, а медь к титану рис. 1.25, 1.26..

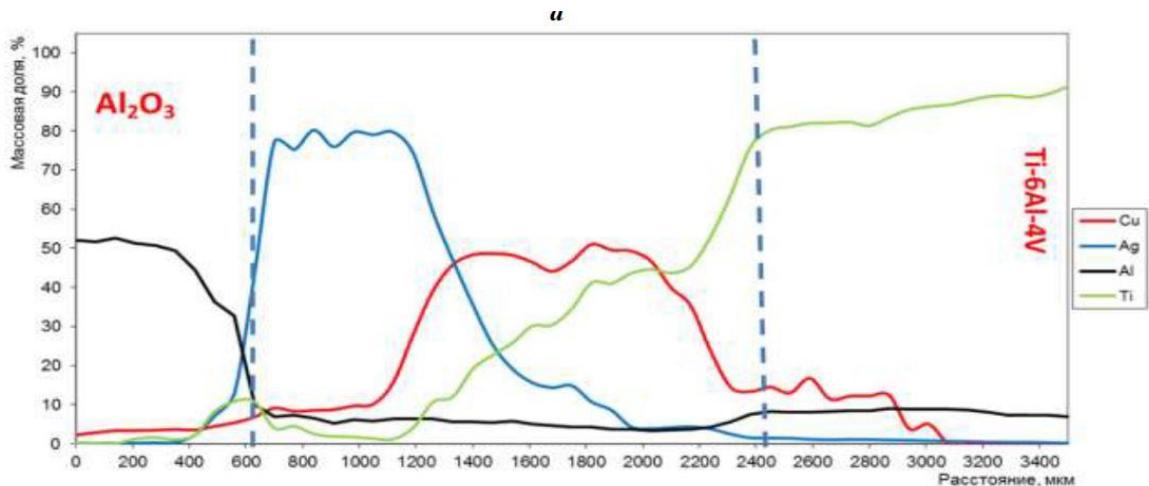


Рис.1.25. Распределение веществ в переходном слое

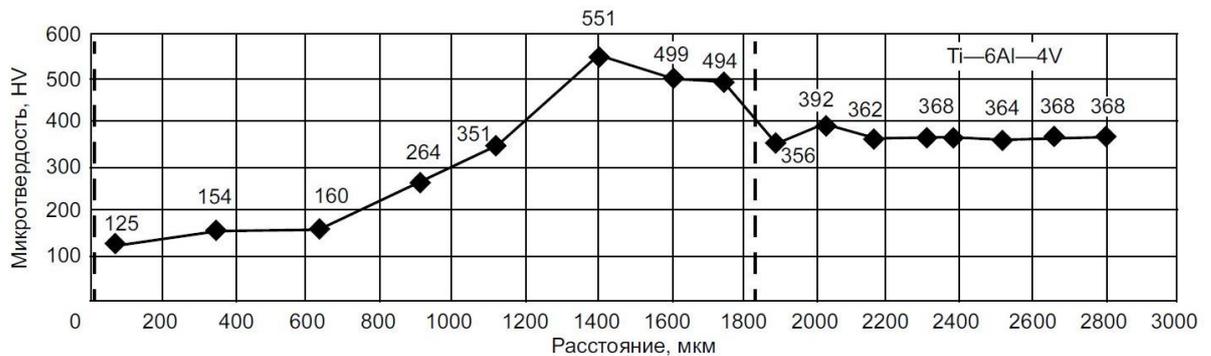


Рис.1.26. Результаты экспериментального исследования микротвёрдости соединительного слоя

В результате вблизи сапфира образуется мягкий слой, который может пластически деформироваться, оказывая отрицательное влияние на характеристики ТП. Показано также, что аморфный припой СТЕМЕТ 1410 с успехом может заменить ПСр 72 при производстве ТП на основе КНС с титановыми мембранами, образуя однородный по толщине соединительный слой с высокой твёрдостью. На практике, определить толщину слоя припоя практически невозможно.

Вопрос гистерезиса представляет отдельную задачу. С одной стороны, в ТП на КНС имеется металлическая мембрана и несовершенства кристаллической решетки являются одной из причин гистерезиса. С другой стороны, имеется температурный гистерезис, который можно охарактеризовать разностью значений выходного сигнала при одной и той же температуре после воздействия повышенной и пониженной температуры. В научных исследованиях ПГ МИДА были экспериментально исследованы ПЧЭ на КНС в режиме различных циклических температурных воздействий. Авторы пришли к выводу, что температурный гистерезис сильно зависит от толщины подложки ПЧЭ рис.1.27, а одной из причин является нарушение поверхностного слоя сапфира при шлифовке.

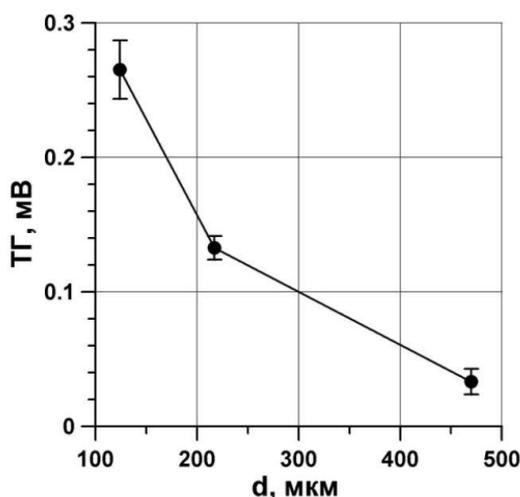


Рис.1.27. Зависимость ТГ ПЧЭ от толщины сапфировой подложки

Вопрос настройки датчиков представляет особую область. На сегодняшний день на производстве имеется ряд программных продуктов, позволяющих подбирать балансирующее сопротивление и сопротивление шунта для компенсации температурной погрешности.

В наиболее распространенном исполнении тензорезистивной мостовой схемы полупроводниковых чувствительных элементов в смежных плечах находятся радиальные и тангенциальные тензорезисторы, ориентированные по кристаллографическим направлениям $\langle 110 \rangle$ кремния и расположенные вблизи края мембраны. Для такой тензосхемы с одинаковыми начальными

значениями сопротивлений радиальных R_r и тангенциальных R_t тензорезисторов ($R_r=R_t=R$) изменение выходного сигнала $U_{вых}$ под действием давления при питании моста постоянным напряжением $U_{пит}$ равно:

$$\Delta U_{вых} = U_{пит} \frac{(\Delta R_t - \Delta R_r)}{(2R + \Delta R_t + \Delta R_r)} \approx U_{пит} \frac{(\Delta R_t - \Delta R_r)}{2R}, \quad (1.11)$$

где ΔR_t – изменение сопротивления тангенциальных тензорезисторов, ΔR_r – изменение сопротивления радиальных тензорезисторов под действием давления.

Из соотношения (1) следует, что при фиксированном напряжении питания для получения максимального изменения выходного сигнала тензодатчика необходимо, чтобы разность относительных изменений сопротивлений тензорезисторов, находящихся в смежных плечах мостовой схемы, была максимальной:

$$\frac{\Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_r}{R} \rightarrow \max. \quad (1.12)$$

В работе [41] показано, что относительные изменения сопротивлений $\frac{\Delta R_r}{R}$ и $\frac{\Delta R_t}{R}$ для полупроводниковых кремниевых тензорезисторов зависят от основного коэффициента эластосопротивления m_{44} и описываются выражением:

$$\left| \frac{\Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_r}{R} \right| \approx m_{44} |\varepsilon_t - \varepsilon_r| = m_{44} |\Delta \varepsilon|. \quad (1.13)$$

Используя данные работы [40], примем значение коэффициента $m_{44}=62$. Подставляя выражение (3) в (1), получаем зависимость между выходным сигналом и деформацией упругого элемента:

$$\frac{\Delta U_{вых}}{U_{пит}} = \frac{1}{2} m_{44} |\Delta \varepsilon|. \quad (1.14)$$

1.3. Выводы по первой главе

1. На сегодняшний день в существующих работах отсутствует анализ взаимосвязи конструкторских параметров (геометрические размеры мембран, физические свойства материалов) с параметрами качества готового датчика.
2. Оптимизационные расчеты либо отсутствуют, либо носят единичный характер.
3. Единая методика расчета и проектирования упругих элементов полупроводниковых датчиков давления на КНС отсутствует.
4. Большинство проведенных расчетов выполнены в геометрически-линейной постановке.
5. Несмотря на то, что в работе [88] показано сильное влияние анизотропии кремния и сапфира на распределение деформаций на поверхности УЭ, данным явлением на этапе прочностного расчета можно пренебречь в виду сильного разброса характеристик других материалов.
6. В справочной литературе отсутствуют данные о прочностных свойствах припоев (ПСР-72 и др.), что делает затруднительным процесс численного моделирования полупроводникового датчика давления на структуре КНС.

Глава 2. Аналитические методы расчета упругого элемента мембранного типа полупроводникового датчика давления на КНС

Упругий элемент полупроводникового датчика на КНС чаще всего выполняется в виде мембраны, рис.2.1.

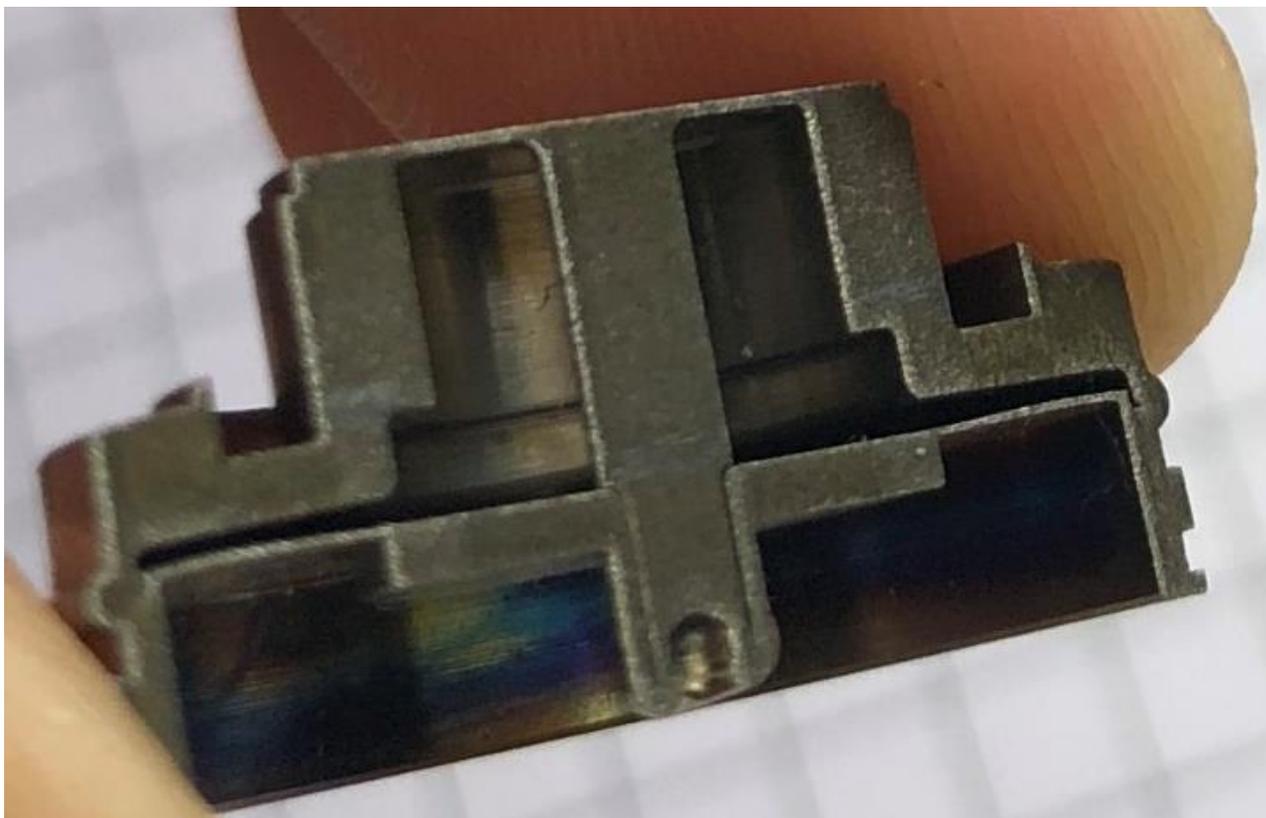


Рис.2.1. Двухмембранный УЭ полупроводникового датчика давления на КНС

В приборостроительной промышленности мембраной называют любую тонкую пластинку, способную значительно деформироваться под нагрузкой, независимо от того, работает ли она на изгиб или на растяжение. В связи с этим для аналитического расчета УЭ на КНС могут быть использованы формулы, выведенные для тонких пластин.

Для упрощения расчетов можно допустить, что рассчитываемый датчик является осесимметричным. Тогда становится возможным применение формул для расчета осесимметричных пластин. Осесимметричными или просто симметричными пластинами называются такие, срединная поверхность которых представляет собой поверхность вращения. Считается,

что нагрузка, действующая на такую пластину, также обладает свойствами осевой симметрии. Для таких пластин задача расчета значительно упрощается. Получается это потому, что все внутренние силы для такой пластины по дуге круга не изменяются и зависят только от текущего радиуса или длины дуги, измеренной вдоль образующей тела вращения. Для несимметричных пластин распределение напряжений определять значительно сложнее. К схеме осесимметричной пластины сводится расчет плоских днищ баков, стенок резервуаров, упругих элементов датчиков давления и т.д.

Рассмотрим плоскую мембрану, закрепленную по контуру и нагруженную давлением рис.2.2. Величина прогиба ключевым образом влияет на характер деформации мембраны. При малых прогибах в мембране возникают в основном изгибные деформации. При этом можно считать, что мембрана имеет линейную характеристику ввиду того, что срединная плоскость мембраны практически не удлиняется. Поэтому для расчета мембраны в области малых перемещений можно применять линейную теорию изгиба круглых пластинок.

При дальнейшем росте нагрузки прогиб мембраны и её толщина становятся соизмеримыми. Срединная плоскость мембраны значительно удлиняется. Это приводит к появлению растягивающих напряжений σ_r в срединной плоскости, сопоставимых с изгибными напряжениями σ_{θ} . Нагрузка при этом увеличивается быстрее, чем прогиб мембраны, а характеристика становится затухающей.

Для расчета мембраны в области больших перемещений следует применять нелинейную теорию, которая учитывает и изгиб, и растяжение мембраны в срединной поверхности.

Последующее увеличение прогиба возникает преимущественно из-за растяжения мембраны. В этих условиях расчет может быть осуществлён по теории абсолютно гибкой мембраны.

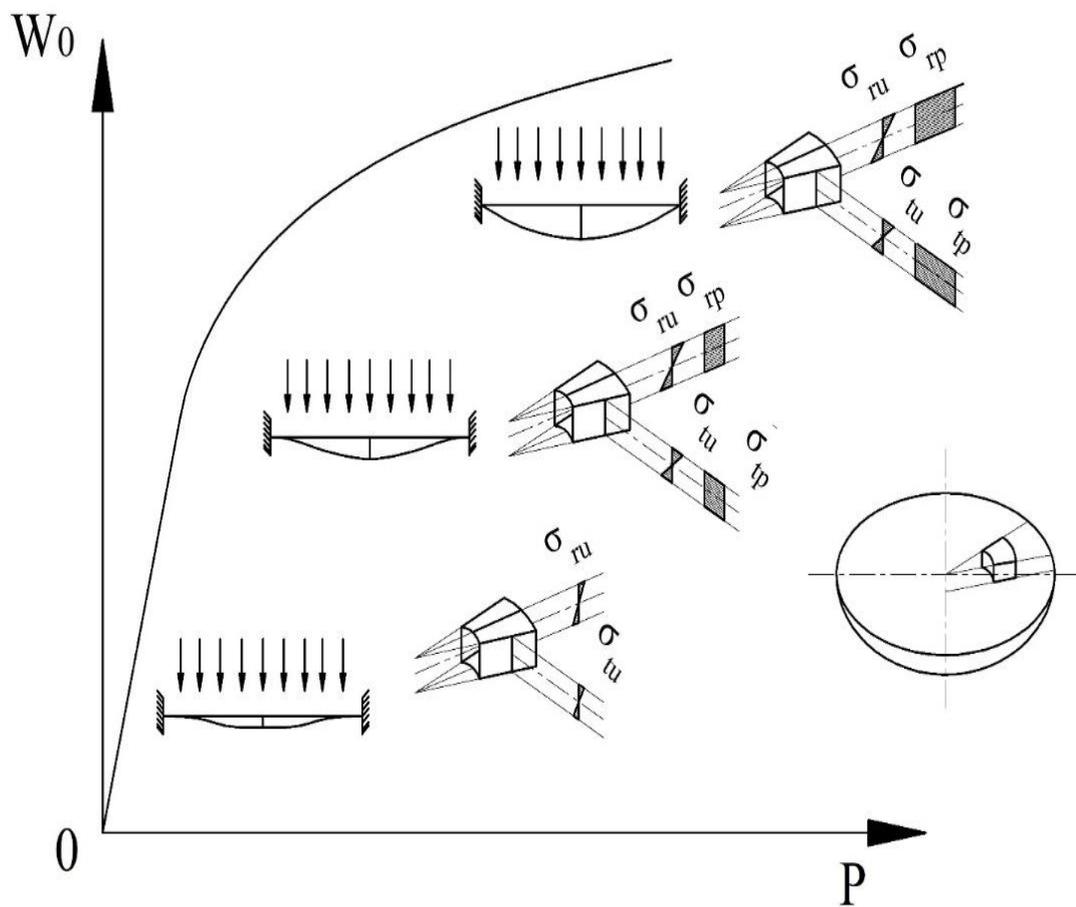


Рис.2.2. Характеристика плоской мембраны и возникающие в ней напряжения [2]

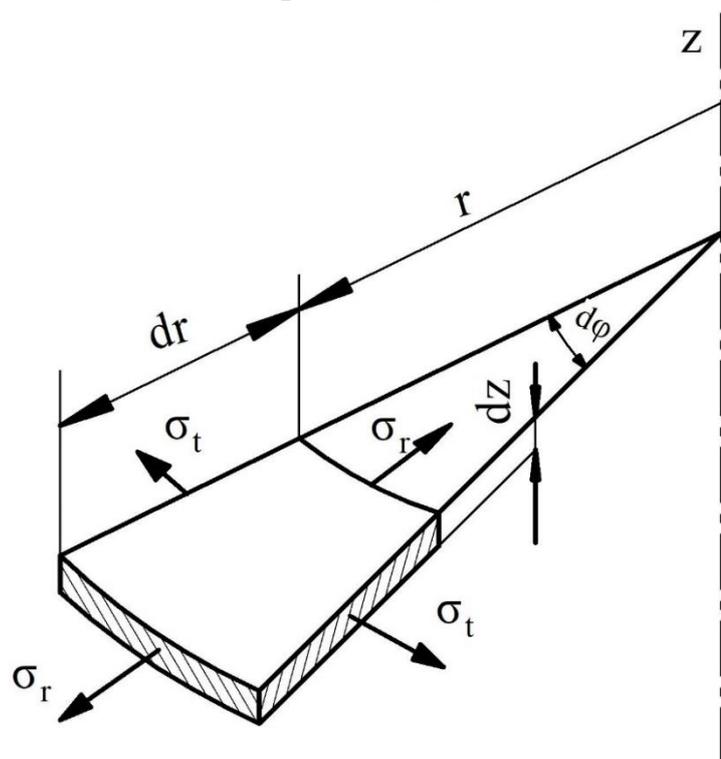


Рис.2.2а. Напряжения в элементе пластинки [2]

2.1. Расчет УЭ ТП на КНС по линейной теории изгиба пластин

Если рассмотреть поверхность УЭ, на которой в последствии закрепляется ЧЭ, рис.2.1, то в качестве расчетной схемы можно выбрать или схему плоской мембраны радиуса $R = 5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм жестко защемлённой по радиусу, рис.2.3, или, что более соответствует реальности, схему плоской мембраной с жестким центром $r_0=2$ мм, рабочим радиусом $R=5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм, также защемлённой по радиусу, рис.2.7.

2.1.1. Расчет УЭ ТП на КНС по линейной теории изгиба круглой пластинки, защемлённой по контуру

Для аналитического расчета НДС УЭ датчиков давления на КНС могут быть использованы выражения, полученные в теории изгиба круглых пластинок.

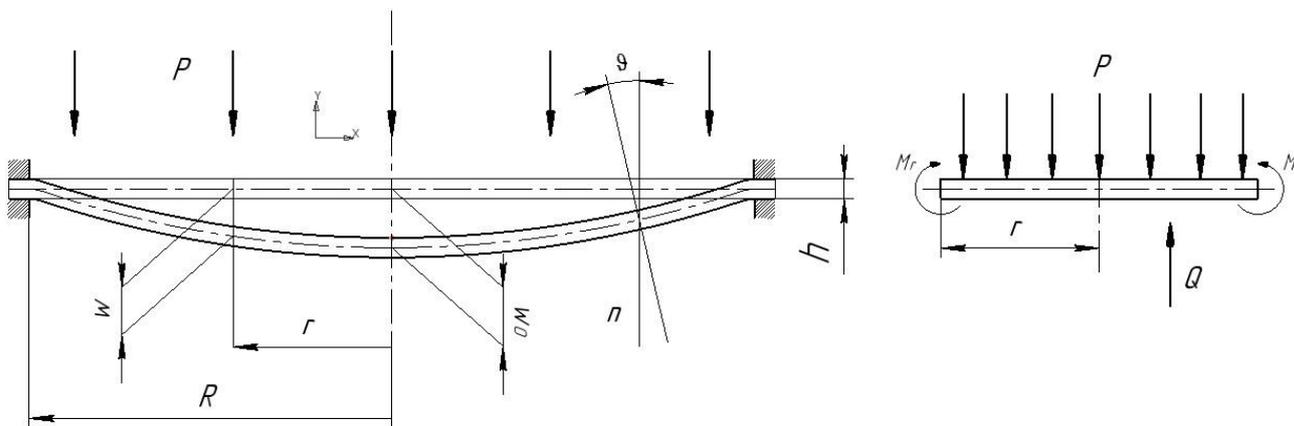


Рис.2.3. Расчетная схема плоской мембраны в области малых перемещений

Для плоской мембраны на рис. зависимость прогиба центра от давления определяется соотношением:

$$w_0 = \frac{pR^4}{64D}, \quad (2.1)$$

где D – цилиндрическая жесткость, которая определяется выражением:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.2)$$

Данные соотношения получены путем интегрирования дифференциального уравнения равновесия круглой пластинки при изгибе:

$$\vartheta'' + \frac{\vartheta'}{r} - \frac{\vartheta}{r^2} = \frac{Q_r}{D}, \quad (2.3)$$

где Q_r – поперечная сила.

Для упрощения расчетов полупроводниковых датчиков давления на КНС на практике часто используют величину прогиба жесткого центра мембраны как показатель величины выходного сигнала. Однако для уточненного прочностного расчета и определения наилучшего места для расположения тензорезистора необходимо знать значение деформаций и напряжений на поверхности УЭ. Изгибные напряжения на поверхности плоской мембраны в радиальном σ_r и тангенциальном σ_t направлениях описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3pR^2}{8h^2} \left[(3 + \mu) \frac{r^2}{R^2} - (1 + \mu) \right] \\ \sigma_t &= \frac{3pR^2}{8h^2} \left[(3\mu + 1) \frac{r^2}{R^2} - (1 + \mu) \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Значение радиальной ε_r и тангенциальной ε_t деформаций на поверхности круглой пластинки могут быть рассчитаны по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu\sigma_t) \\ \varepsilon_t &= \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu\sigma_r) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Данные соотношения применимы в случае работы мембраны в области малых перемещений, когда перемещение мембраны возникает в основном за счет изгибных деформаций. Срединная плоскость практически не удлиняется и можно считать, что мембрана имеет линейную характеристику.

Графики изгибных напряжений для плоской мембраны радиуса $R=5,7$ мм, толщины $h=0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$, нагруженной давлением $P=0,2$ МПа приведены на рис.

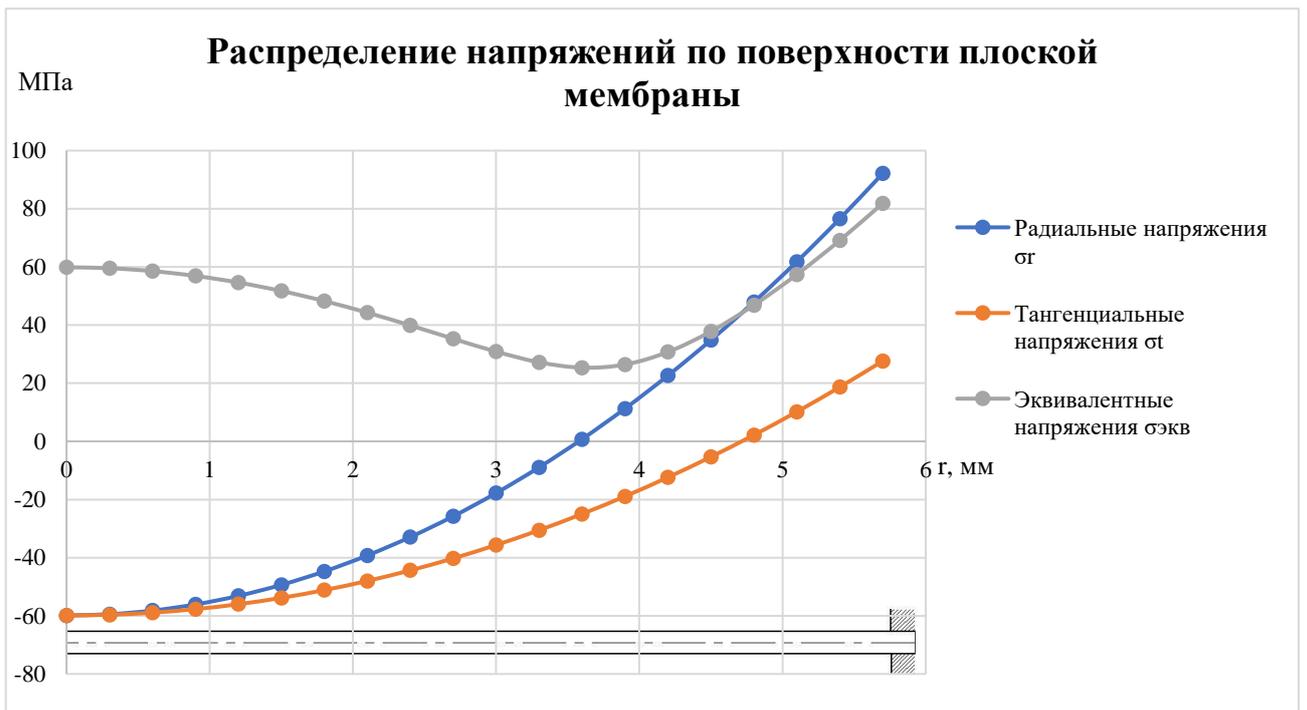


Рис.2.4. Распределение напряжений по поверхности плоской мембраны
Эпюры радиальной и тангенциальной деформации и их разности приведены на рис. 2.5.

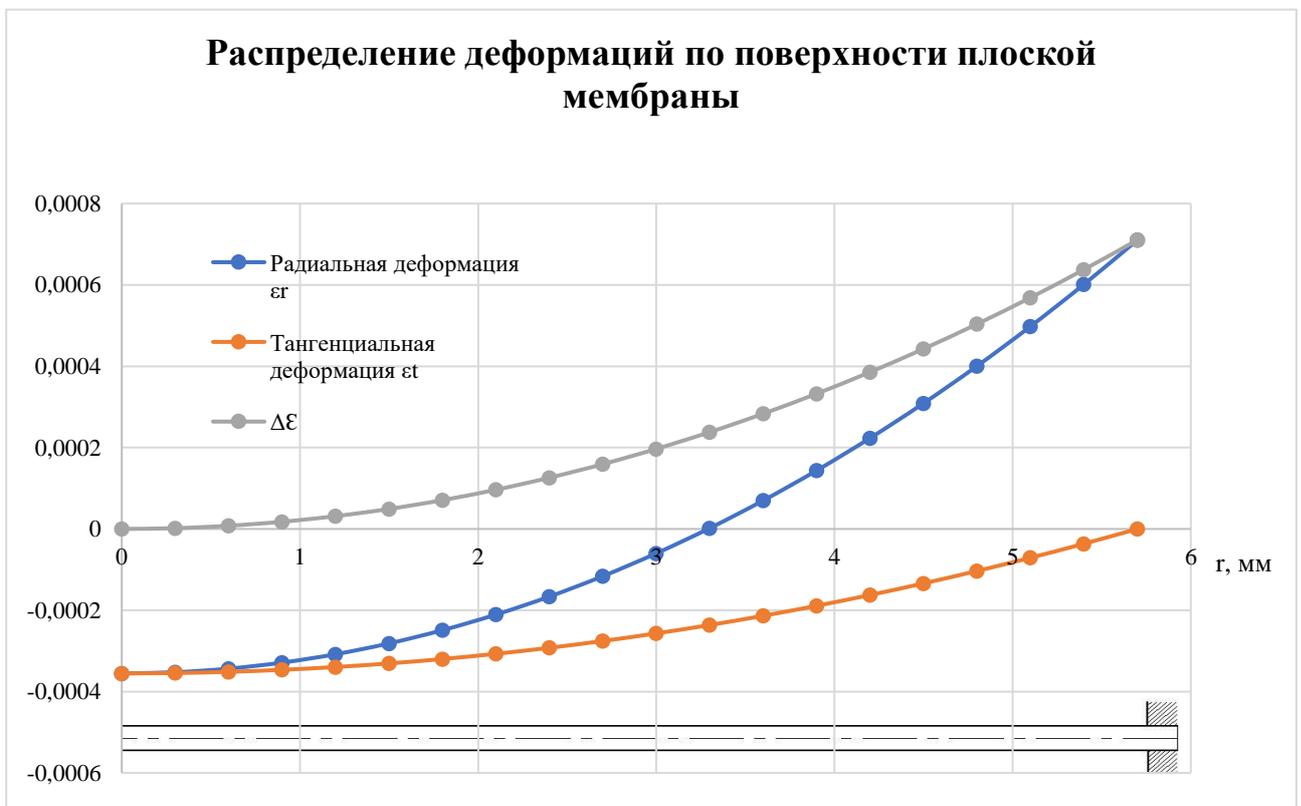


Рис.2.5. Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны

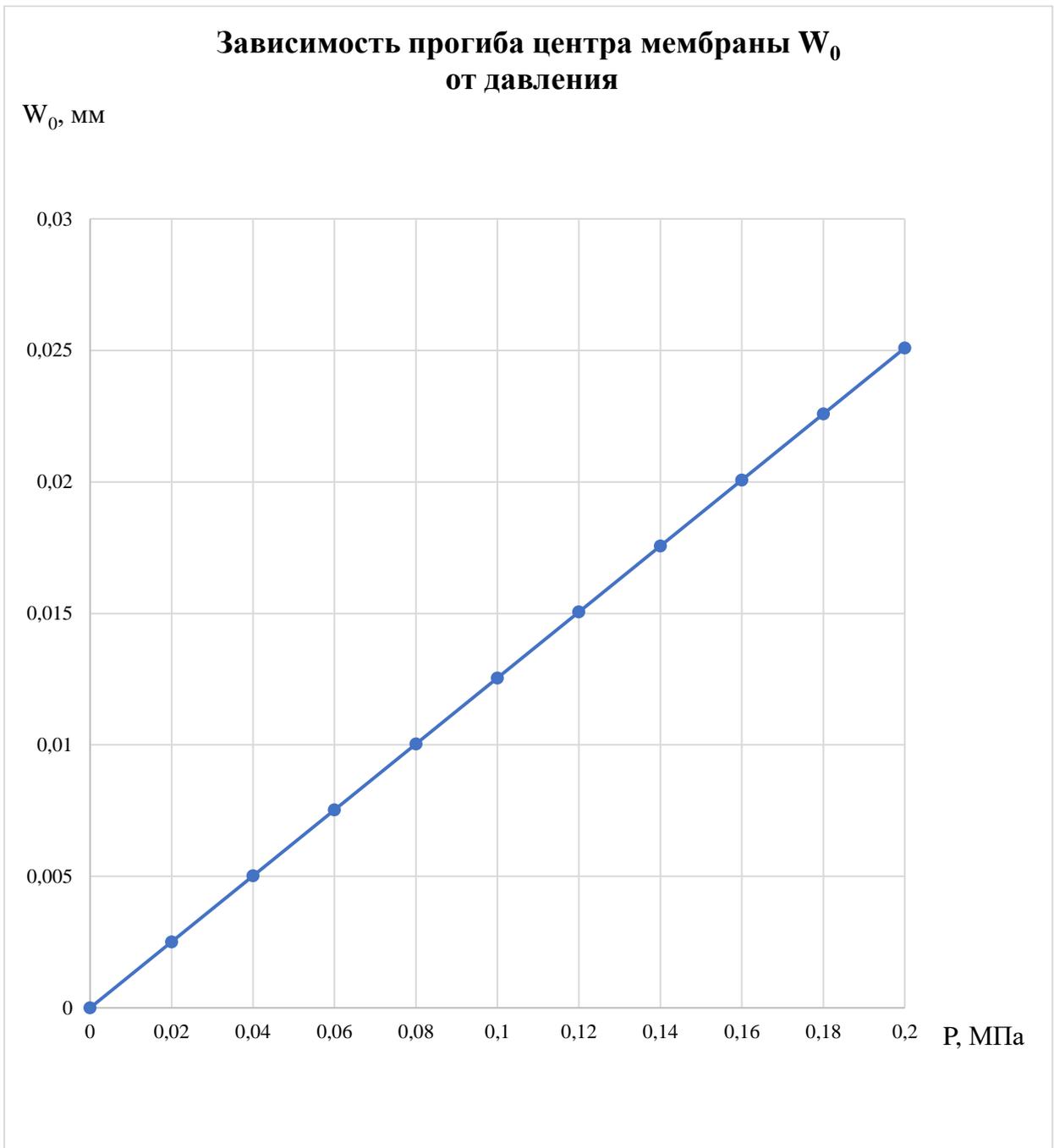


Рис.2.6. Зависимость прогиба центра мембраны от давления

Расчет показал, что применение линейной теории изгиба ограничивает возможности определения прогиба рассматриваемой круглой пластинки. Так при действии давления $P=0,2$ МПа перемещение центра составляет $0,025$ мм. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению прогиба и противоречит начальному допущению о том, что прогиб во много раз меньше толщины.

2.1.2. Плоская мембрана с жестким центром в области малых перемещений

Более точно изгибу ЧЭ полупроводникового датчика давления на КНС соответствует расчетная схема плоской мембраны с жестким центром, рис.2.7.

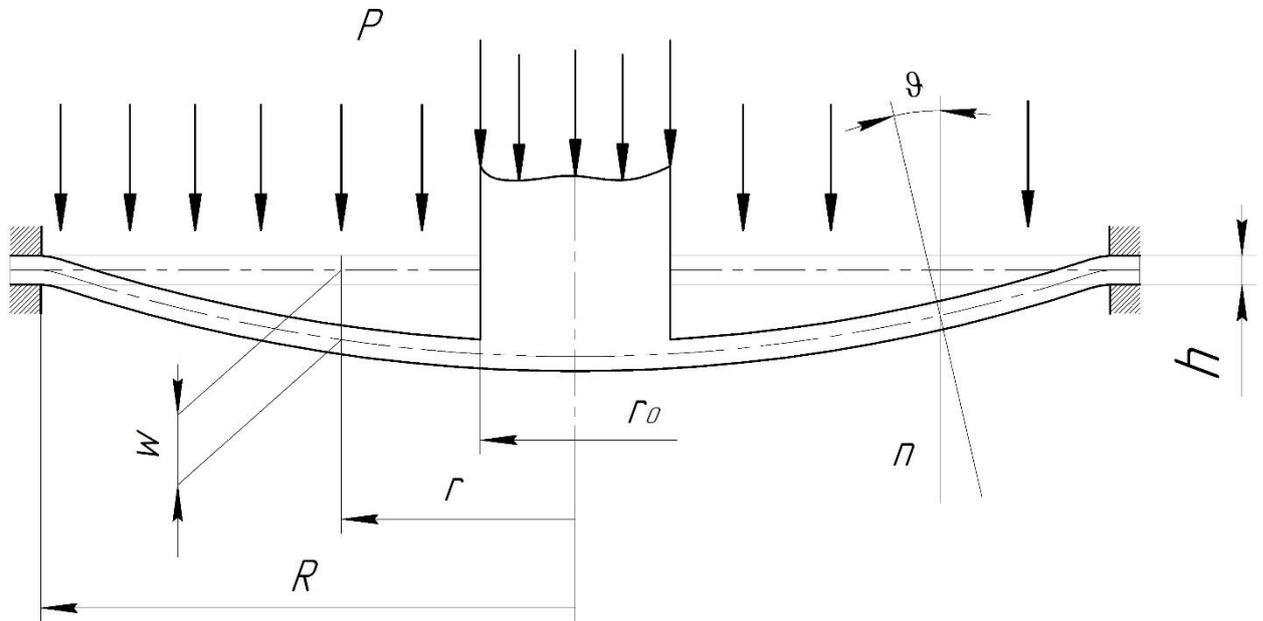


Рис.2.7. Расчетная схема плоской мембраны с жестким центром в области малых перемещений

Хочется отметить, что в литературе в явном виде нет выражений, описывающих распределение изгибных напряжений в радиальном σ_r и тангенциальном σ_t направлениях.

Вывод данных уравнений произведем с помощью уравнения для угла поворота нормали к срединной поверхности:

$$\vartheta = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{pr^3}{16D} \quad (2.6)$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий: при $r=R$, $\vartheta = 0$ и при $r=r_0$ $\vartheta = 0$. Тогда:

$$C_1 = -\frac{P}{16D} (r_0^2 + R^2) \quad (2.7)$$

$$C_2 = \frac{P}{16D} \frac{r_0^2 R^2 (r_0^2 + R^2)}{R^2 - r_0^2}$$

Выражения для напряжений в радиальном σ_r и тангенциальном σ_t направлениях в общем виде имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\vartheta' + \mu \frac{\vartheta}{r} \right) \\ \sigma_t &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\vartheta}{r} + \mu \vartheta' \right)\end{aligned}\tag{2.8}$$

Подставляя уравнение для угла поворота нормали и его производную в уравнения для напряжений, получим:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left[C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3Pr^2}{16D} + \mu \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{pr^2}{16D} \right) \right] \\ \sigma_t &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left[C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{pr^2}{16D} + \mu \left(C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3Pr^2}{16D} \right) \right]\end{aligned}\tag{2.9}$$

Значение радиальной ε_r и тангенциальной ε_t деформаций на поверхности круглой пластинки могут быть рассчитаны по формулам, используемым для случая пластинки без жесткого центра.

Расчет прогиба мембраны может быть оценен аналитически по выражению:

$$w_0 = A_p \frac{pR^4}{Eh^3},\tag{2.10}$$

где w_0 – прогиб жесткого центра, p - давление, R – рабочий радиус мембраны, E – модуль Юнга, h – толщина мембраны, A_p – коэффициент, учитывающий отношение рабочего радиуса R к радиусу жесткого центра r_0 . Коэффициент A_p определяется соотношением (2):

$$A_p = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4},\tag{2.11}$$

где $c = \frac{R}{r_0}$, μ - коэффициент Пуассона.

Максимальные радиальные напряжения σ_r и окружные напряжения σ_t на поверхности плоской мембраны с жестким центром находятся у заделки и описываются выражениями:

$$\sigma_r = B_p \frac{Ehw_0}{R^2}, \quad (2.12)$$

где

$$B_p = \frac{4}{1-\mu^2} \frac{c^2(c^2-1)}{c^4-1-4c^2 \ln c} \quad (2.13)$$

Графики изгибных напряжений для плоской мембраны с жестким центром $r_0=2$ мм, рабочим радиусом $R=5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$ приведены на рис.2.8.

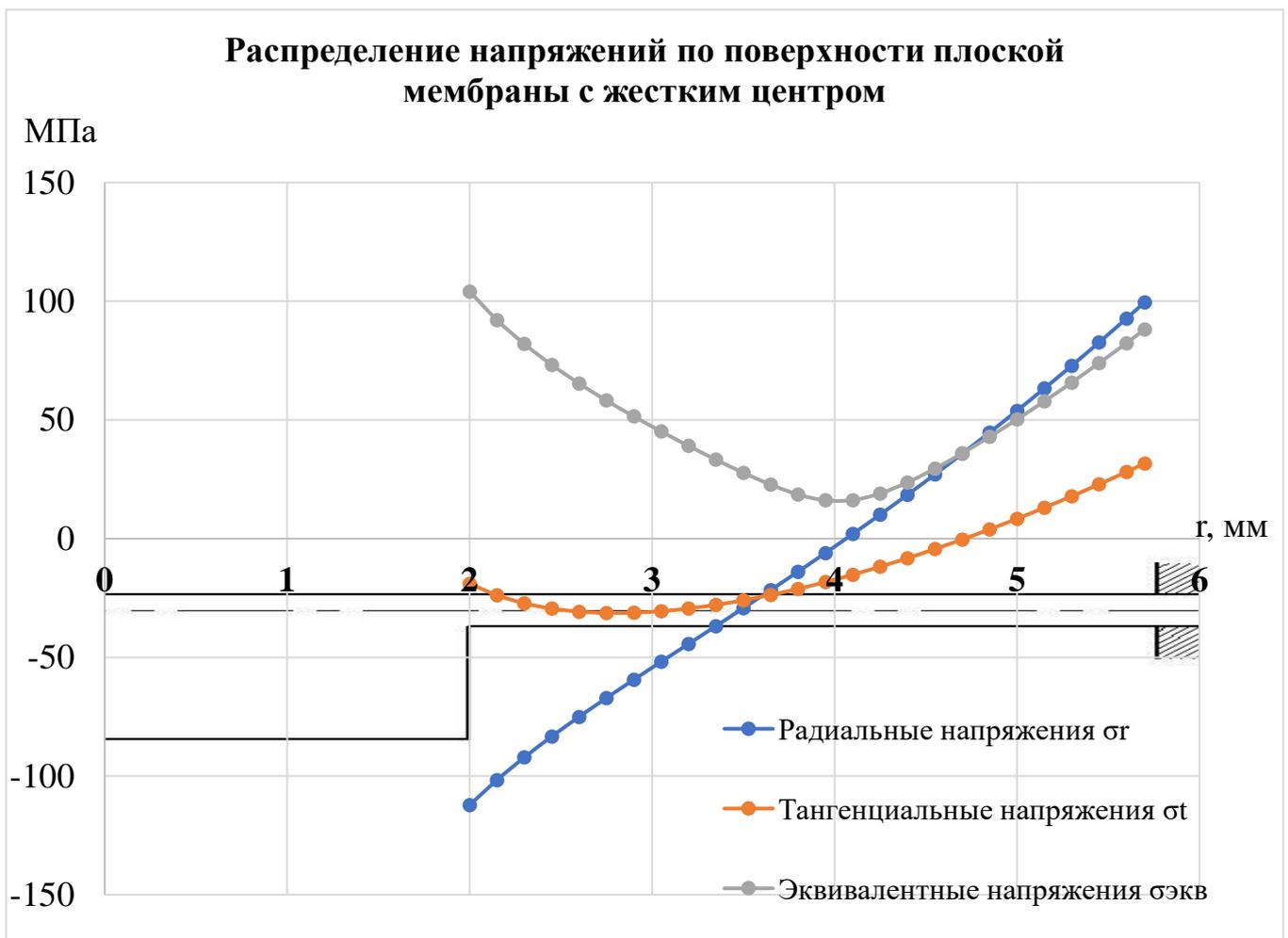


Рис.2.8. Распределение напряжений по поверхности плоской мембраны с жестким центром

Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны с жестким центром

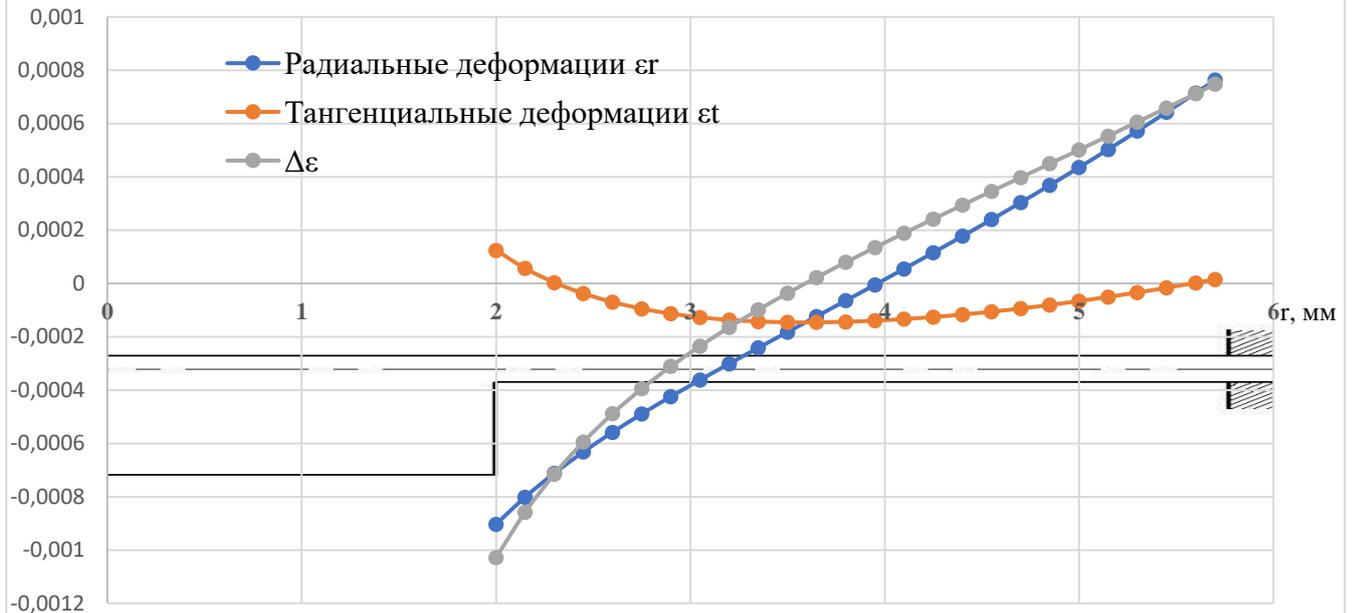


Рис.2.9. Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны с жестким центром

Зависимость прогиба W_0 центра плоской мембраны с жестким центром от давления

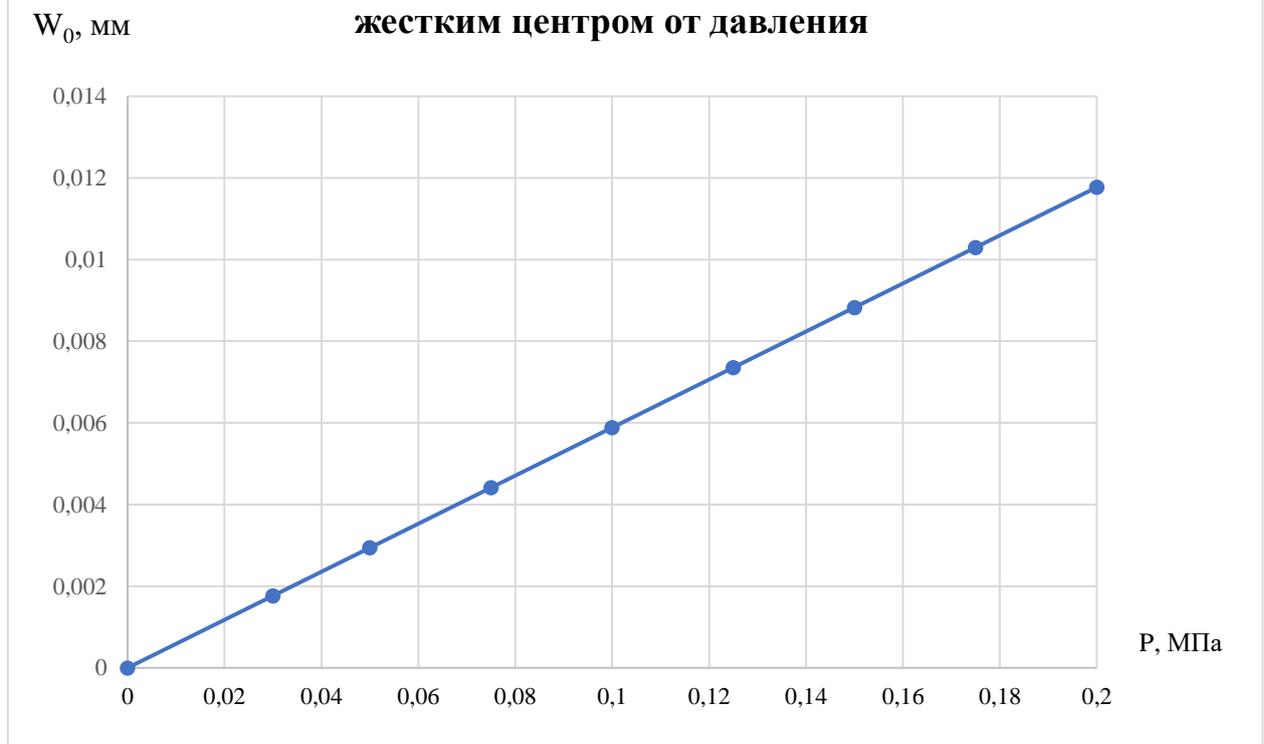


Рис.2.10. Зависимость прогиба центра плоской мембраны с жестким центром от давления

Расчет мембраны в области малых перемещений ограничивает возможности расчета мембраны, т.к. получается, что при большом запасе прочности по эквивалентному напряжению центр мембраны получает перемещение, соизмеримое с толщиной, что противоречит допущению о малости перемещений и не позволяет проводить дальнейший расчет, используя данные выражения.

2.2.1. Расчет плоской мембраны в области больших перемещений по теории абсолютно гибкой мембраны

Отличия задачи о больших перемещениях плоской мембраны от линейной теории малых перемещений состоят в следующем:

1. для случая малых перемещений применялся принцип сохранения начальных размеров. Для вывода уравнений равновесия был рассмотрен элемент, вырезанный из пластинки в недеформированном состоянии. Принцип сохранения начальных размеров перестаёт действовать в области больших перемещений и в процессе вывода уравнений равновесия необходимо учитывать изменение формы мембраны под нагрузкой.
2. Наряду с моментами M_r и M_t и поперечной силой Q_r , возникающих при малых перемещениях, в мембране при больших прогибах появляются растягивающие силы T_r и T_t , которые необходимо принимать во внимание.
3. При рассмотрении изгиба мембраны в области больших перемещений следует принимать в расчёт радиальное перемещение v и удлинение ε_r срединной поверхности.

Тонкую мембрану, работающую при весьма больших прогибах, можно рассматривать как абсолютно гибкую. В такой мембране напряжения растяжения будут значительно больше изгибных, и при расчете изгибной жесткостью можно пренебречь.

Дифференциальные уравнения плоской мембраны в больших перемещениях имеют вид:

$$\rho\psi'' + \psi' - \frac{\psi}{\rho} = \frac{\vartheta^2}{2} \quad (2.14)$$

$$\rho\vartheta'' + \vartheta' - \frac{\vartheta}{\rho} = \frac{R^2}{D} (-Eh\psi\vartheta + \frac{1}{2}pR\rho^2) \quad (2.15)$$

где $\rho = \frac{r}{R}$ – относительный радиус мембраны, r – текущий, R – рабочий радиус, ϑ – угол поворота нормали в произвольной точке срединной поверхности, ψ – безразмерная функция, связанная с растягивающим усилием T_r выражением:

$$\psi = \frac{-T_r\rho}{Eh} \quad (2.16)$$

Уравнения абсолютно гибкой мембраны можно получить из дифференциальных уравнений плоской мембраны в больших перемещениях, полагая цилиндрическую жесткость $D=0$:

$$\rho\psi'' + \psi' - \frac{\psi}{\rho} = \frac{\vartheta^2}{2} \quad (2.17)$$

$$\psi\vartheta = \frac{pR}{2Eh}\rho^2 \quad (2.18)$$

Решая данные уравнения методом Бубнова-Галеркина, получаем следующее соотношение:

$$w_0^3 = \frac{pR^4h^33(1-\mu)}{Eh^4(7-\mu)} \quad (2.19)$$

Данное выражение описывает кубическую зависимость прогиба мембраны в случае больших прогибов, когда мембрана работает преимущественно на растяжение, в отличие от случая линейной зависимости при работе мембраны в области малых перемещений.

Радиальное напряжение σ_r и окружное напряжение σ_t для абсолютно гибкой мембраны описываются выражениями:

$$\sigma_r = \frac{Ew_0^2}{4R^2} \left(\frac{3-\mu}{1-\mu} - \rho^2 \right) \quad (2.20)$$

$$\sigma_t = \frac{Ew_0^2}{4R^2} \left(\frac{3-\mu}{1-\mu} - 3\rho^2 \right)$$

Где $\rho = \frac{r}{R}$ относительный радиус мембраны, r – текущий, R – рабочий радиус.

Графики напряжений растяжения для плоской мембраны радиуса $R=5,7$ мм, толщины $h=0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$, нагруженной давлением $P=3$ МПа приведены на рис.

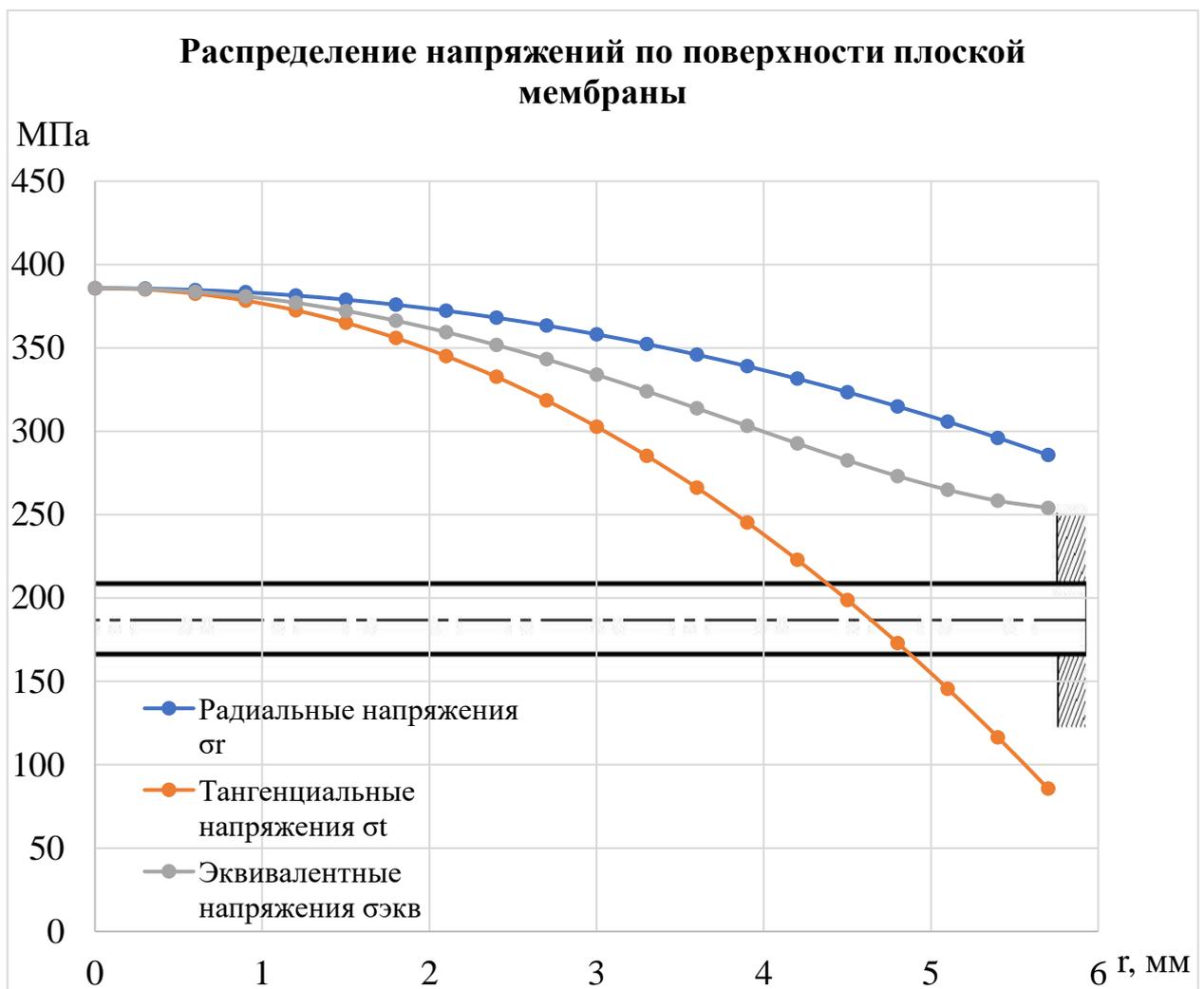


Рис.2.11. Распределение напряжений по поверхности плоской мембраны

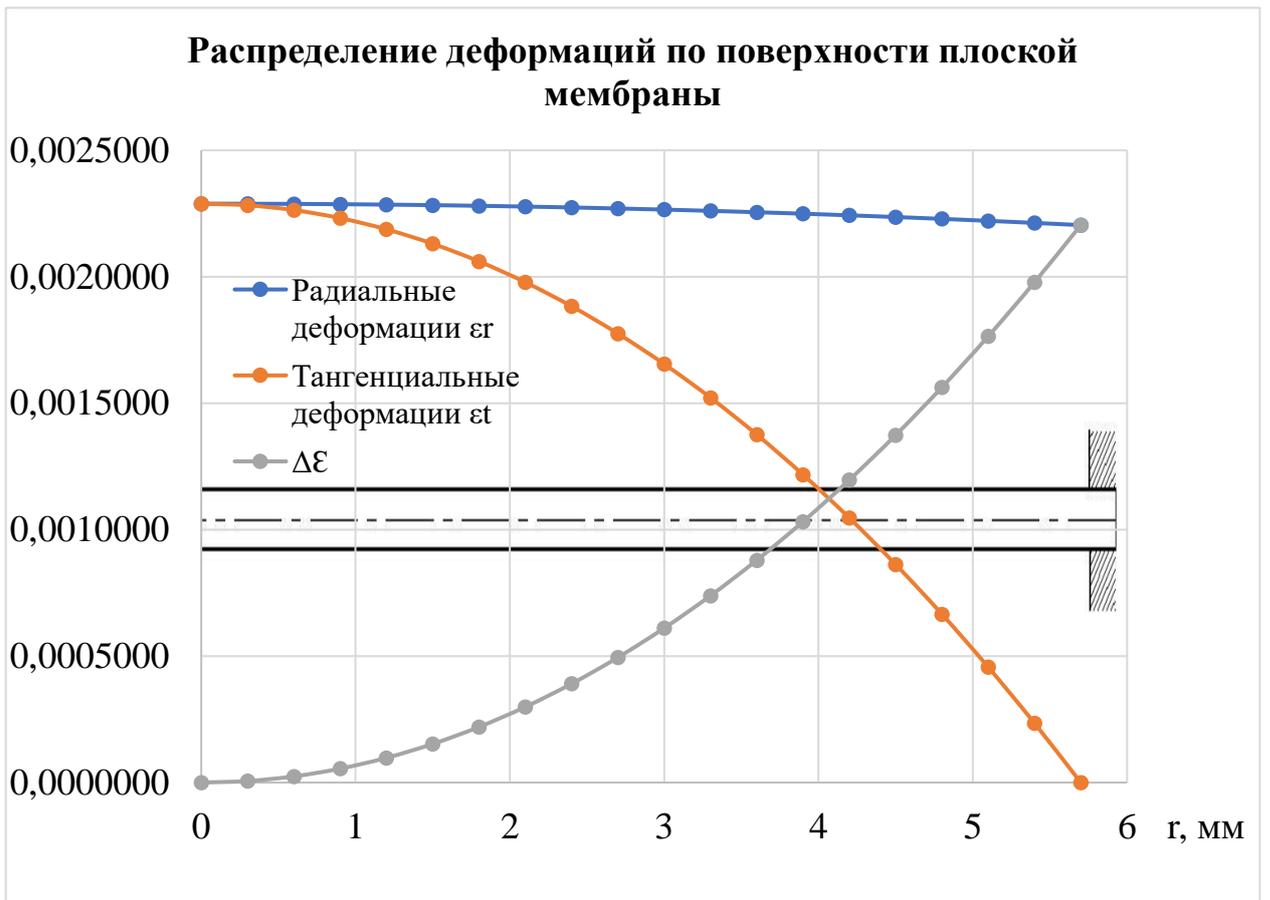


Рис.2.12. Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны

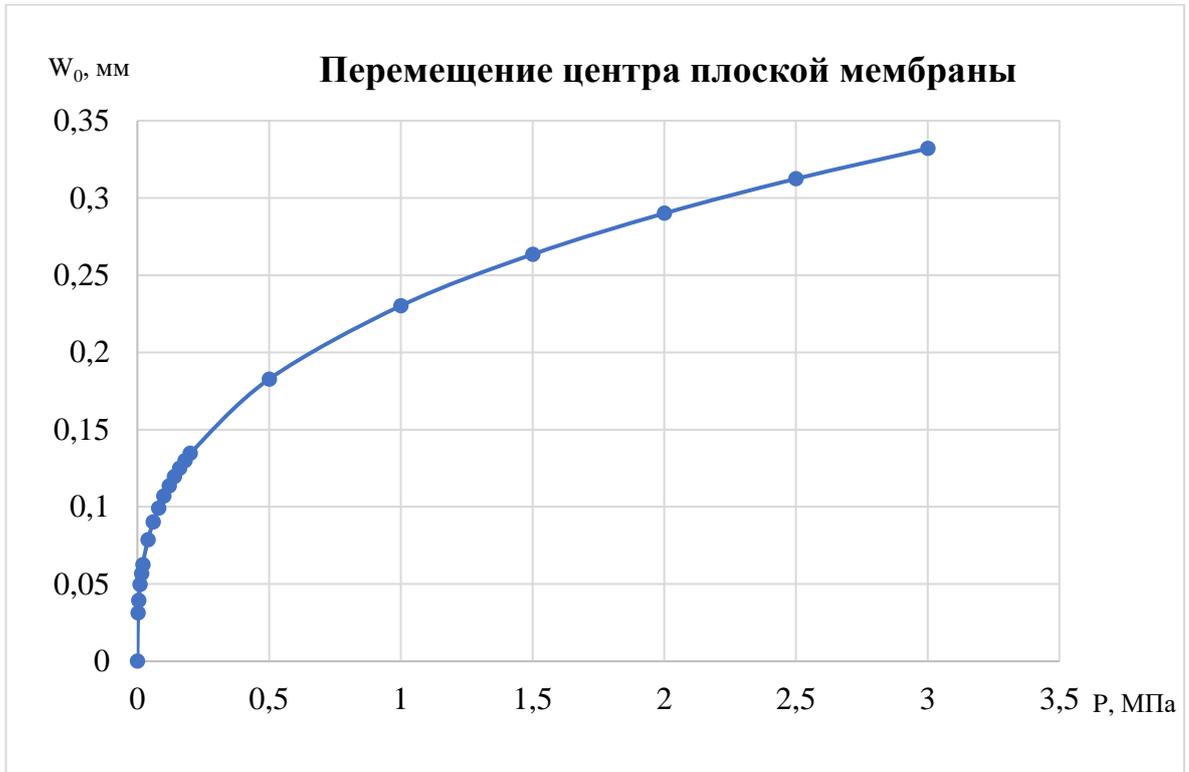


Рис.2.13. Перемещение центра плоской мембраны

2.2.2. Расчет плоской мембраны с жестким центром как абсолютно гибкой мембраны

Для расчета прогиба центра абсолютно гибкой мембраны с жестким центром в области больших перемещений используется следующее соотношение:

$$w_0 = \sqrt[3]{\frac{pR^4h^3}{Eh^4B_p}}, \quad (2.21)$$

где
$$B_p = \frac{\frac{7-\mu}{3}(1+\rho_0^2+\rho_0^4) + \frac{(3-\mu)^2}{1+\mu}\rho_0^2}{(1-\mu)(1-\rho_0^4)(1-\rho_0^2)^2}, \quad (2.22)$$

где
$$\rho_0 = \frac{r_0}{R} \quad (2.23)$$

Значение w_0 может быть подставлено в формулы для напряжений в случае плоской мембраны без жесткого центра. Тогда графики напряжений растяжения для плоской мембраны с жестким центром $r_0=2$ мм, рабочим радиусом $R=5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$ приведены на рис.

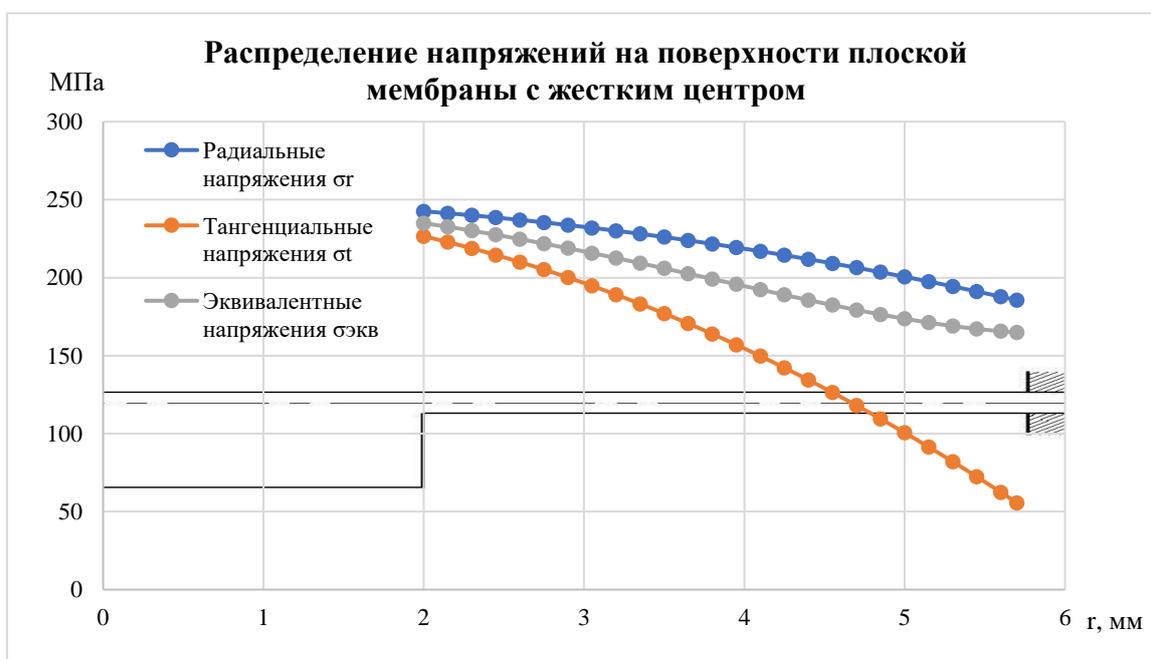


Рис.2.14. Распределение напряжений на поверхности плоской мембраны с жестким центром

Распределение деформаций на поверхности плоской мембраны с жестким центром

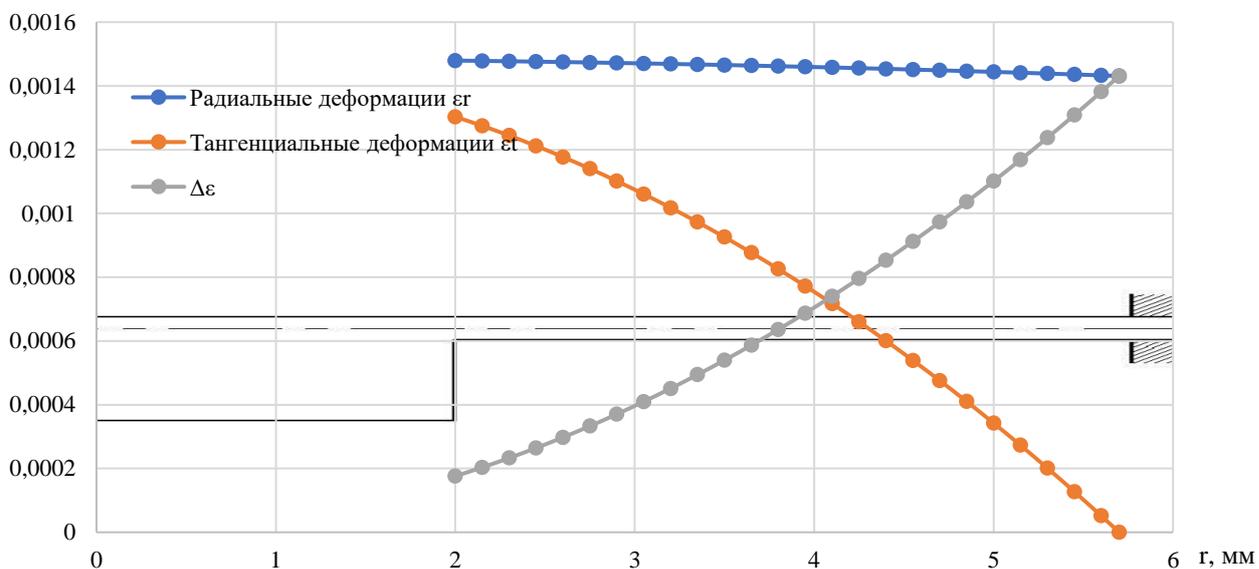


Рис.2.15. Распределение деформаций на поверхности плоской мембраны с жестким центром

Перемещение центра плоской мембраны с жестким центром

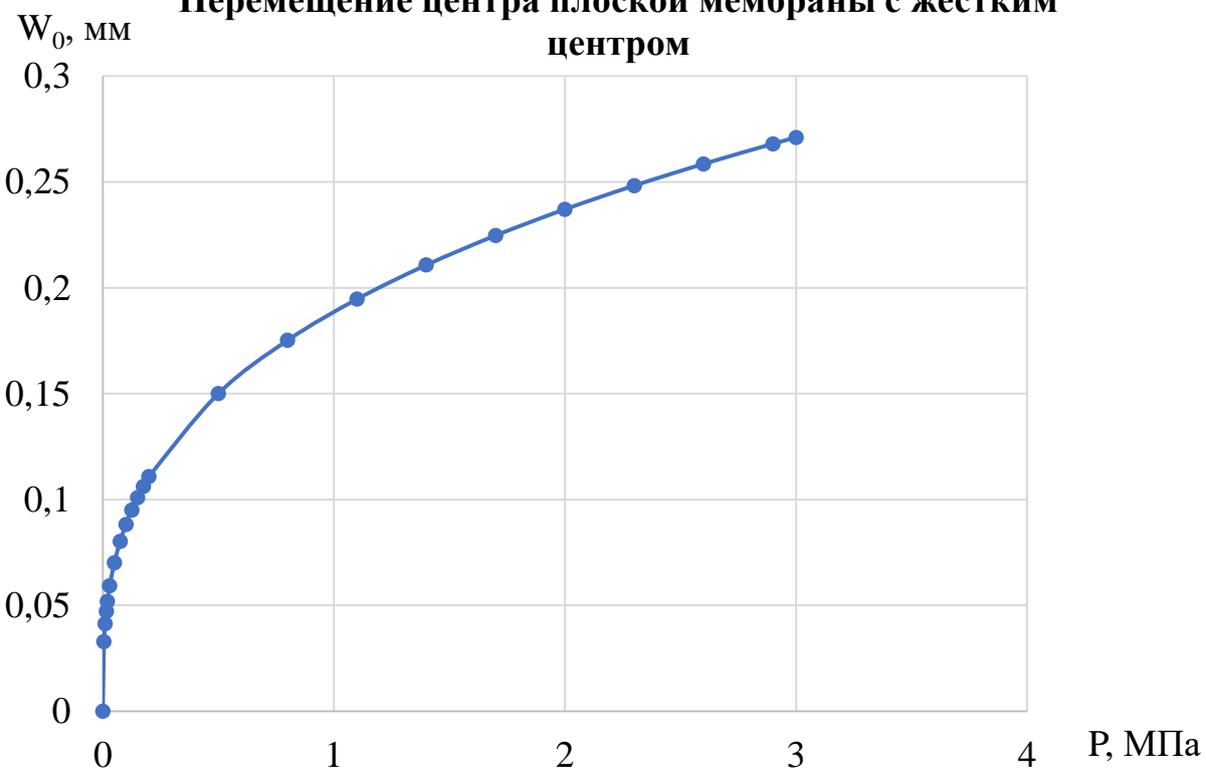


Рис.2.16. Перемещение центра плоской мембраны с жестким центром

2.3. Уточненный расчет плоских мембран при произвольных прогибах

Полное решение задачи о прогибах плоской мембраны может быть выполнено с помощью уравнения:

$$\vartheta = C(\rho^z - \rho) \quad (2.24)$$

Z – параметр, учитывающий изменение формы упругой поверхности с прогибом, C – параметр, определяемый по методу Бубнова-Галеркина. Уравнение упругой поверхности будет иметь вид:

$$w = w_0 \left(\frac{1}{z-1} [2\rho^{z+1} - (z+1)\rho^2] + 1 \right) \quad (2.25)$$

При $z=3$ выражение преобразуется в уравнение упругой поверхности пластинки в малых перемещениях. При $z \rightarrow \infty$ форма упругой поверхности меняется, приближаясь к сферической.

Сравнение характеристик мембраны, полученных по разным теориям приведено на рис. 2.17.

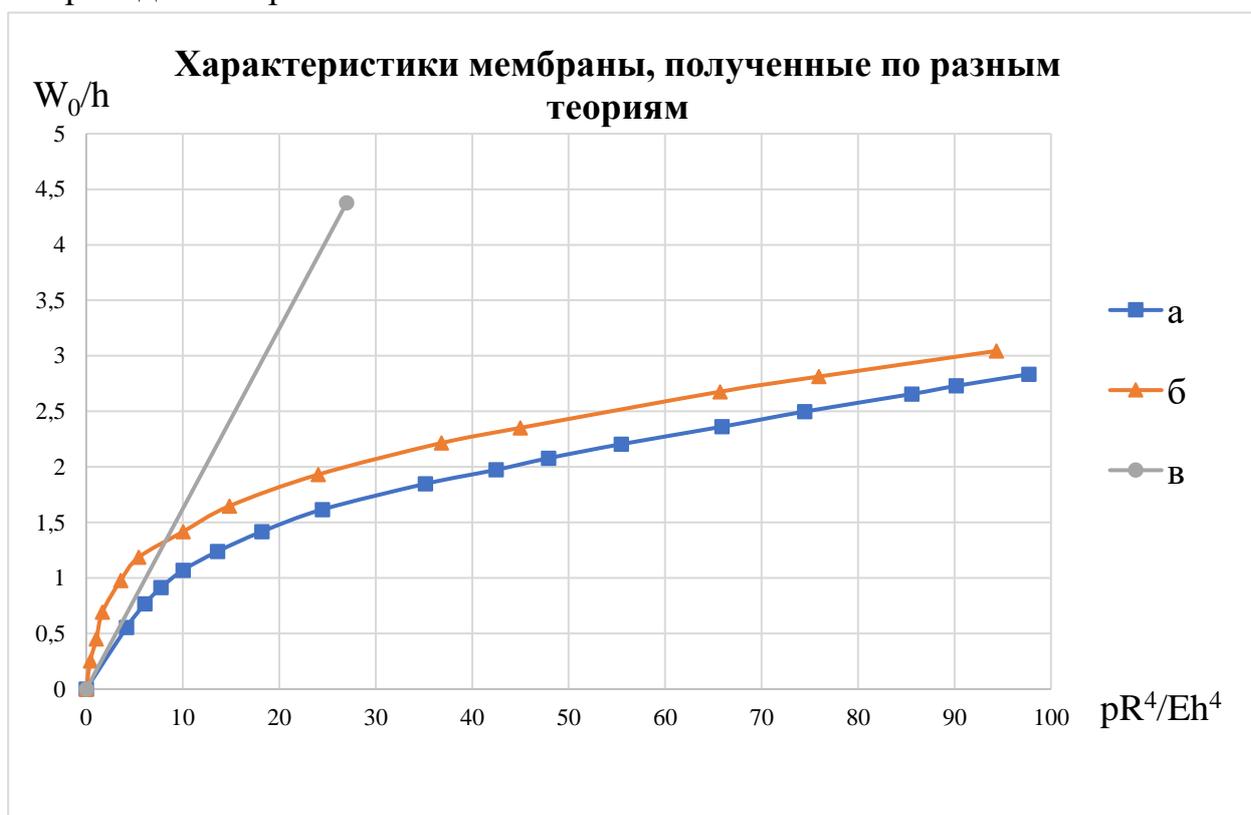


Рис.2.17. Характеристики мембраны, полученные по разным теориям:

а – уточнённая, б – по теории абсолютно гибкой мембраны, в – по линейной теории

Напряжения в мембране можно представить как сумму изгибных напряжений $\sigma_{и}$ и напряжений растяжения срединной поверхности $\sigma_{р}$.

Суммарные напряжения в центре можно определить по формуле:

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{Eh^2}{R^2} \cdot \frac{w_0}{h} \cdot \frac{1+z}{1-\mu} \left\{ \pm \frac{1}{z-1} + \frac{w_0}{h} \cdot \frac{1}{2(z+3)} \left[1 + (1-\mu) \frac{z+6}{2z} \right] \right\} \quad (2.26)$$

Суммарные напряжения на краю можно определить по формуле:

$$\sigma_r = \frac{Eh^2}{R^2} \cdot \frac{w_0}{h} \cdot \frac{1+z}{1-\mu} \cdot \left[\pm \frac{1}{1+\mu} + \frac{w_0}{h} \cdot \frac{1}{2(z+3)} \right] \quad (2.27)$$

$$\sigma_t = \mu \sigma_r \quad (2.28)$$

Из формул видно, что напряжения на краю мембраны больше, чем в центре. Это объясняется тем, что с увеличением прогиба мембраны вблизи контура искривляется сильнее, чем в центре. На рис.2.18, 2.19 построены кривые относительных радиальных напряжений в зависимости от относительного прогиба мембраны.

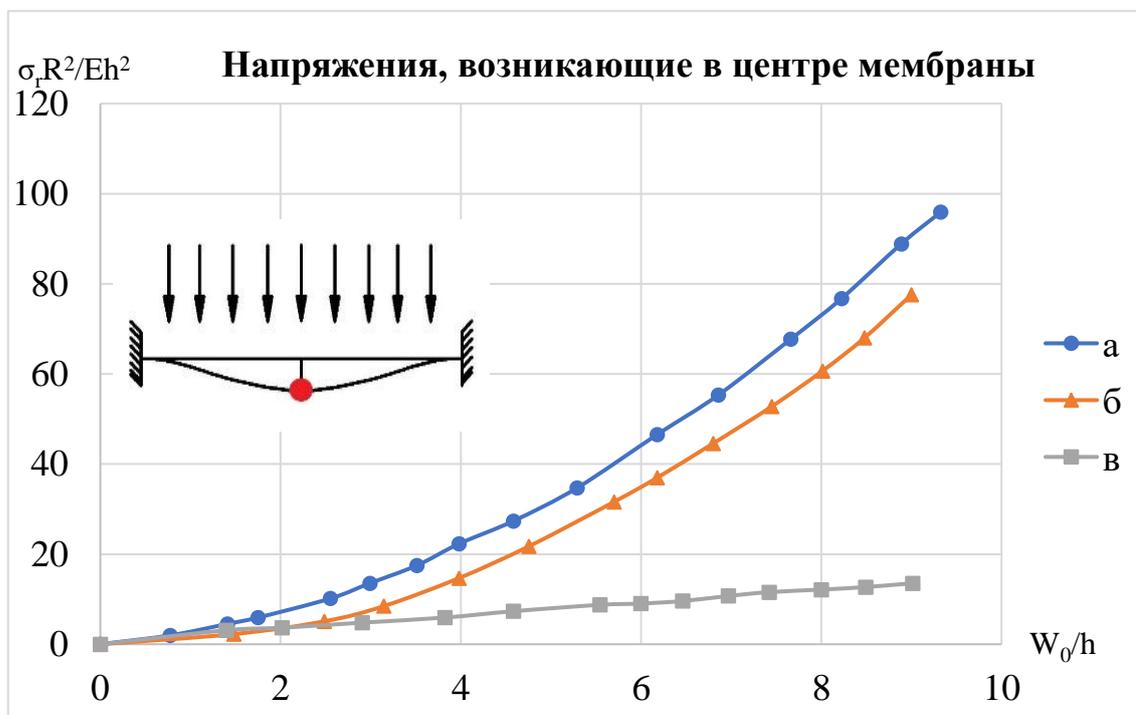


Рис.2.18. Напряжения, возникающие в центре мембраны: а – суммарные напряжения, б – напряжения растяжения, в – изгибные напряжения

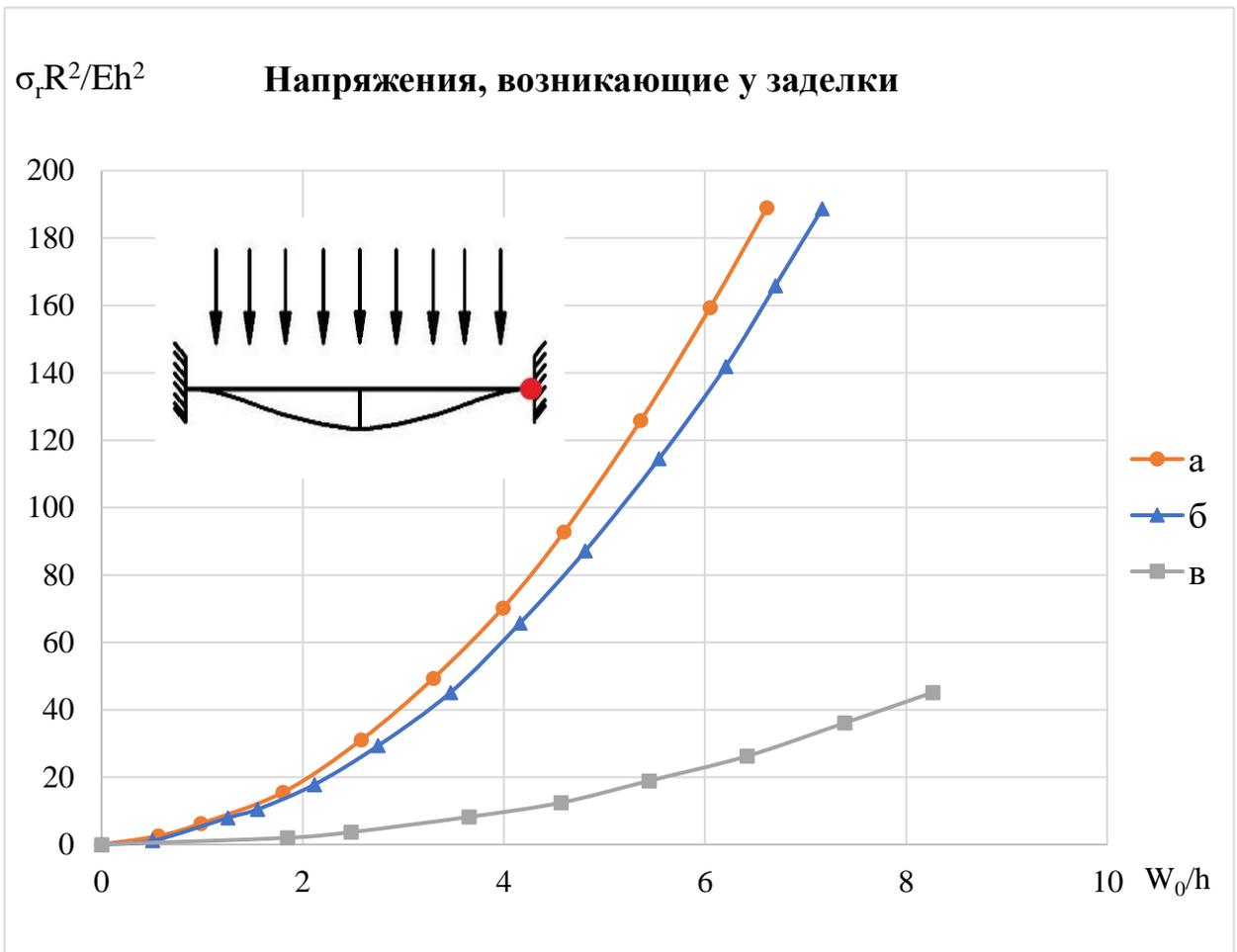


Рис. 2.19. Напряжения, возникающие у заделки: а – суммарные, б – изгибные напряжения, в – напряжения растяжения

Используя вышеприведенные графики, становится возможным оценить напряжения, возникающие в мембране радиуса $R=5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм, нагруженной давлением 3 МПа. При таких параметрах на краю мембраны возникнет напряжение $\sigma_r=1076$ МПа и $\sigma_t=322,8$ МПа. Для оценки прочности необходимо определить эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ в опасной точке мембраны (на краю). В опасной точке главные напряжения равны $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \mu\sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_0$. Тогда эквивалентное напряжение, определённое, например, по энергетической теории прочности, будет определяться выражением:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} = \sigma_r \sqrt{1 - \mu + \mu^2} \quad (2.29)$$

при $\mu \approx 0,3$ $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 0,89 \sigma_r = 957,64$ МПа.

2.4. Выводы по главе

1. Выполнены аналитические решения по линейной теории изгиба пластин, по нелинейной теории изгиба пологих оболочек и вариационным методом для пластинки радиуса $R=5,7$ мм, толщины $h=0,23$ мм, $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$, жестко закреплённой по радиусу и для пластинки такого же радиуса и толщины, выполненной из того же материала, имеющей жесткий центр 2 мм, нагруженных давлением $P=3$ МПа (номинальное давление датчика). Получены распределения напряжений и деформаций на поверхности.

2. Определено максимальное значение эквивалентного напряжения для круглой пластинки и пластинки с жестким центром при действии давления $P=3$ МПа. При расчете по нелинейной теории изгиба пологих оболочек напряжение для круглой пластинки составляет 386 МПа, для пластинки с жестким центром 234 МПа. При расчете вариационным методом максимальное эквивалентное напряжение в круглой пластинке составляет 957 МПа.

3. Определены прогибы круглой пластинки и пластинки с жестким центром при действии давления $P=3$ МПа. При расчете по нелинейной теории изгиба пологих оболочек прогиб центра круглой мембраны составляет 0,33 мм, прогиб центра круглой мембраны с жестким центром составляет 0,27 мм. При расчете вариационным методом прогиб центра круглой мембраны составил 0,322 мм.

4. В виду того, что реальная конструкция имеет отличную от круглой пластинки геометрию, концентраторы напряжений в виде скруглений, несколько материалов на поверхности упругого элемента, становится целесообразным провести численное моделирование. Расчетное напряжение 957 МПа является недопустимым, т.к. незначительно меньше предела текучести (980 МПа) титанового сплава ВТ-9, физические свойства которого были использованы при расчете, а прогиб мембраны $\approx 0,3$ мм скорее всего приведет к возникновению напряжений в ЧЭ, превосходящих предел прочности.

Глава 3. Экспериментальное исследование чувствительного элемента ТП на КНС

В работах [72-74, 69] говорится о наличии дефектного слоя в структурах КНС, который может быть причиной дополнительных погрешностей при работе датчиков давления. Для проведения точного численного моделирования необходимо знать, имеется ли дефектный слой, и что он представляет собой, чтобы оценить его влияние на выходной сигнал ТП на КНС. Также для проведения точного численного моделирования необходимо знать точные размеры чувствительного элемента на КНС, в частности, толщину сапфировой подложки.

3.1. Экспериментальное исследование границы кремний-сапфир

Для изучения данного вопроса было проведено исследование методом растровой электронной микроскопии на установке helios nanolab 660 рис.3.1.

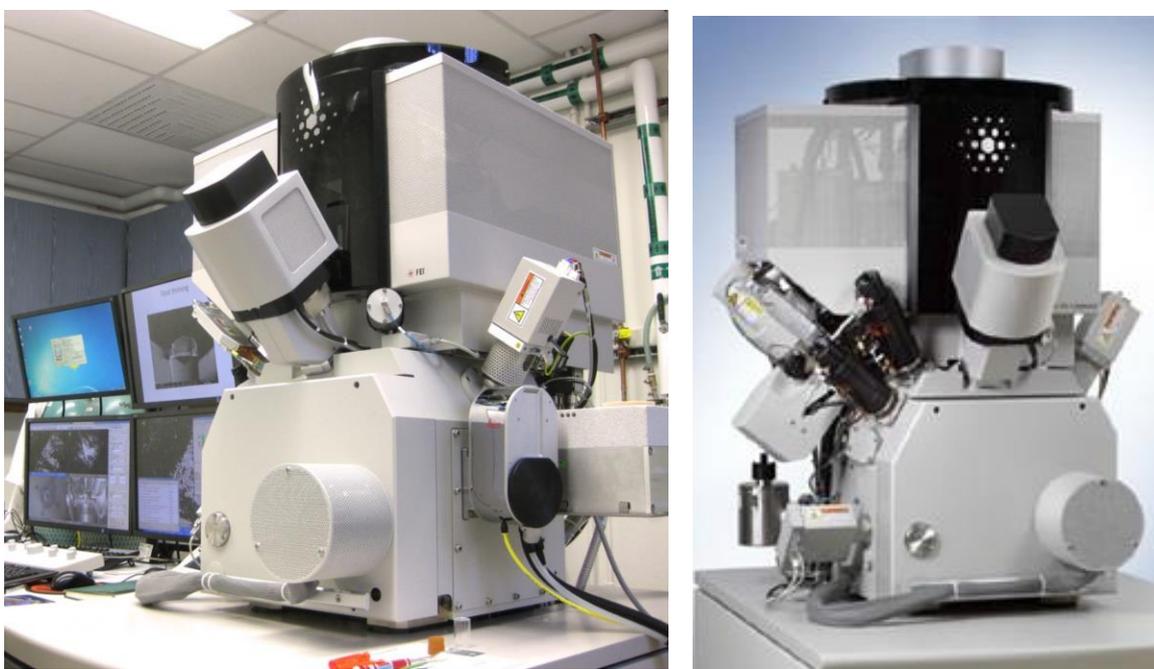


Рис.3.1. Фотографии сканирующего электронного двухлучевого микроскопа Helios NanoLab 660

Функционирование сканирующего электронного микроскопа осуществляется посредством перемещения по исследуемому объекту сфокусированного пучка электронов. В результате взаимодействия электронов с веществом возникает ответный сигнал, который регистрируется специальным детектором, и пользователь получает увеличенное изображение объекта. Конструкция сканирующего электронного микроскопа приведена на рис.3.2. и состоит из источника электронов, электронной колонны, камеры с исследуемым объектом и детекторами для регистрации сигнала. Электронная колонна включает в себя оптическую систему для сканирования и фокусировки электронов. Ввиду того, что при атмосферном давлении пучок электронов будет сильно рассеиваться, в конструкцию микроскопа вводят специальную систему откачки, позволяющую создать вакуум.



Рис.3.2. Конструкция СЭМ

Вследствие того, что в воздухе электрон не сможет долететь от источника до образца, т.к. столкнется с молекулами воздуха на своем пути, вакуум является необходимым условием для работы микроскопа. Колонна электронной оптики, как правило, состоит из конденсорной линзы, диафрагмы, отклоняющей системы и объективной линзы. В современных колоннах электронной оптики используется система из нескольких конденсорных линз и отклоняющих систем, а также устройства для компенсации астигматизма. Эффект изменения траектории электронов под действием электрического или магнитного поля лежит в основе работы всех элементов электронной оптики. Линзы для электронов, в отличие от стеклянных линз для видимого света, выполнены в виде системы из электродов, к которым приложено напряжение катушек, по которым течет ток. Варьируя значением напряжения или тока можно менять фокусное расстояние линзы. Данный эффект применяется при фокусировке электронного пучка на поверхности исследуемого образца. Магнитная линза обычно изготавливается так, что под действием магнитного поля электрон теряет тангенциальную составляющую скорости, которая была приобретена при входе в линзу. В результате на выходе из линзы электроны в пучке фокусируются, т.е. приобретают радиальную скорость, по направлению к оптической оси.

Основное назначение отклоняющей системы – сканирование по поверхности исследуемого образца пучком электронов, при этом можно выбрать произвольное направление сканирования, т.е. поворачивать изображение объекта, не поворачивая сам объект. Зачастую возникает проблема нехватки точности механического смещения образца в случае небольших перемещений. Ввиду этого разработчики создают отклоняющую систему с возможностью перемещения области сканирования по неподвижному образцу.

Объективная линза используется для фокусировки электронного пучка на поверхность исследуемого образца. Энергия электронов в пучке определяется разностью потенциалов, через которую они прошли, ускоряясь

по направлению к образцу. Эта разность потенциалов называется ускоряющим напряжением. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1кВ, приобретает энергию 1 кэВ. В большинстве современных СЭМ используется диапазон ускоряющих напряжений от 1 до 30 кВ. После контакта ускоренных электронов с исследуемым объектом с поверхности образца происходит выход квантов электромагнитного излучения или электронов. Отражённые электроны, вторичные электроны и рентгеновское излучение являются основными сигналами, которые регистрируются специальными детекторами.

Для регистрации вторичных электронов, как правило, используется специальный детектор. Вторичные электроны, испускаемые образцом, затягиваются электрическим полем и, ускоряясь, попадают на люминофор, вызывая вспышки света, которые регистрируются фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) (рис. 3.3). Сигнал с ФЭУ усиливается и отцифровывается в уровни серого на изображении.

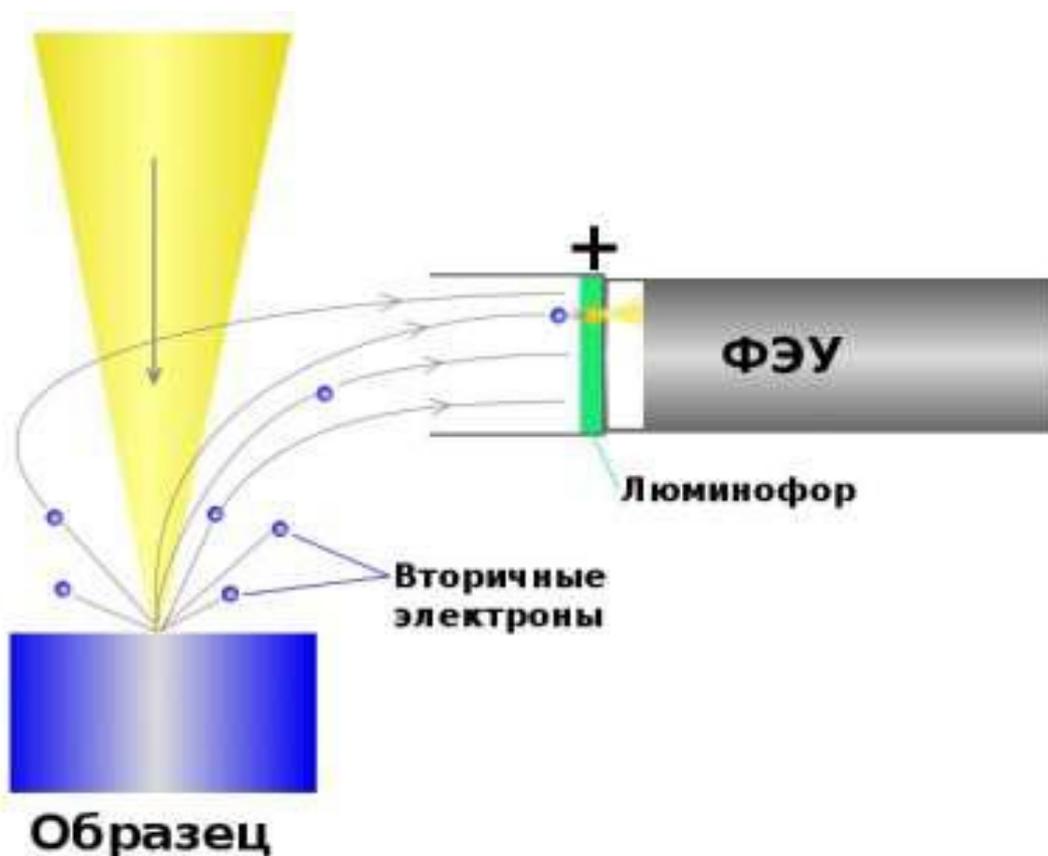


Рис.3.3. Детектирование вторичных электронов

Система FEI Helios NanoLab 660 DualBeam объединяет передовые технологии сканирующего электронного микроскопа и сфокусированного ионного пучка с очистителем плазмы, системой впрыска газа (GIS) и наноманипулятором FEI EasyLift NanoManipulator. Технические характеристики микроскопа приведены в таблице.

Таблица 1. Технические характеристики микроскопа Helios NanoLab 660

Наименование характеристики	значение
Диапазон измерений линейных размеров элементов топологии, мкм	от 0,05 до 1000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений линейных размеров элементов топологии, %	± 5
Эффективный диаметр электронного зонда во вторичных электронах при 30 кВ, нм, не более	10
Разрешение при ускоряющем напряжении 30 кВ, нм, не более	0,8
Разрешение при ускоряющем напряжении 0,2 кВ, нм, не более	1,5
Потребляемая мощность, кВт, не более	3
Рабочие условия эксплуатации:	
<ul style="list-style-type: none"> • температура окружающего воздуха, °С 	20 \pm 3
атмосферное давление, кПа	100 \pm 4
<ul style="list-style-type: none"> • относительная влажность воздуха, не более, % 	80
<ul style="list-style-type: none"> • напряжение сети питания, В 	220+10
<ul style="list-style-type: none"> • частота сети питания, Гц 	50 \pm 1

Результаты исследования структуры КНС приведены на рис. 3.4.-3.10.

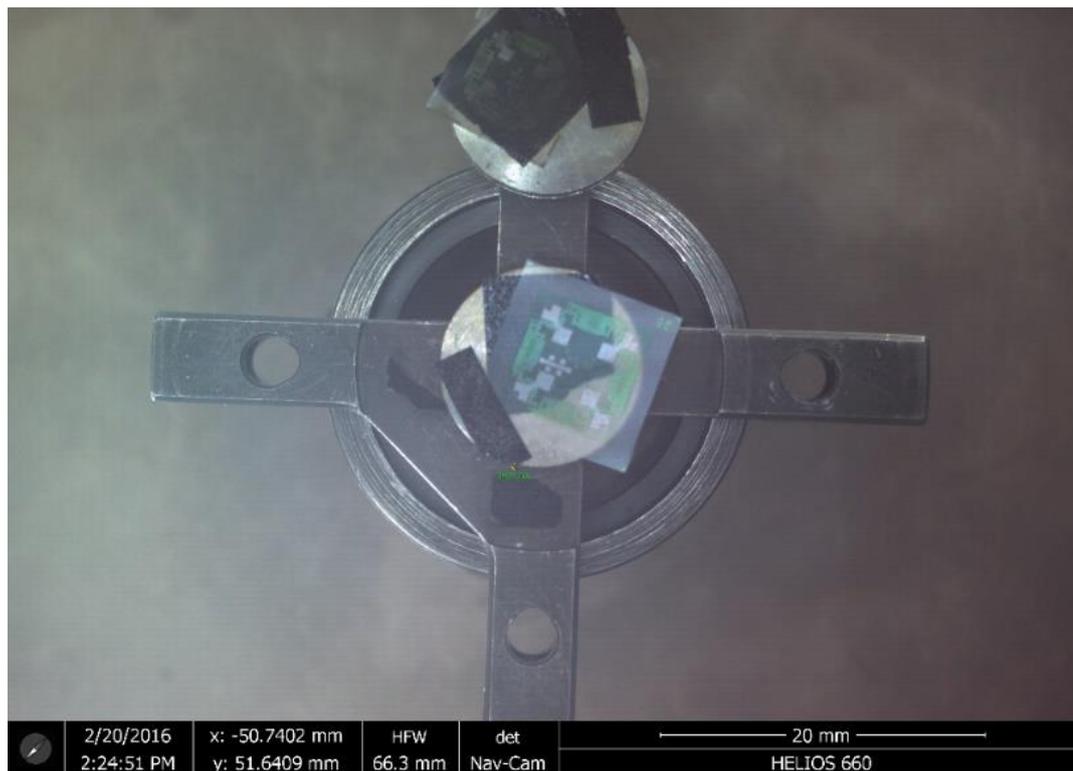


Рис. 3.4. Фотография чувствительного элемента на КНС, закрепленного в микроскопе

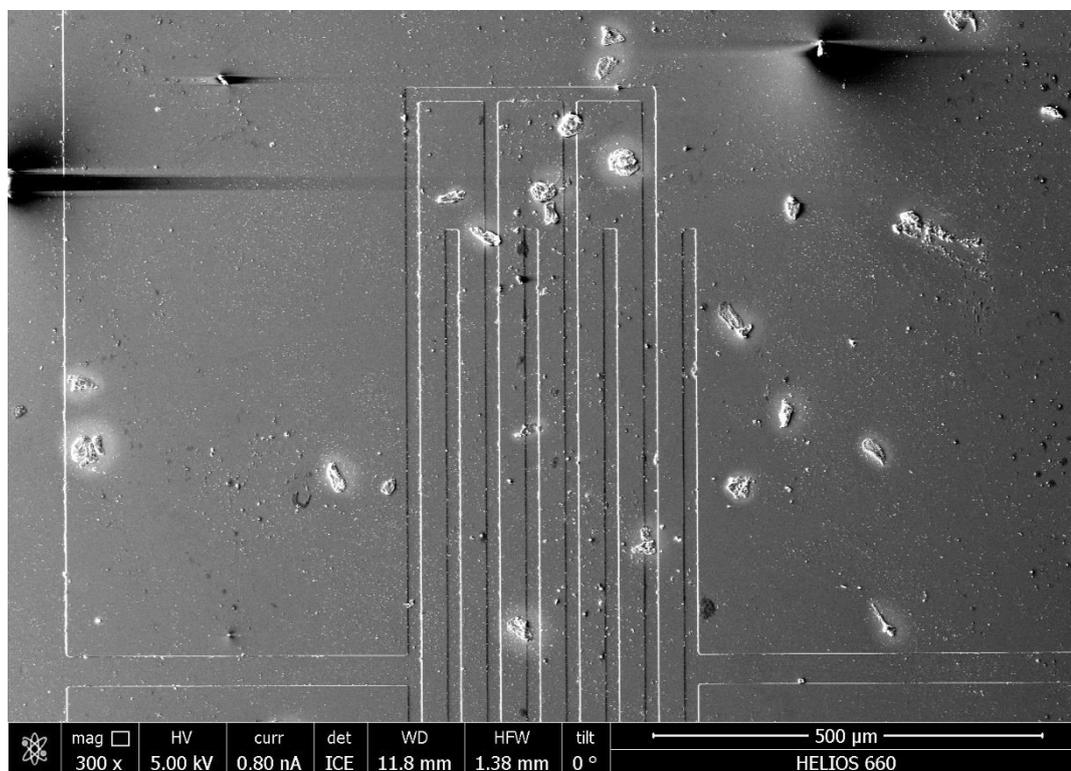


Рис.3.5. Фотография кремниевого тензорезистора на поверхности структуры КНС

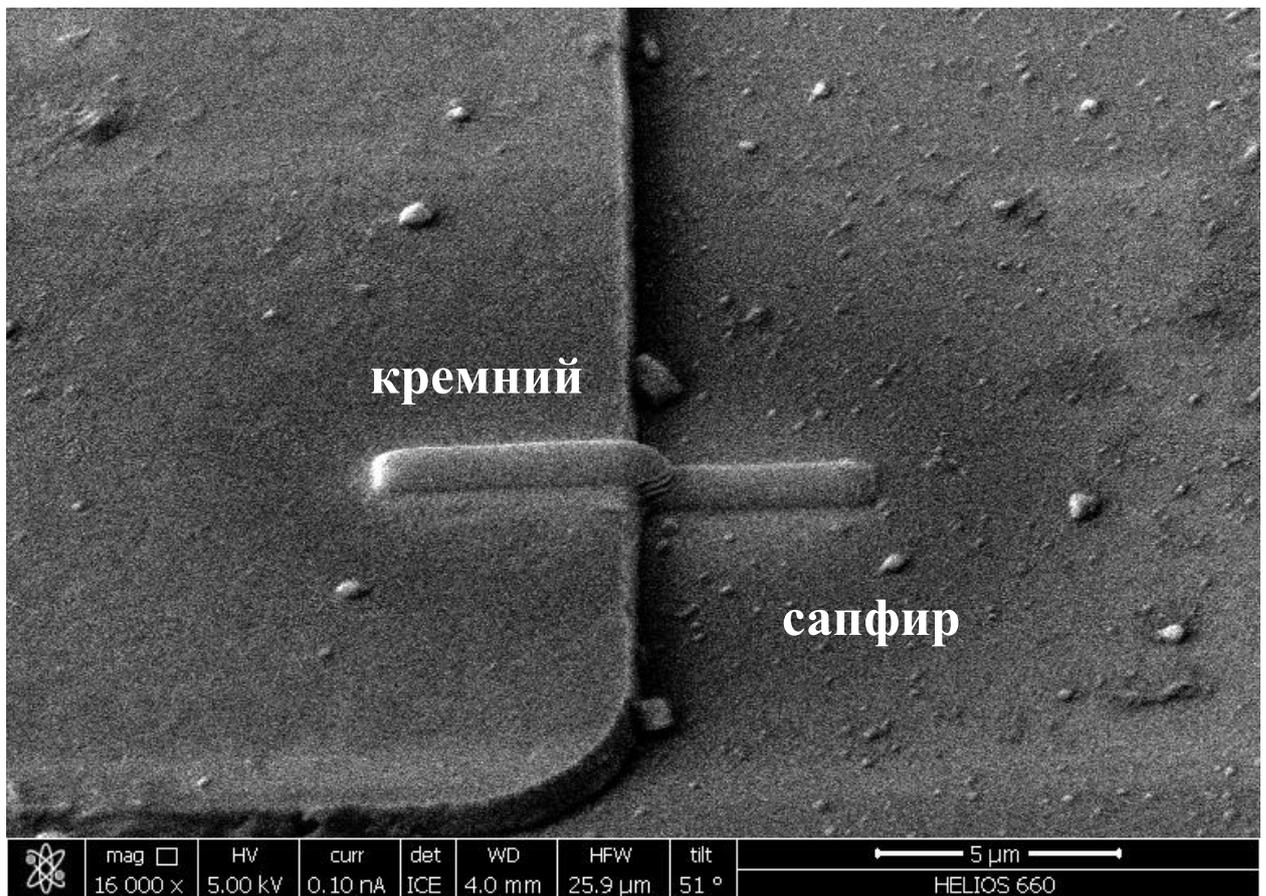


Рис.3.6. Фотография подготовительной операции – напыления слоя платины перед разрезом структуры КНС

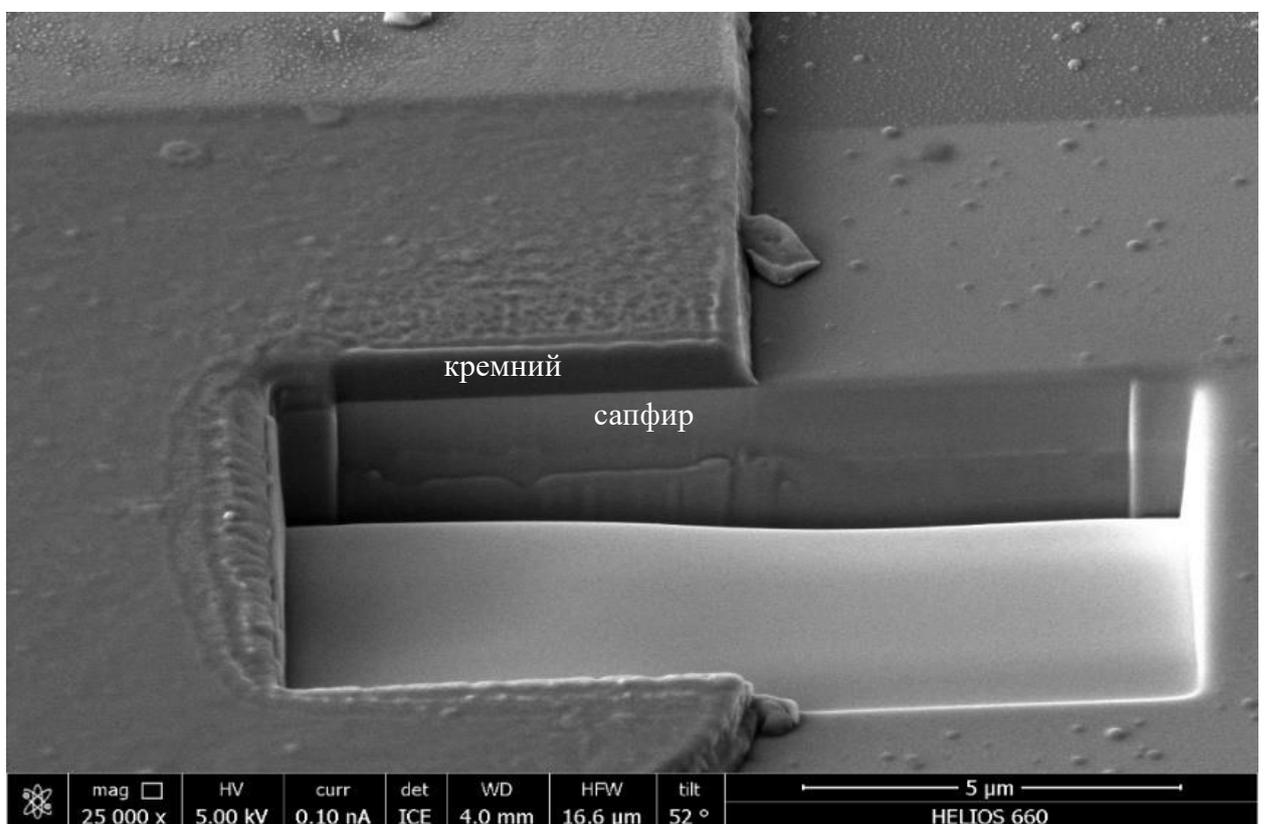


Рис. 3.7. Фотография технологического разреза в структуре КНС

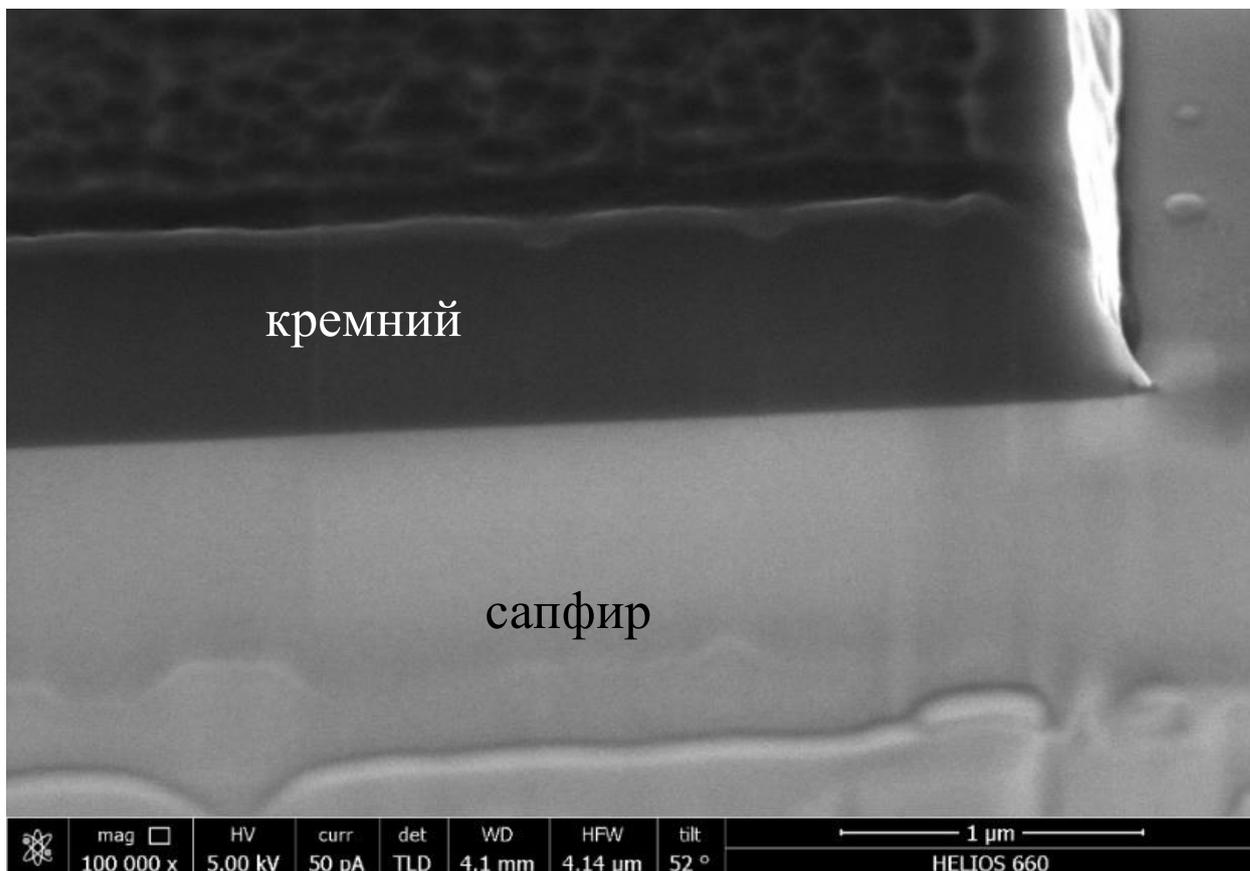


Рис. 3.8. Фотография структуры КНС, полученная с микроскопа Helios NanoLab 660

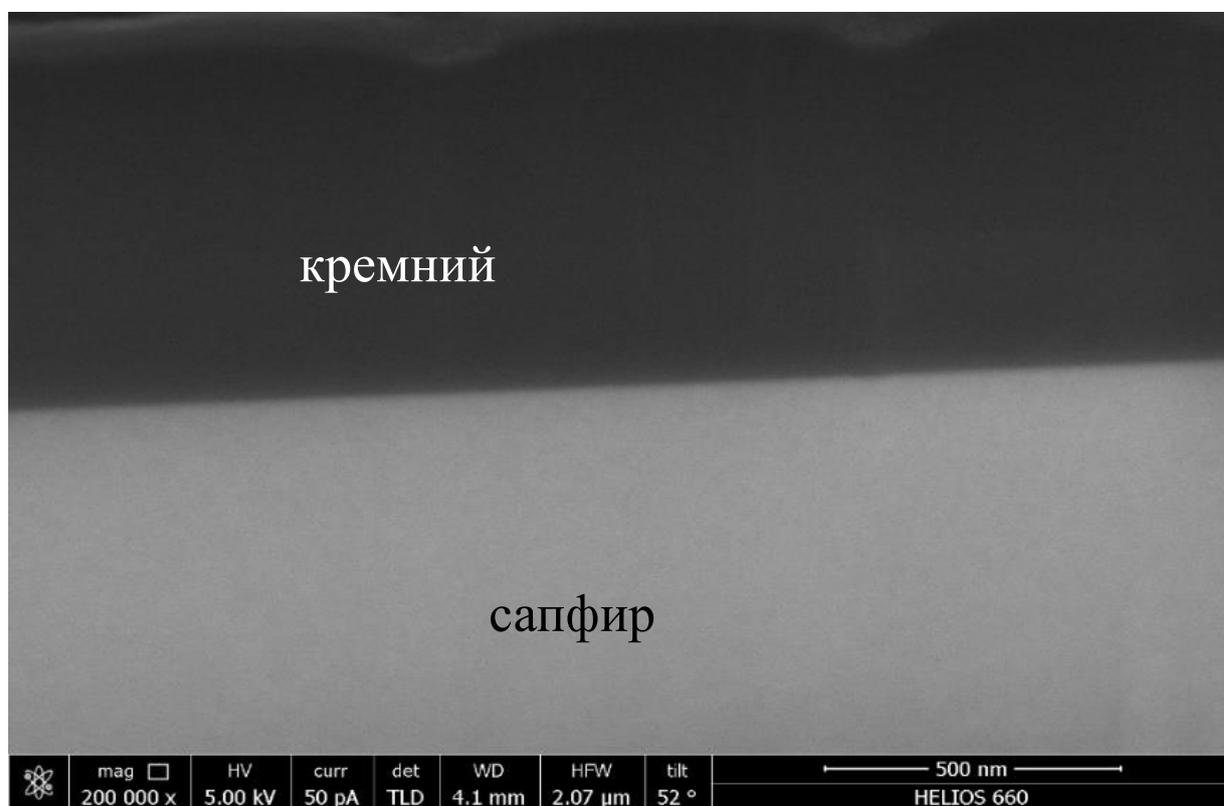


Рис. 3.9. Фотография границы сапфир – кремний, полученная с микроскопа Helios NanoLab 660

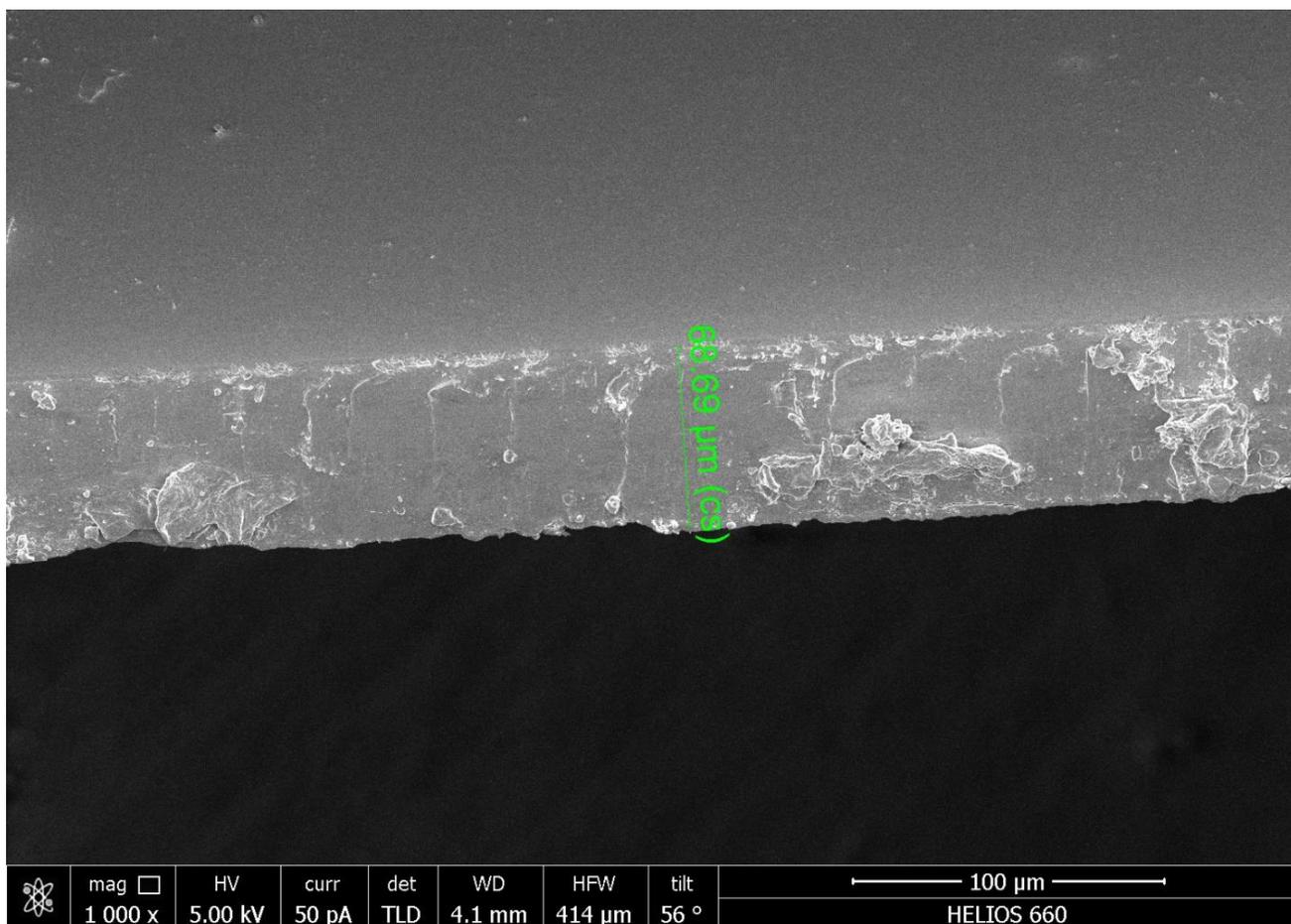


Рис.3.10. Фотография сапфировой подложки, полученная с микроскопа Helios NanoLab 660

Анализ фотографий структуры КНС, полученных со сканирующего электронного микроскопа, показал, что толщина плёнки кремния составляет 0,8 мкм, а толщина сапфировой подложки 68,69 мкм. Используя эти данные, становится возможным определить средние термические напряжения τ_0 в слое кремния и в сапфировой подложке, возникающие при эпитаксии. Как известно, если период решетки подложки отличается от периода решетки наращиваемой плёнки, на границе между подложкой и плёнкой возникают напряжения, обусловленные несоответствием решеток. Расчетные средние термические напряжения [69,70] приведены на рис.3.11. В нашем случае напряжение в сапфировой подложке составило 19 МПа, напряжение в слое кремния 607 МПа, что свидетельствует о превышении предела текучести кремния, что приводит к зарождению дислокаций несоответствия, что в

будущем возможно будет являться одной из причин нелинейности выходного сигнала.

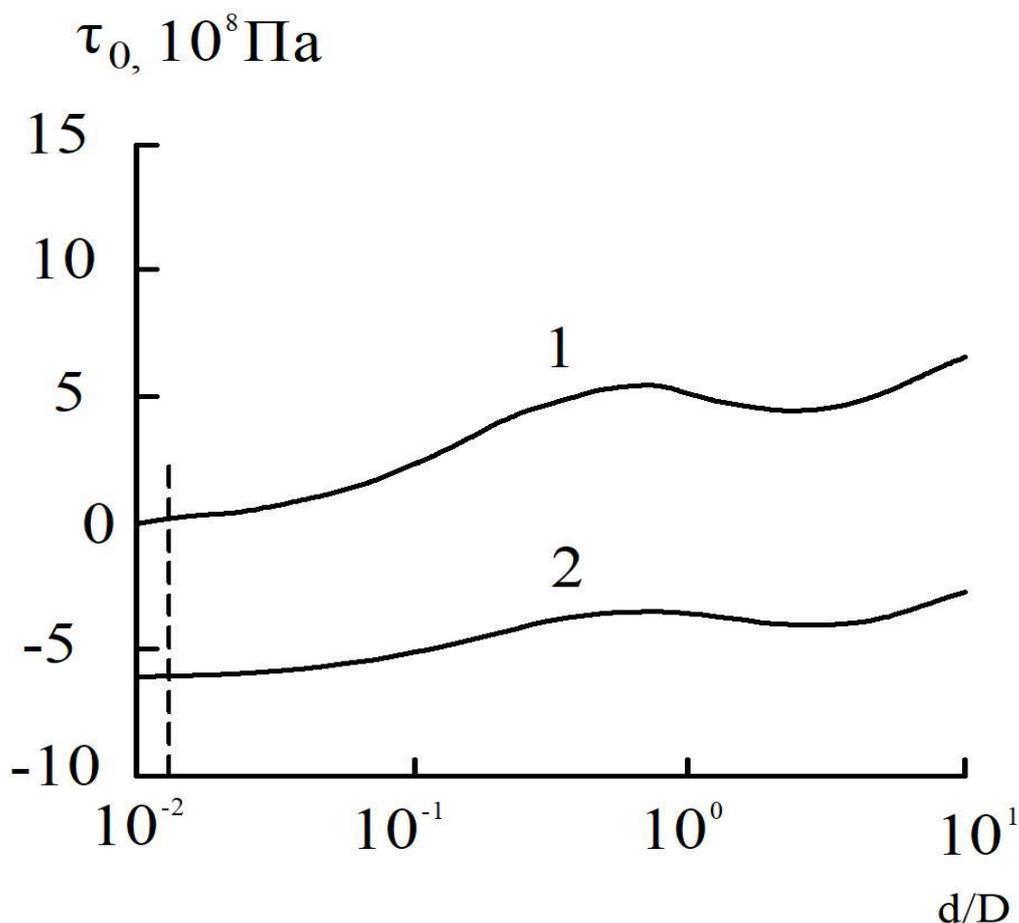


Рис.3.11. Расчетные термические напряжения [69,70], возникающие в процессе эпитаксии

В результате эксперимента было выявлено, что несмотря на большие напряжения в пленке кремния, дефектный слой на границе сафир-кремний не обнаружен. Это свидетельствует о структурном совершенстве плёнки кремния. Более глубокое исследование данного вопроса требует специальной подготовки образцов и дорогостоящего оборудования для эксперимента.

3.2. Экспериментальное определение прочностных свойств припоя ПСР72

В настоящее время в литературе практически отсутствуют данные по прочностным свойствам серебряных припоев. В ГОСТ 19738-74 приводятся следующие данные по серебряному припою ПСР72: плотность – 10000 кг/м^3 , температура плавления $779 \text{ }^\circ\text{C}$, химический состав: серебро $72 \pm 0,5$, свинец – $0,005\%$, железо – $0,1\%$, висмут – $0,005\%$, %, остальное – медь. В виду этого в рамках данной работы было решено провести экспериментальное исследование образцов из сплава ($72\% \text{ Ag}$, $28\% \text{ Cu}$) с целью получения прочностных характеристик. Образцы были изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Испытание проводилось на разрывной машине МИ-40КУ. Принципиальная схема разрывной машины приведена на рис.3.12.

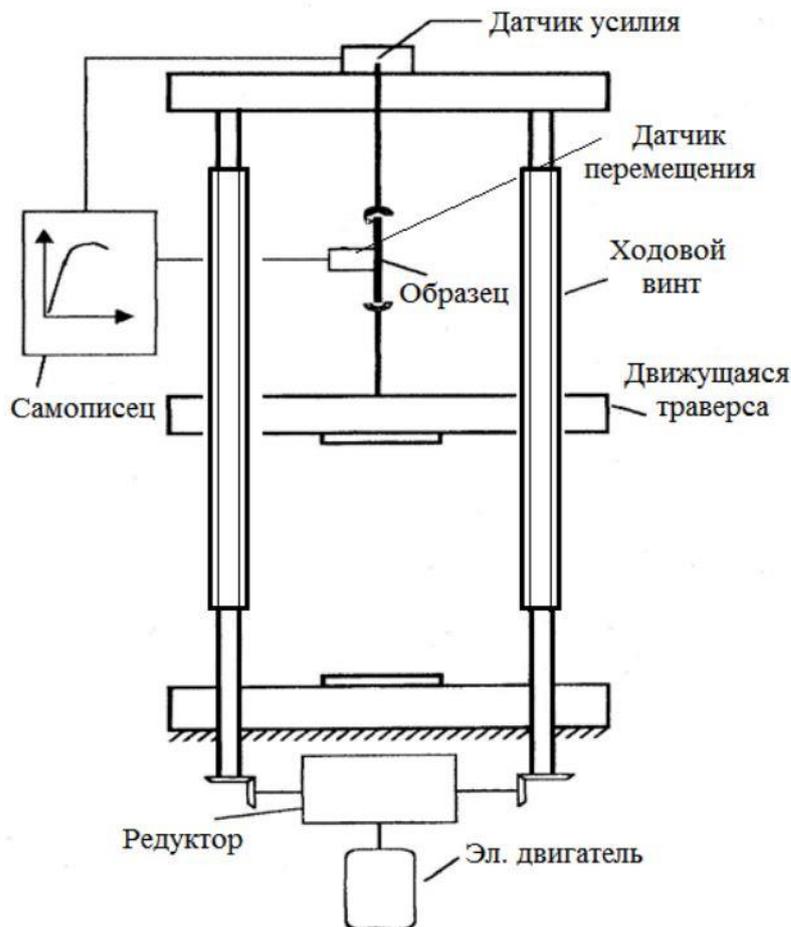


Рис.3.12. Принципиальная схема разрывной машины



Рис.3.13. Исходный образец, разрывная машина МИ-40КУ, образец после разрушения

Преимущество этого типа машин состоит в том, что они способны поддерживать постоянную скорость деформирования образца, которая необходима для корректного определения характеристик прочности и пластичности материала. Скорость нагрузки образца подбирается таким образом, чтобы обеспечить скорость деформации материала $\approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. В состав машины входят:

- нагружающее устройство с приводами, датчиками усилия, момента, линейного перемещения траверсы, углового перемещения захвата и встроенным блоком управления;
- захваты (для проведения испытаний на растяжение);
- столики (для проведения испытаний на сжатие);
- захваты кручения (для проведения испытаний на кручение и кручение со сжатием);

- захваты кручения резьбовые (для проведения испытаний на кручение и кручение с растяжением);
- соединительные кабели.

Нагружающее устройство работает по принципу «замкнутого типа» и имеет в своём составе нижнюю рабочую зону и подвижную траверсу. Станина нагружающего устройства выполнена из листовой стали. На станине закреплены: неподвижная траверса, электродвигатель, оснащённый волновыми редукторами с винтовыми передачами для перемещения подвижной траверсы, электродвигатель углового перемещения захвата кручения с волновым редуктором и зуборемненной передачей со шкивами. Управление двигателями на кронштейнах осуществляется при помощи тахогенераторов, которые связаны с электродвигателями через приводные ремни круглого сечения. Подвижная траверса, на которой установлен комбинированный датчик момента и силы, крепится к гайкам винтовых передач. К данному датчику присоединяется активный захват через специальный переходник. Пассивный захват через переходник крепится к выходному валу кручения. При испытаниях на сжатие вместо захватов устанавливаются столики. Параллельно винтам устанавливаются специальные стойки для повышения жёсткости конструкции. Соединение стоек и винтов осуществляется при помощи специальной плиты, расположенной в верхней части нагружающего устройства. В верхней части нагружающего устройства установлена плита, скрепляющая винты и стойки. Для подключения комбинированного датчика силы и момента к встроенному блоку управления расположен дополнительный блок на подвижной траверсе. Для повышения жесткости в нижней части нагружающего устройства установлена плита. Все элементы конструкции закрываются крышками. Нагружающее устройство расположено на стойках, опоры которых имеют возможность регулировки. Соединение стоек осуществляется посредством стяжки. Электромеханические приводы кручения и перемещения траверсы нагружающего устройства изготавливаются на базе электродвигателей постоянного тока с устройствами,

которые позволяют стабилизировать и регулировать скорость в требуемом диапазоне. Крутящий момент от двигателя преобразуется в поступательное движение траверсы при помощи зубчатого ремня, шкивов, волновых редукторов и винтовых передач. Вращающий момент двигателя, привода кручения, через зубчатый ремень и шкивы передается на волновые редукторы и далее на вал вращения. На шкиве двигателя привода кручения установлен датчик оптоэлектронного устройства измерения углового перемещения. При помощи специального встроенного блока осуществляется управление работой машины и связь с ПК оператора. В данном блоке размещены также источники питания. Блок управления имеет в составе электронные схемы, которые позволяют:

- выбирать нужную скорость и направление вращения электродвигателей нагружающего устройства;
- осуществлять связь с внешней ЭВМ;
- измерять и обрабатывать сигналы, поступающие с нагружающего устройства.

При измерении силы и момента аналоговые сигналы с комбинированного датчика силы и момента поступают на нормирующие усилители и через электронный коммутатор аналого-цифрового преобразователя (АЦП) подаются для обработки на контроллер. Контроллер обеспечивает измерение текущей силы $F_{\text{тек}}$ и текущего момента $M_{\text{тек}}$, а также, предварительную установку значений предельной силы $F_{\text{пред}}$ и предельного момента $M_{\text{пред}}$ для данного опыта, при достижении которых привод автоматически останавливается. При измерении линейного и углового перемещений импульсные сигналы с соответствующих датчиков поступают на контроллер блока управления, который обеспечивает измерение перемещений. При управлении приводами сигналы управления формируются контроллером в зависимости от установленного значения заданной скорости. Реверсирование двигателя осуществляется изменением полярности напряжения питания.

В ходе испытаний были определены необходимые для численного моделирования параметры: модуль упругости материала $E = 88$ ГПа, предел прочности $\sigma_B = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа; а также была построена диаграмма зависимости напряжений от относительной деформации.

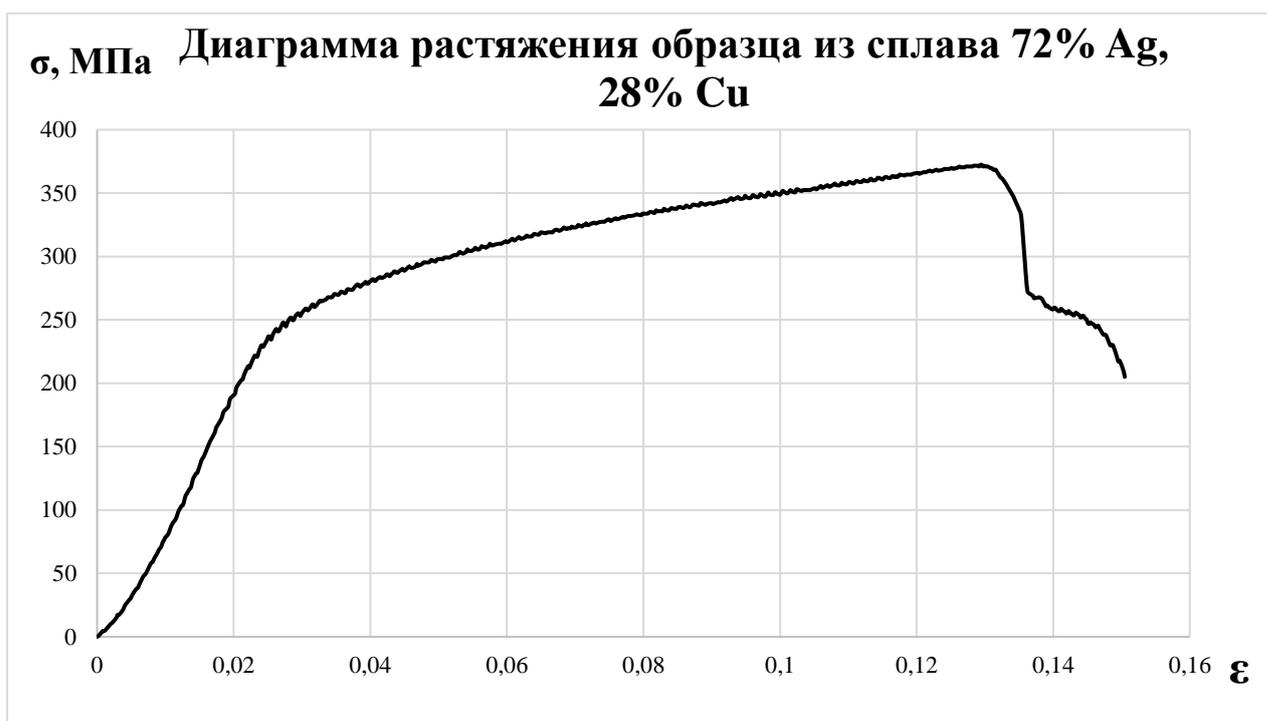


Рис. 3.14. Экспериментальная диаграмма растяжения образца из сплава 72% Ag, 28 % Cu



Рис.3.15. Результат определения модуля упругости образца из сплава 72% Ag, 28% Cu

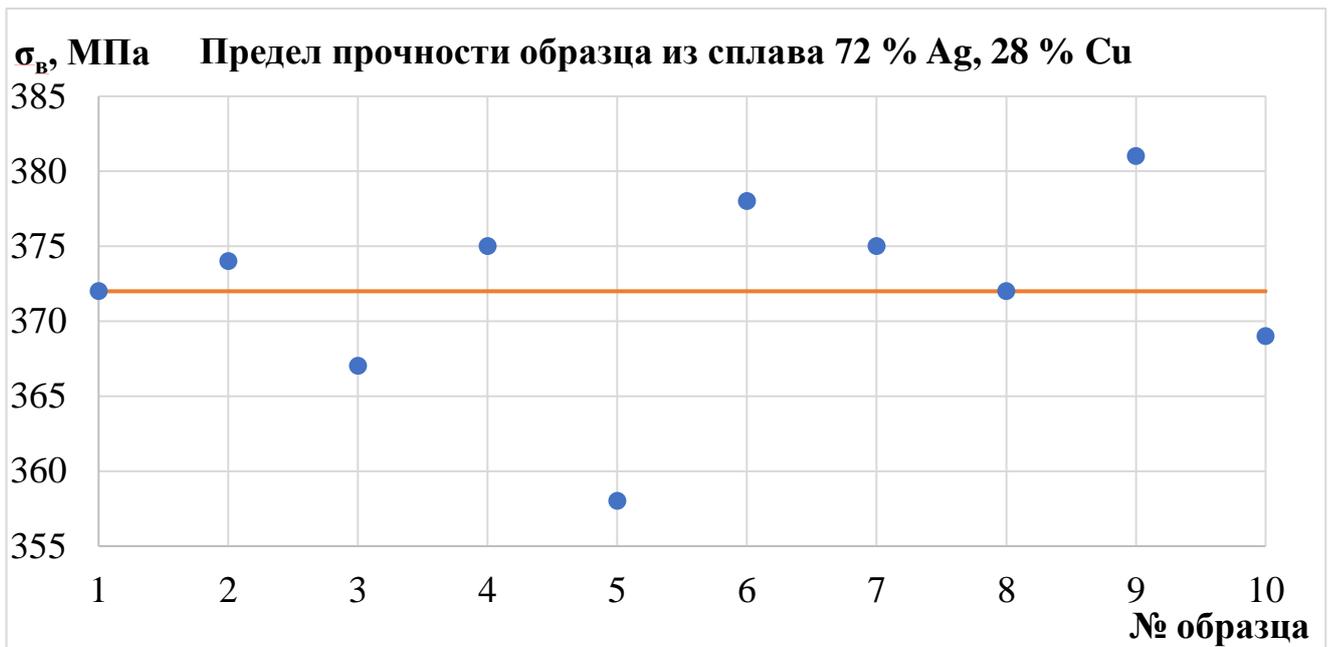


Рис.3.16. Результат экспериментального определения предела прочности образца из сплава 72% Ag, 28 % Cu

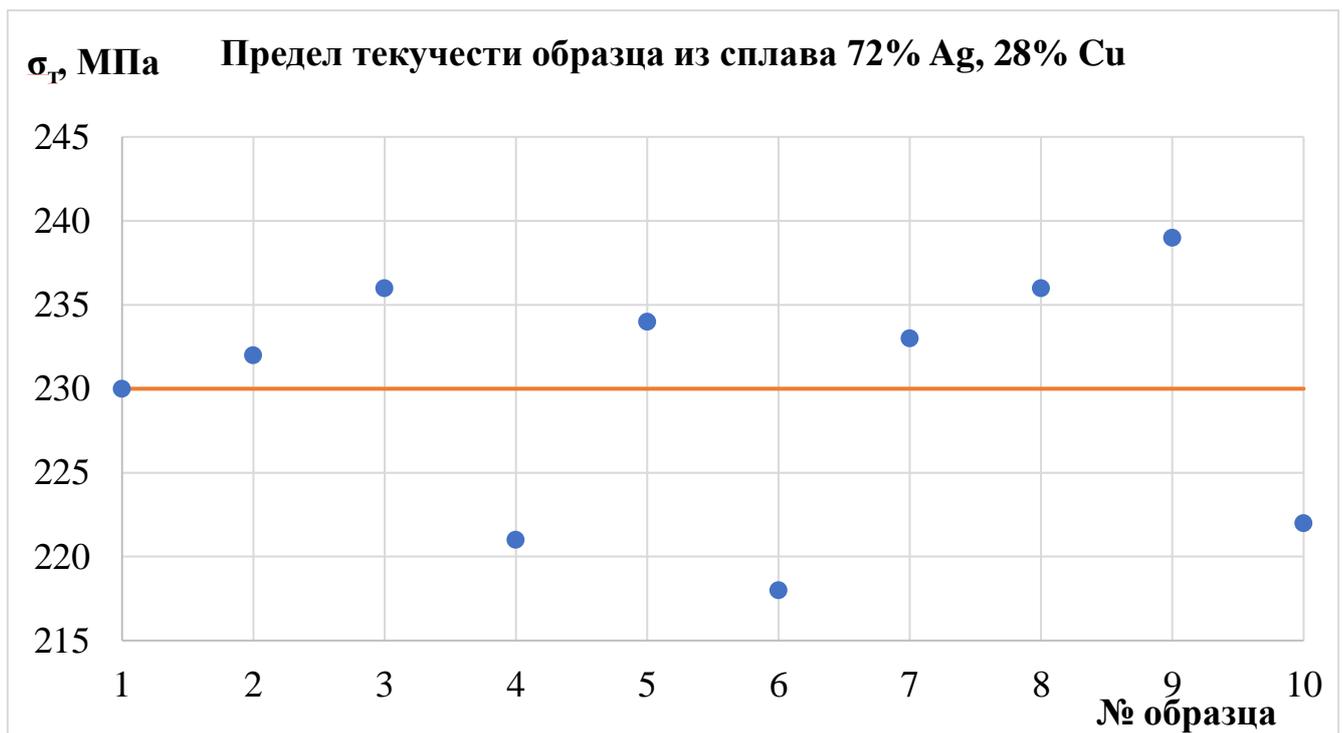


Рис.3.17. Результат экспериментального определения предела текучести образца из сплава 72% Ag, 28 % Cu

3.3. Выводы по главе

1. В главе экспериментально определены геометрические параметры структуры КНС. Толщина слоя кремния составляет 0,8 мкм, а толщина сапфировой подложки 68,69 мкм.
2. На основе полученных данных определены значения средних термических напряжений, возникающих в слое кремния и в слое сапфира при эпитаксии. В нашем случае напряжение в сапфировой подложке составило 19 МПа, напряжение в слое кремния 607 МПа, что свидетельствует о превышении предела текучести кремния, что приводит к зарождению дислокаций несоответствия, что в будущем возможно будет являться одной из причин нелинейности выходного сигнала.
3. Экспериментально определены прочностные свойства сплава 72% Ag, 28% Cu. модуль упругости материала $E = 88$ ГПа, предел прочности $\sigma_B = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа;

Глава 4. Численное моделирование полупроводникового датчика на КНС методом конечных элементов

В данной главе проведен прочностной расчет упругого элемента серийно-выпускаемого тензодатчика на структуре КНС. Рассмотрено влияние допусков на геометрические размеры и температуры окружающей среды на линейность выходной характеристики. Расчет проведен в программном продукте ANSYS Mechanical APDL.

4.1. Расчет напряженно-деформированного состояния УЭ тензодатчика на КНС в программном комплексе ANSYS

Для численного моделирования УЭ полупроводникового датчика давления на КНС использовались элементы Plane 183 и Solid 185. Ниже приведены их основные характеристики.

Элемент plane 183 является двумерным элементом второго порядка с восемью узлами, имеющими две степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X и Y узловой системы координат.

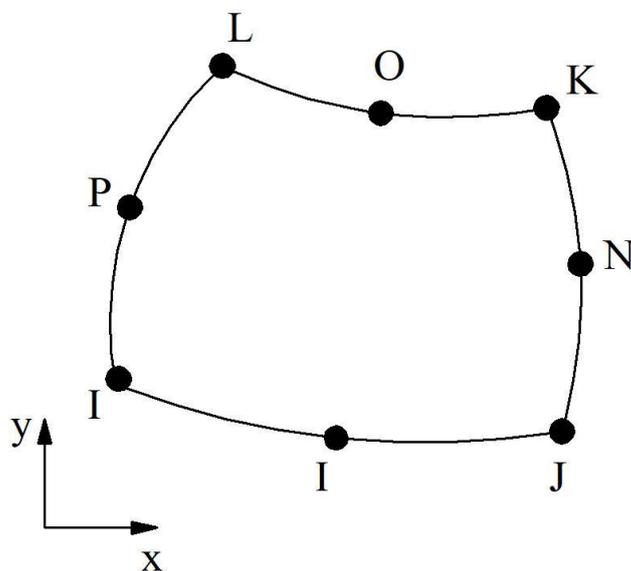


Рис.4.1. Геометрия элемента Plane 183

Элемент может использоваться для моделирования плоского напряженного, плоского деформированного состояний, а также, как в нашем случае, для моделирования осесимметричного напряженного состояния

Для трехмерного моделирования двухмембранного упругого элемента полупроводникового датчика давления на КНС использовался элемент объемного НДС с восемью узлами. Данный элемент определяется узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле.

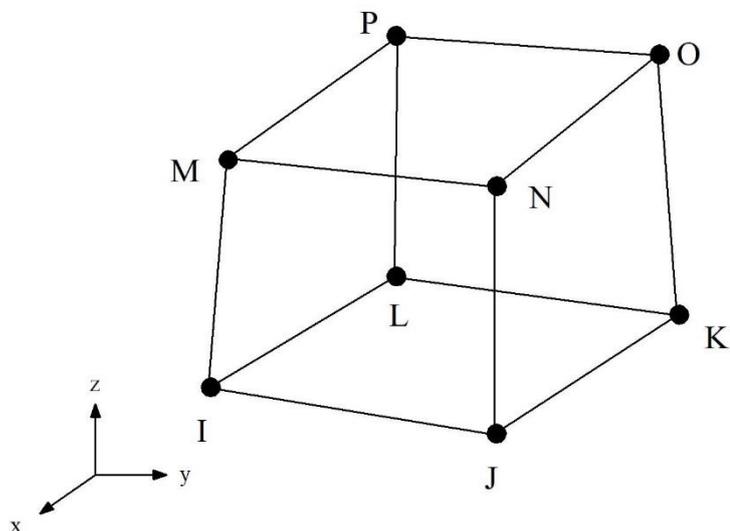


Рис.4.2. Геометрия элемента Solid 185

Для проведения прочностного расчета на основе конструкторской документации была построена модель конструкции, заданы свойства материалов (табл.1.). На рисунке 4.3 изображена расчетная схема объекта в двумерной системе координат (r, z) . Направление осей r и z показано на рис. 4.4.

Таблица 2. Физические свойства материалов

материал	модуль упругости, E , ГПа	коэффициент Пуассона, μ	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа
Титан (BT9)	118	0,34	980	1150
Серебро(Ag)	80	0,37	30	160
Сплав 72% Ag, 28% Cu	88	0,37	230	372
Сапфир (Al_2O_3)	382	0,27	-	895
Кремний (Si)	130	0,28	-	500

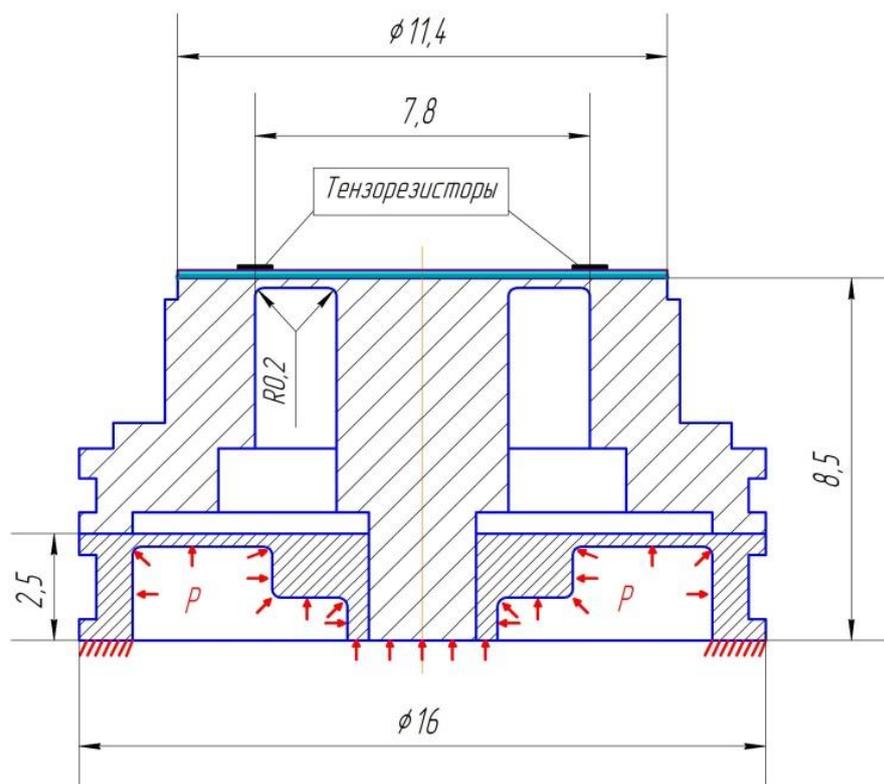


Рис.4.3. Расчетная схема объекта

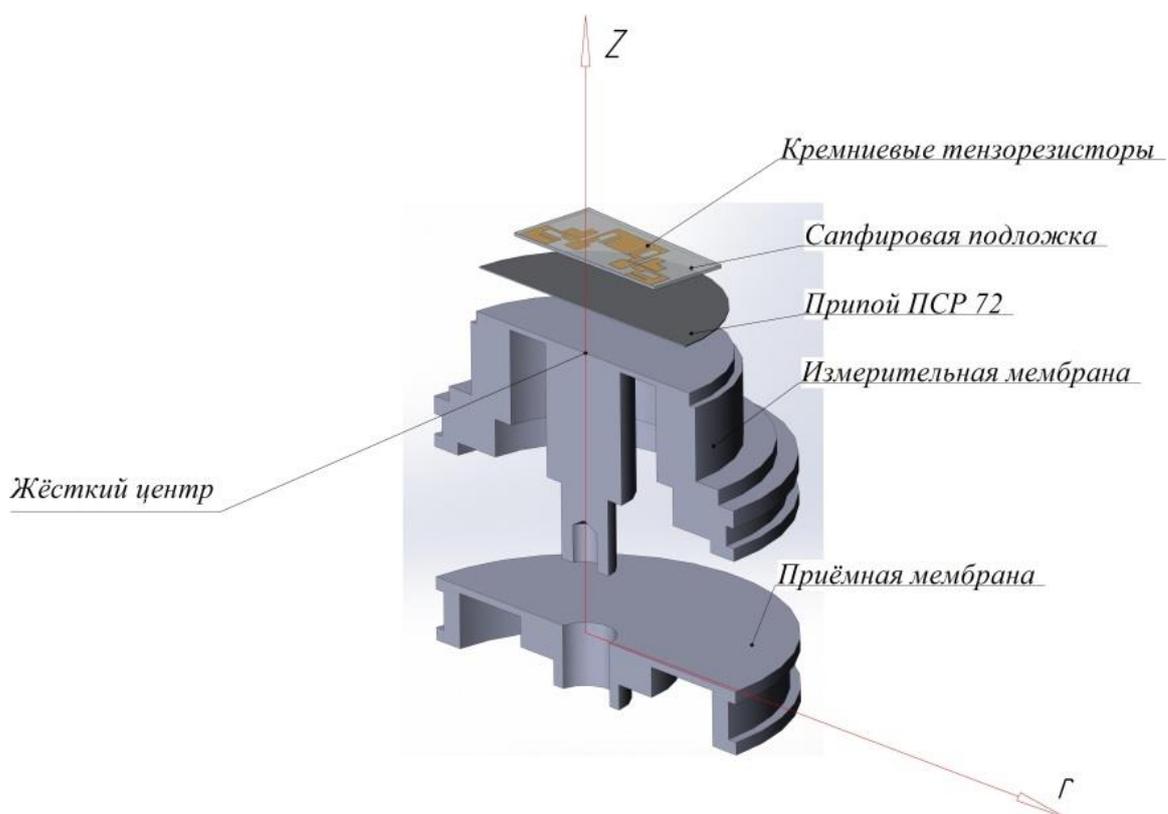


Рис.4.4. Рассчитываемый двухмембранный тензопреобразователь давления, разработанный ЭПО «Сигнал». Толщина слоя кремния 0,8 мкм, сапфировой подложки 69 мкм, припоя ПСР72 50 мкм

На практике соединение сапфира с металлом осуществляется посредством пайки, которая обеспечивает надежное соединение полупроводникового чувствительного элемента с материалом мембраны. В настоящее время для пайки обычно используется припой ПСр72. Механические свойства слоя припоя рассмотрены в главе 3, поэтому при расчетах можно использовать такие данные: $E=88$ ГПа; $\mu=0,37$; $\sigma_{02}=230$ МПа; $\sigma_{в}=372$ МПа. Свойства сапфира были взяты по данным работ [90], свойства титанового сплава были взяты по данным работы [83].

Применяемая конечно-элементная дискретизация конструкции с помощью восьмиузлового осесимметричного элемента Plane 183 представлена на рис.4.5. Для решения данной задачи использовалась опция осесимметричной двухмерной задачи. Предварительный расчет показал, что слой кремния, в силу малой толщины (1мкм), в расчете можно не учитывать.

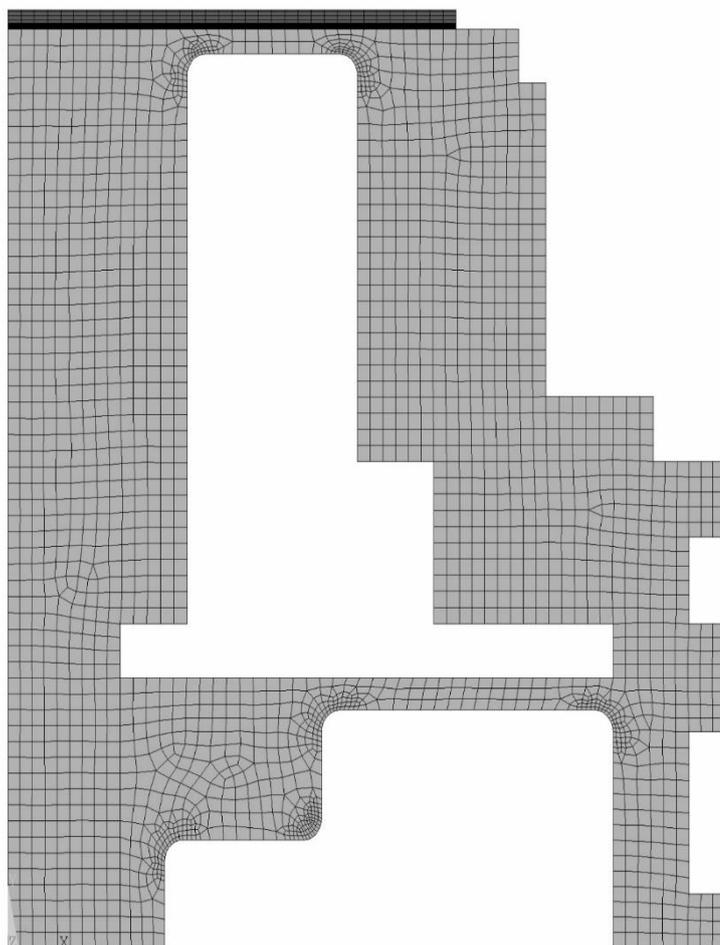


Рис.4.5. Конечно-элементная модель тензопреобразователя

В процессе дискретизации было применено локальное сгущение сетки вблизи концентраторов напряжений (рис.4.6.).

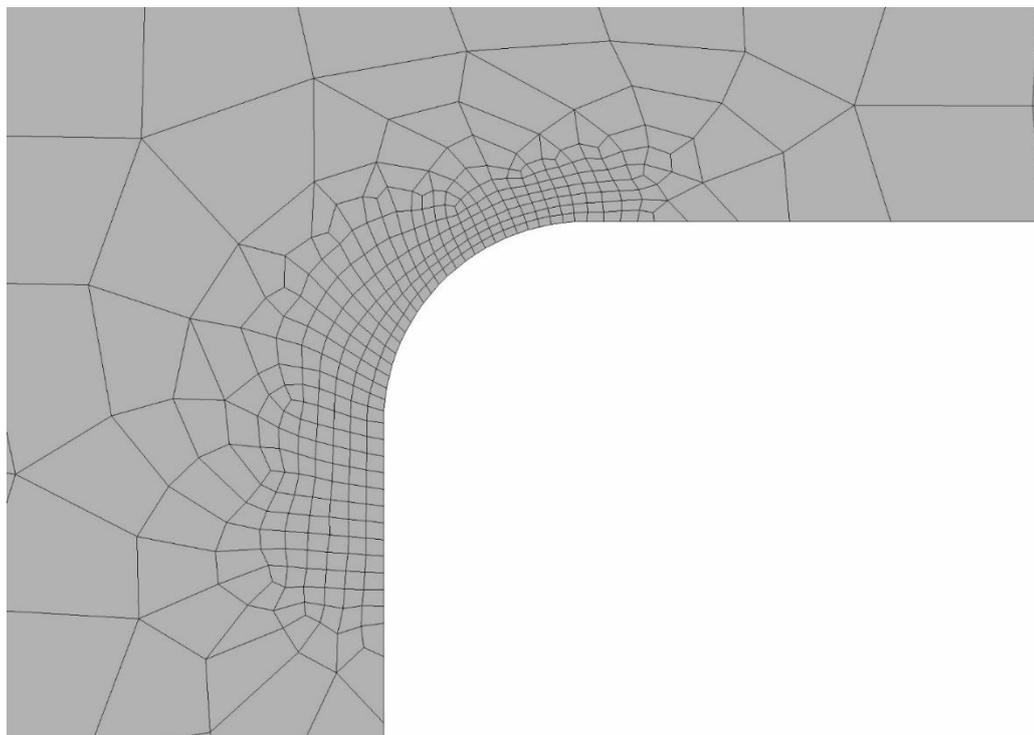


Рис.4.6. Локальное сгущение сетки вблизи концентраторов напряжений

Качество разбиения оценивалось известным эмпирическим правилом двукратного сгущения сетки (табл.2.2.).

Таблица 3. Проверка адекватности построенной модели

Параметр	Значение							
Количество элементов	290	440	630	740	820	1100	2900	6450
Максимальное перемещение центра измерительной мембраны, мм	0,010266	0,011210	0,013246	0,013512	0,013517	0,013528	0,013532	0,013542
Различие %		9,19	18,16	2,01	0,037	0,081	0,029	0,073
Максимальное напряжение, МПа	384	354	508	529	513	484	494	496
Различие, %		7,81	43,5	4,13	3,02	5,65	2,06	0,4

Решение проводилось как в геометрически нелинейной, так и в геометрически линейной постановке. Согласно ГОСТ 22520-85 рассчитываемый датчик должен выдерживать давление перегрузки на 25% большее, чем номинальное давление. В связи с этим в расчете использовалось давление 3,75 МПа при номинальном давлении для рассчитываемого ТП 3 МПа. Для сравнения результатов расчета и оценки нелинейности конструкции, использовалась величина прогиба измерительной мембраны. Результаты приведены на рис.4.7.

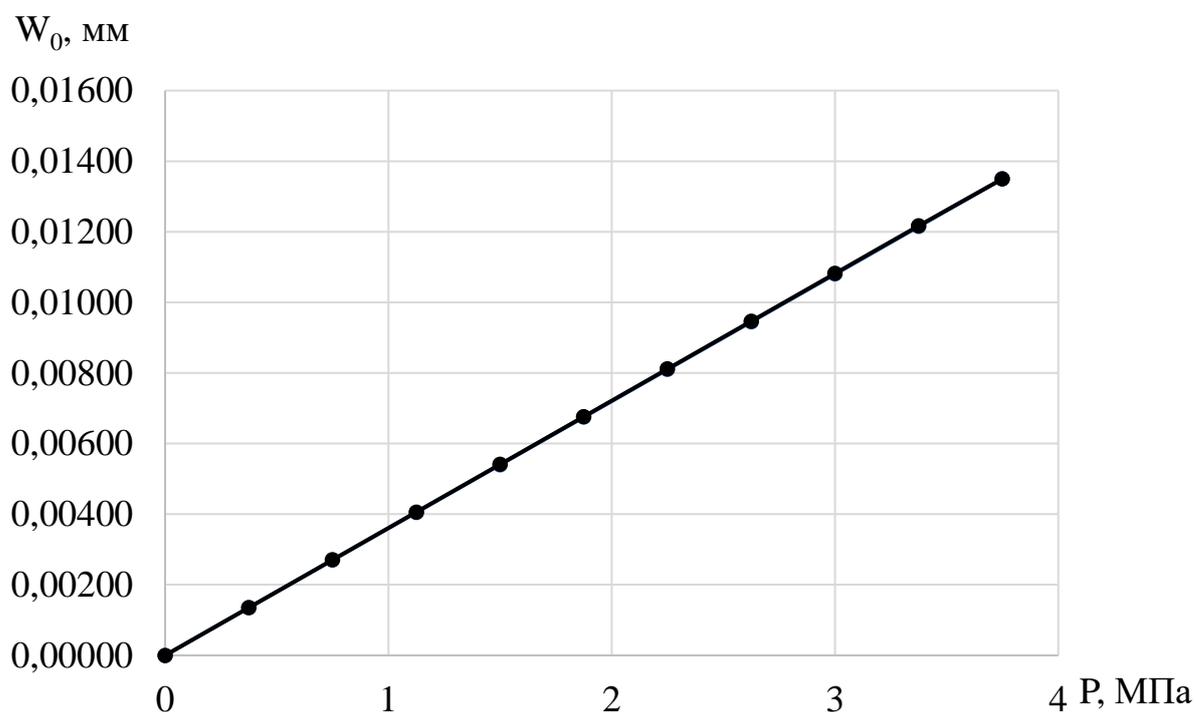


Рис.4.7. Перемещение центра измерительной мембраны. Нелинейность 0,14%

Визуально характеристика прогиба измерительной мембраны рассматриваемого датчика представляет прямую, однако численный анализ показал, что нелинейность присутствует и равна 0,14%. При проектировании полупроводниковых ТП даже такая малая величина нелинейности может вносить серьезный вклад в точность измерений. Поэтому ею нельзя пренебрегать, а наоборот стоит использовать как один из параметров качества изделия. Напряжения, возникающие при деформации УЭ показаны на рис. 4.8, 4.9. Решение с помощью элемента Solid185 проводилось с целью контроля сходимости решения.

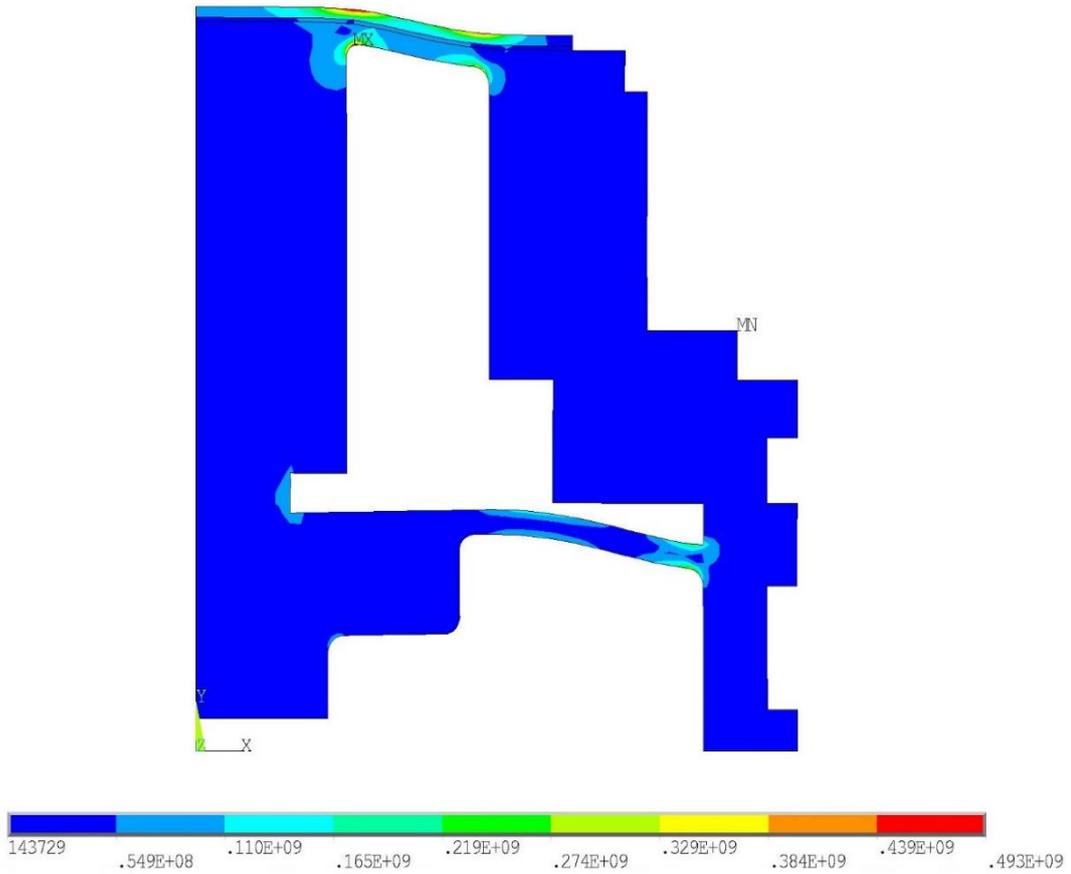


Рис.4.8. Напряжения в Паскалях по Мизесу в модели рассчитываемого тензопреобразователя

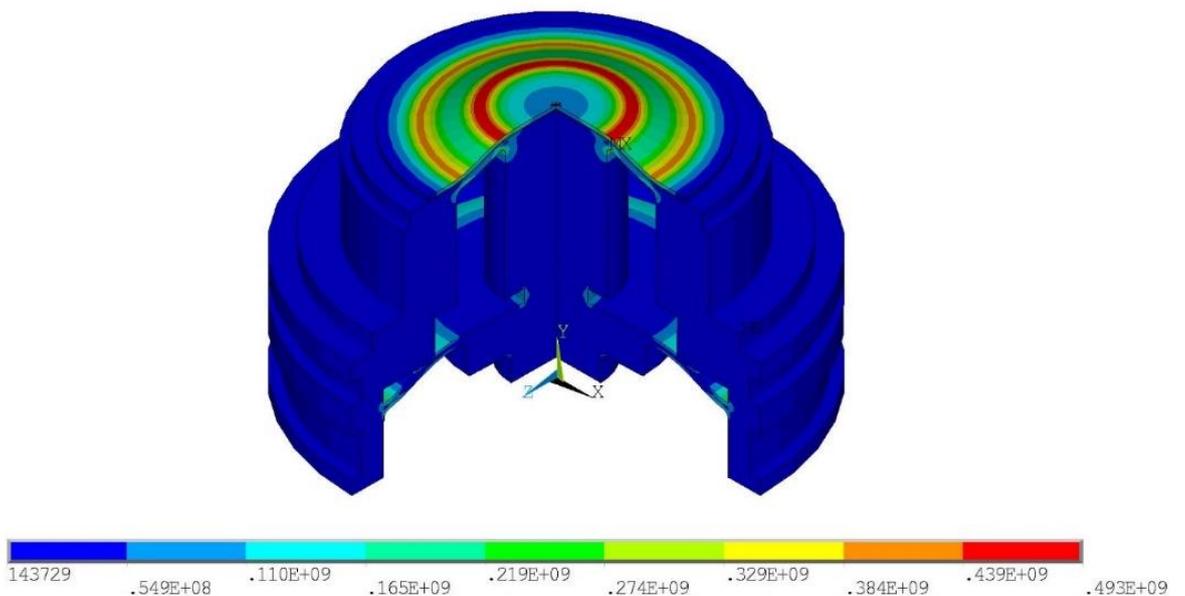


Рис.4.9. Напряжения по Мизесу. Максимальное напряжение на поверхности ЧЭ численно равно 439 МПа.

Также на основе прочностного расчета были получены распределения радиальной и тангенциальной деформаций на поверхности ЧЭ, а также их разницы, рис.4.9, 4.10

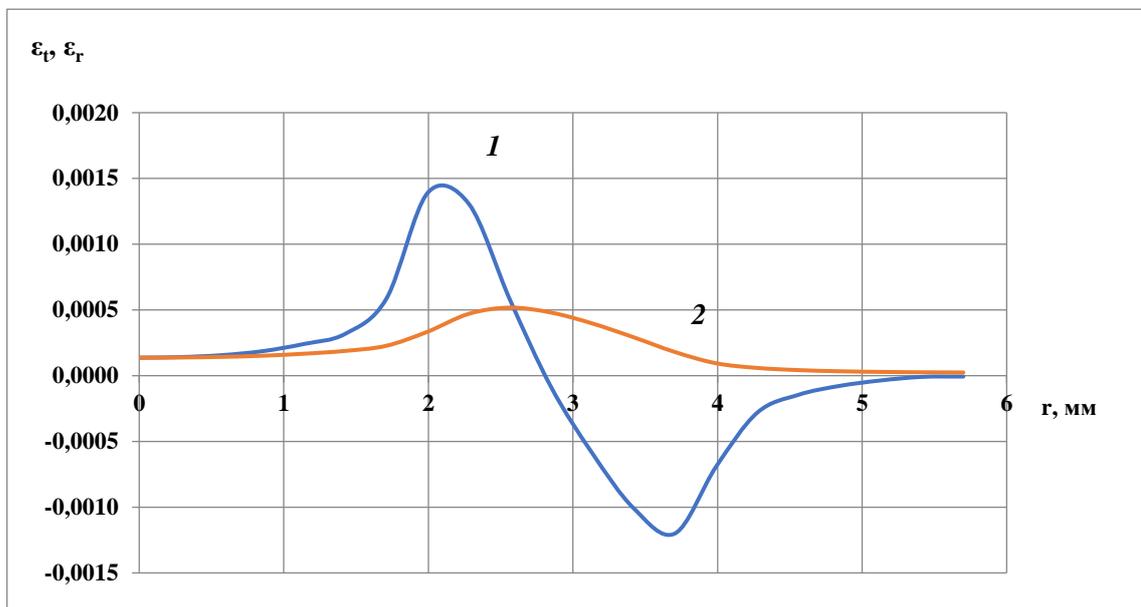


Рис.4.9. Распределение деформаций в радиальном направлении (r) и тангенциальном направлении (t) на поверхности чувствительного элемента:

- 1 – радиальная деформация (ϵ_r);
- 2 – тангенциальная деформация (ϵ_t).

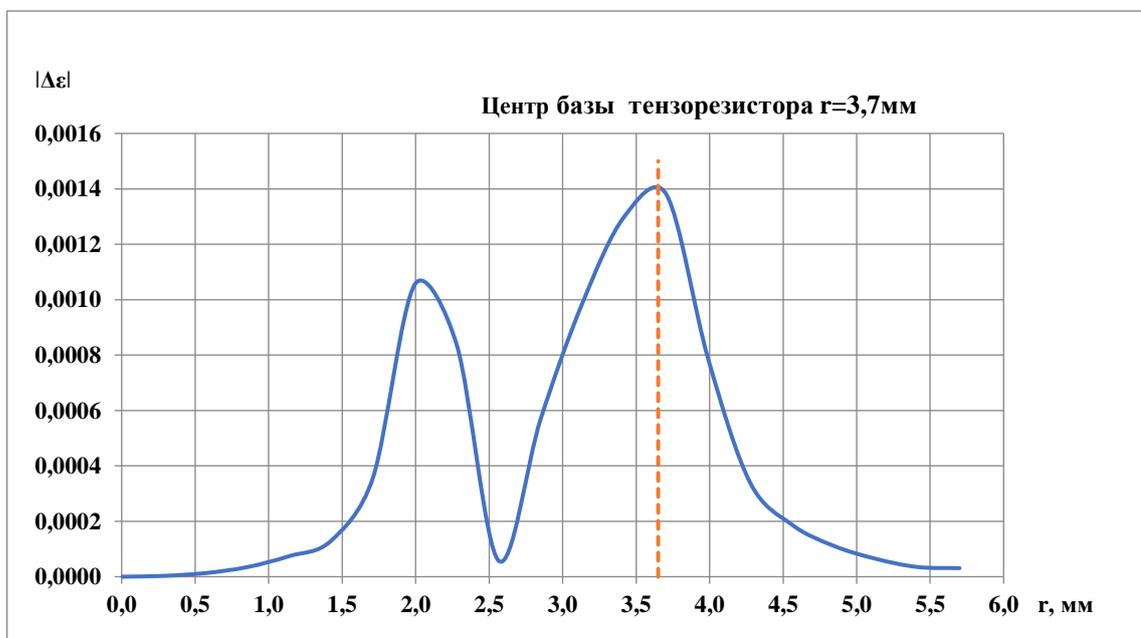


Рис.4.10. Разность радиальных и тангенциальных деформаций $|\Delta\epsilon|$ на поверхности чувствительного элемента

Также в результате прочностного расчета было выявлено сильное влияние на величину выходного сигнала допусков на размеры и значений конструкторских параметров, рис 4.11 - 4.15.

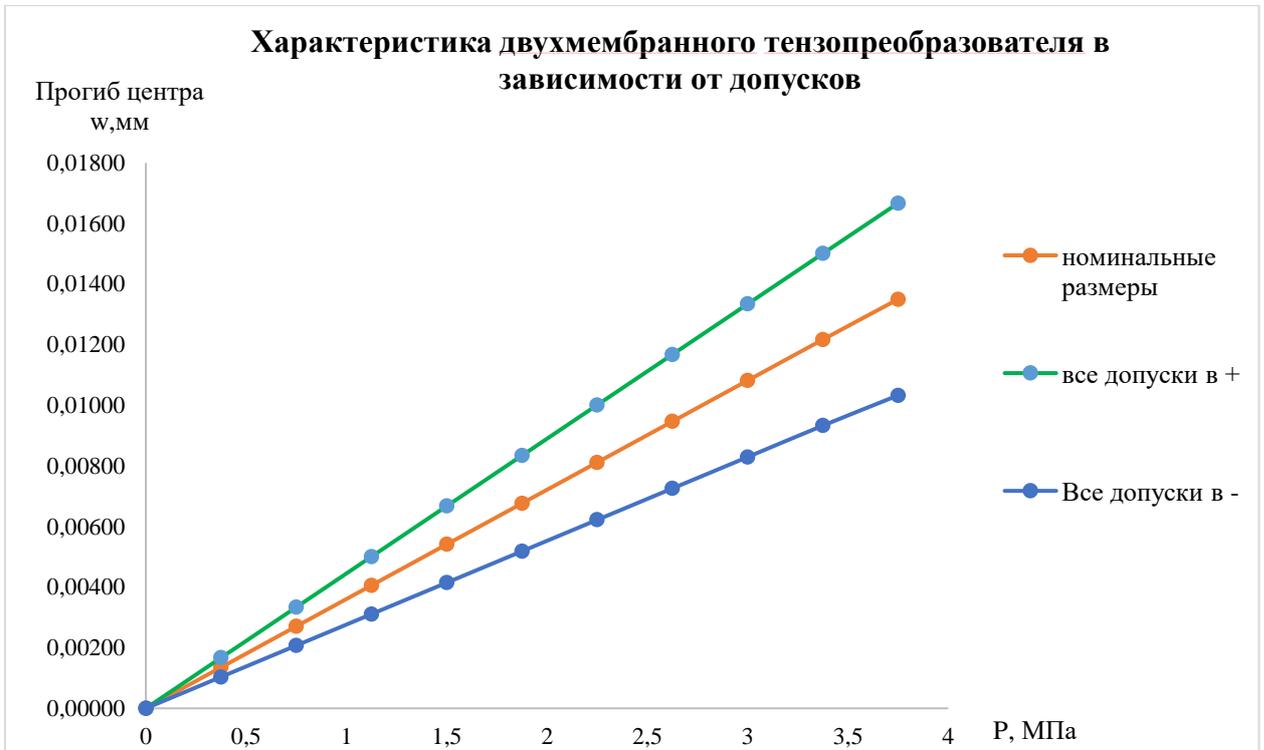


Рис. 4.11. Характеристика двухмембранного тензопреобразователя в зависимости от допусков

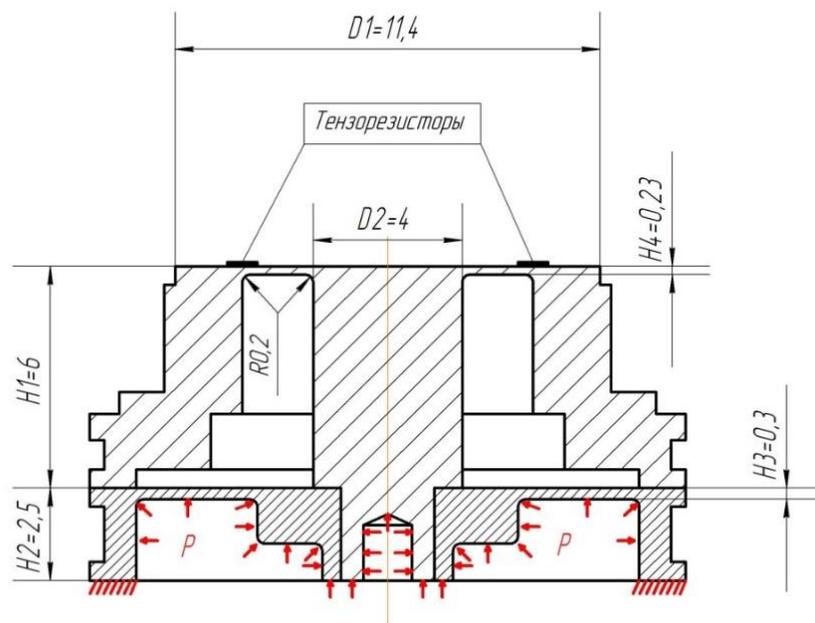


Рис. 4.12. Конструкторские параметры, представляющие наибольший интерес

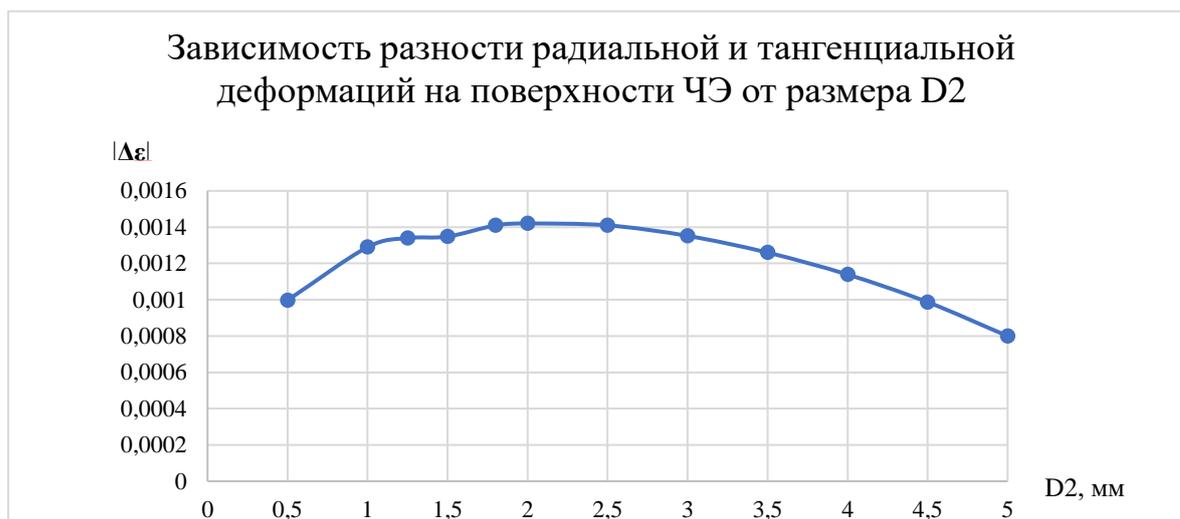
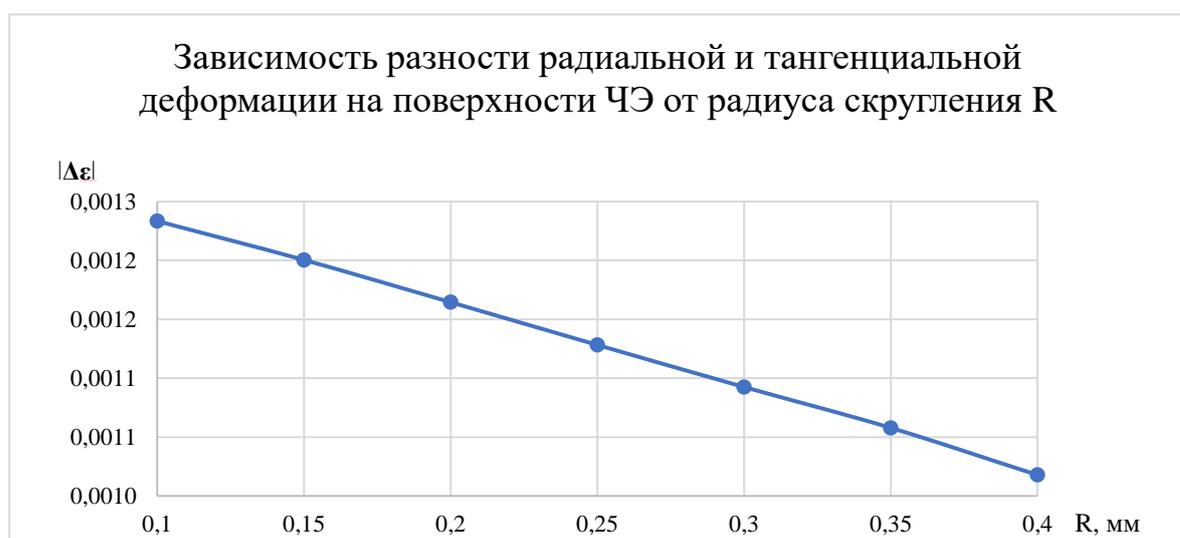


Рис. 4.13. Зависимость разности радиальной и тангенциальной деформаций



на поверхности ЧЭ от размера D2

Рис.4.14. Зависимость разности радиальной и тангенциальной деформаций на поверхности ЧЭ от радиуса скругления R

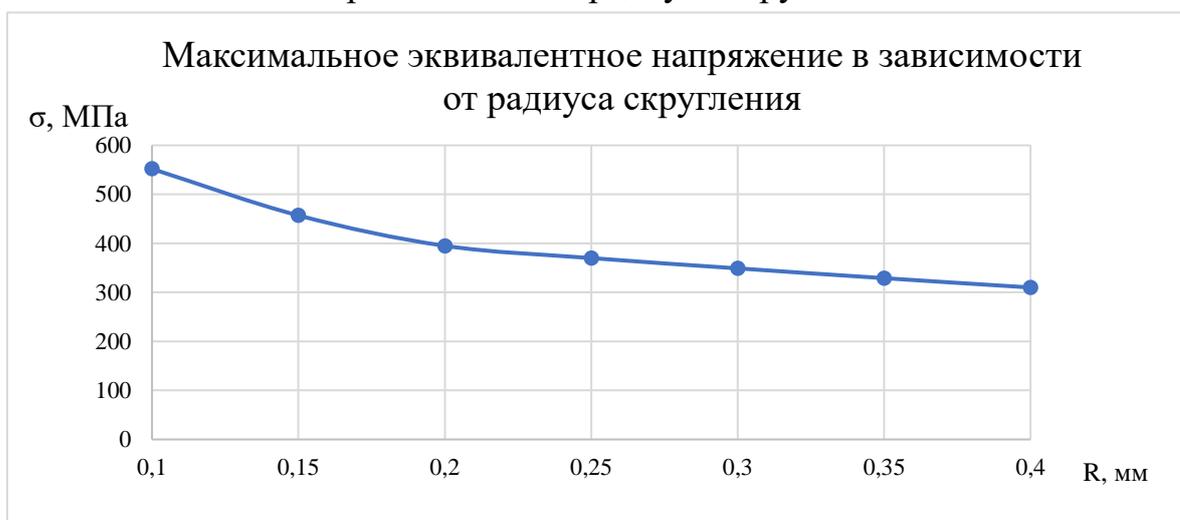


Рис.4.15. Максимальное эквивалентное напряжение в зависимости от радиуса скругления

4.2. Анализ температурных напряжений в полупроводниковом датчике на КНС в программном комплексе ANSYS

Исследуемый тензопреобразователь давления рассчитан на широкий диапазон температур (-60...+150°C). К тому же упругие свойства материалов нелинейно зависят от температуры. В связи с этим целесообразно провести расчет с учетом влияния температуры окружающей среды. При проведении численного моделирования нагрузка прикладывалась в два шага. На первом шаге была приложена температура. В дальнейшем результат использовался как предварительное напряженное состояние к началу второго шага. Результаты численного моделирования ТП с учетом температуры окружающей среды и прикладываемого давления приведены на рис. 4.16.

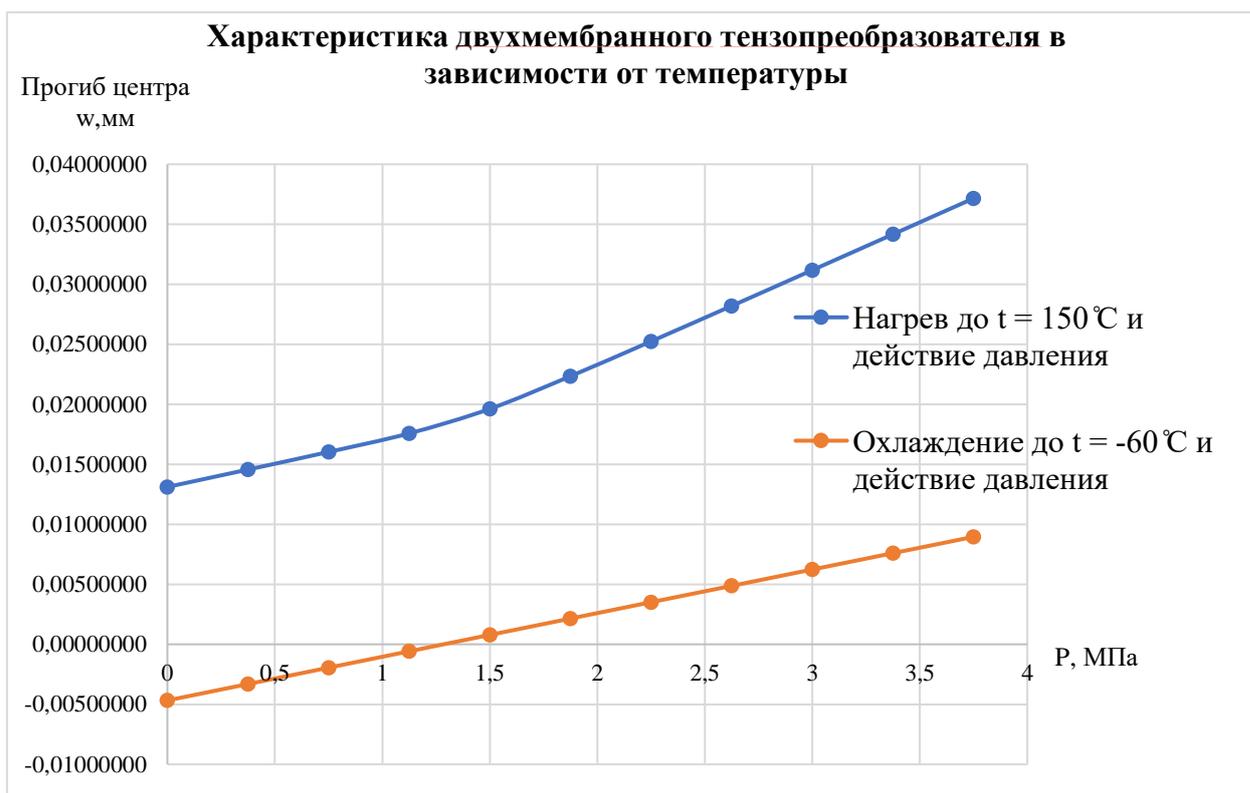


Рис. 4.16. Характеристика двухмембранного тензопреобразователя в зависимости от температуры

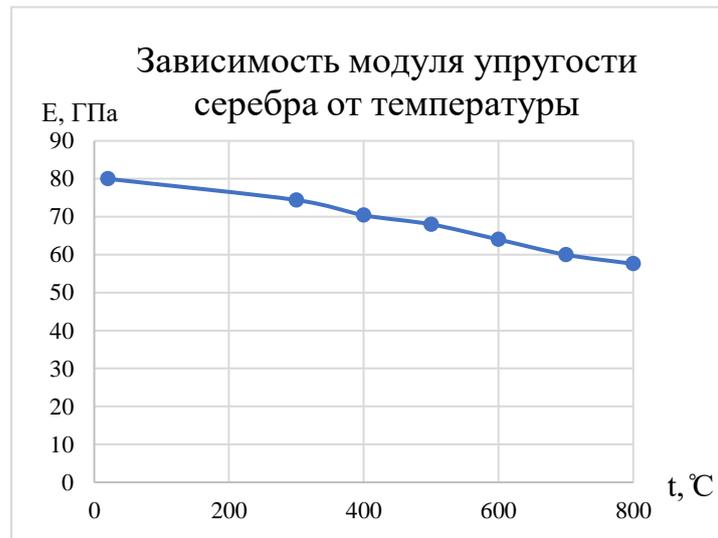
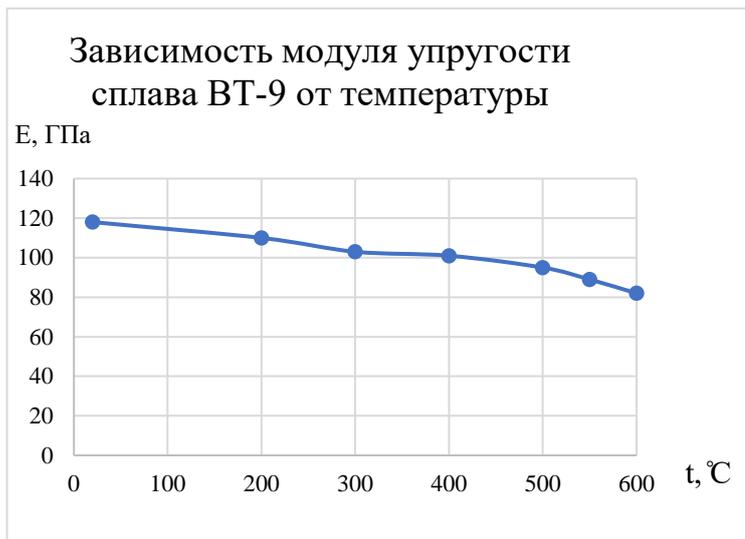
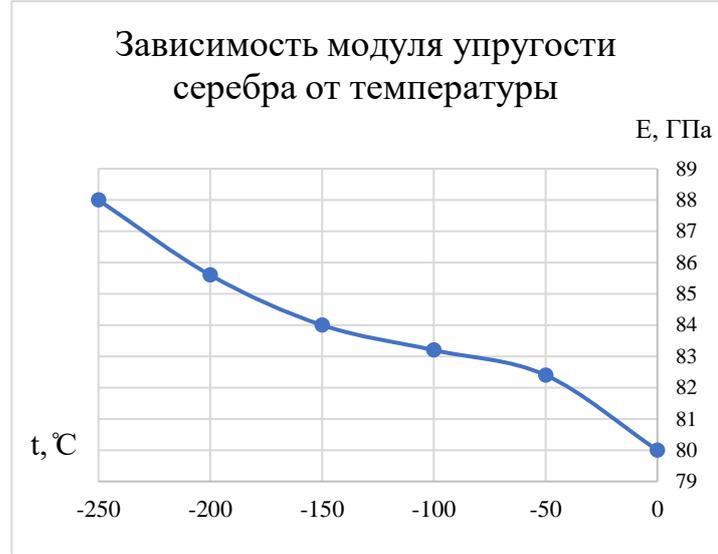
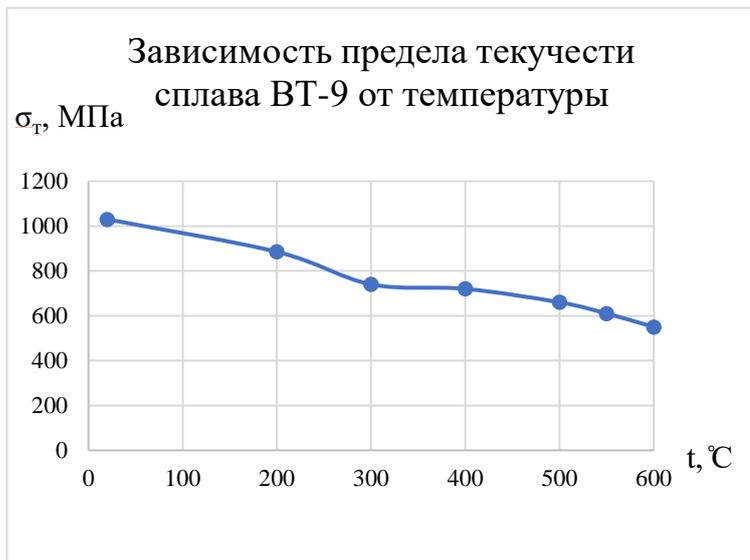
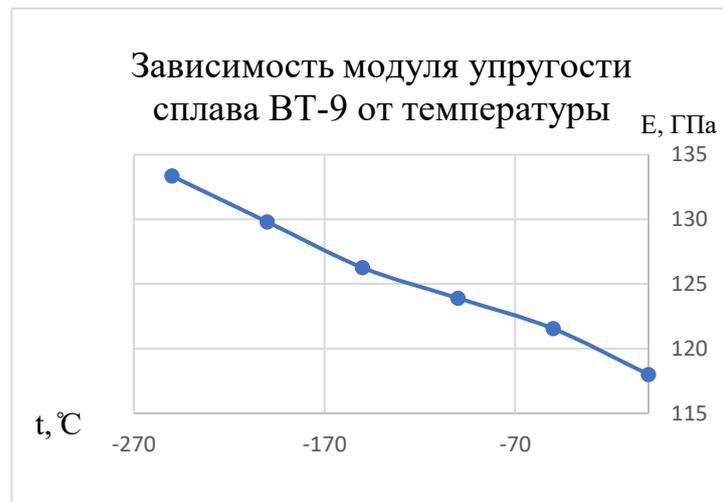
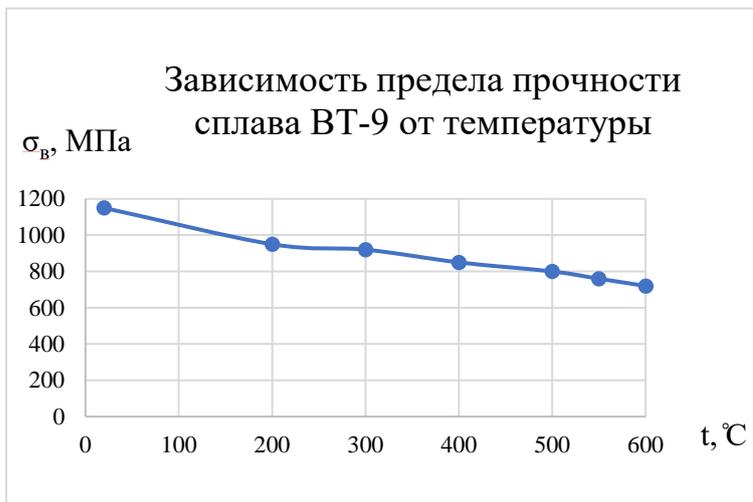


Рис.4.17. Зависимость упругих и прочностных свойств материалов от температуры

4.3. Выводы по главе

1. В параметрическом виде построена модель серийно-выпускаемого тензопреобразователя давления на структуре КНС и проведен прочностной расчет.
2. Определено значение максимального эквивалентного напряжения, возникающего в конструкции УЭ тензодатчика на КНС при действии давления 1,25 от номинального. Величина напряжения составила 439 МПа.
3. Получено распределение радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности УЭ и определено наилучшее место расположения тензорезистора.
4. Выявлена сильная зависимость разности радиальной и тангенциальной деформаций от геометрических особенностей конструкции (радиус скругления внутренних поверхностей, толщина штока и мембраны).
5. Выявлена сильная зависимость выходного сигнала от допусков на размер. В предельном случае разница может достигать $\approx 20\%$.
6. Выявлена сильная нелинейность (12,04 %) выходной характеристики при действии максимальной температуры.

Глава 5. Многокритериальная оптимизация

В общем случае мы имеем дело с многокритериальными задачами проектирования полупроводниковых датчиков давления на КНС. Улучшая одни критерии, мы, как правило, ухудшаем другие. Для поиска оптимальных параметров необходимо, прежде всего, построить область допустимых решений, которая определяется ограничениями на критерии, параметры и функциональные зависимости. Из-за противоречивости критериев специалисты обычно не могут корректно сформулировать эти ограничения, в результате решаются некорректно поставленные задачи. Использование однокритериальных методов заставляет специалистов искажать исходную постановку задачи: подгонять реальные многокритериальные задачи под один «самый важный» критерий, строить необоснованные свертки критериев и т.п.

Для решения задачи многокритериального проектирования необходимо ввести следующие понятия: пространство параметров, функциональные ограничения, критерии качества.

Пространством параметров называется n -мерное пространство, состоящее из точек A с координатами $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Таким образом, каждой точке A пространства параметров соответствует конкретный набор параметров $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Как правило, разработчики полупроводниковых датчиков на КНС могут указать разумные пределы изменения каждого из параметров. Данные пределы являются параметрическими ограничениями для рассматриваемого объекта.

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}, j=1, 2, \dots, n \quad (5.1)$$

Данные ограничения выделяют в пространстве параметров параллелепипед Π (рис.), n -мерный объем которого равен произведению:

$$V_{\Pi} = (\alpha_1^{**} - \alpha_1^*) \dots (\alpha_n^{**} - \alpha_n^*) \quad (5.2)$$

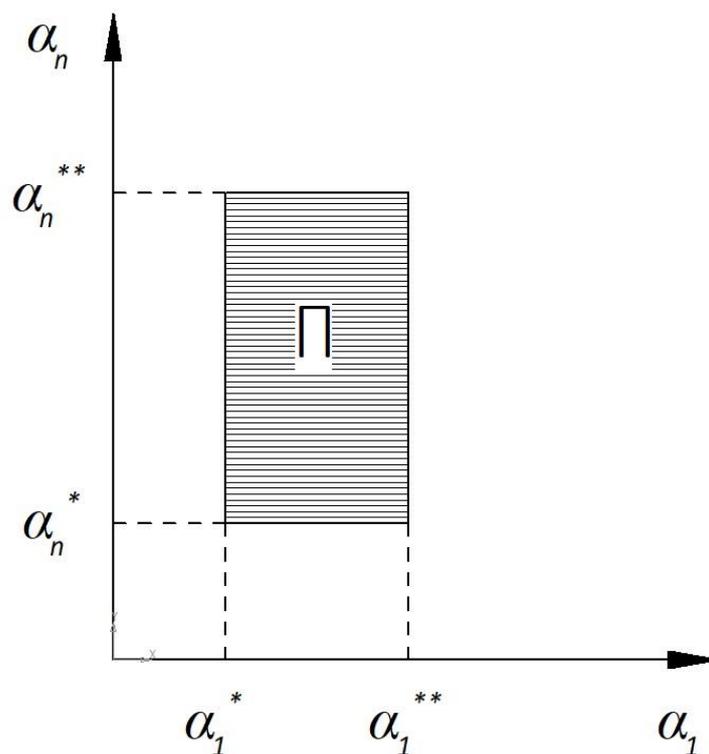


Рис.5.1. Параллелепипед Π в пространстве параметров

При реализации методики многокритериального проектирования для нас представляют интерес только точки A , которые принадлежат параллелепипеду Π . Системы, параметры которых удовлетворяют ограничениям (5.1) как раз и соответствуют данным точкам. Анализ параллелепипеда Π конечным числом пробных точек является основой метода исследования пространства параметров. При расширении границы параметрических ограничений объём Π увеличивается и для исследования может понадобиться значительно большее число пробных точек.

Функциональные ограничения также включаются в условие задачи наряду с параметрическими:

$$c_l^* \leq f_l(A) \leq c_l^{**} \quad (l=1, 2, \dots, t) \quad (5.3)$$

Здесь $f_l(A)$ – некоторые функции от параметров $A: (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Они обычно заданы явно. Если система описывается дифференциальными уравнениями, то $f_l(A)$ зачастую являются функционалами, зависящими от

интегральных кривых этих уравнений. Принято считать, что все функции $f_i(A)$ непрерывны в Π .

Подмножество параллелепипеда Π , состоящее из точек A , которые удовлетворяют ограничениям 5.3 обозначим G , рис.5.2.

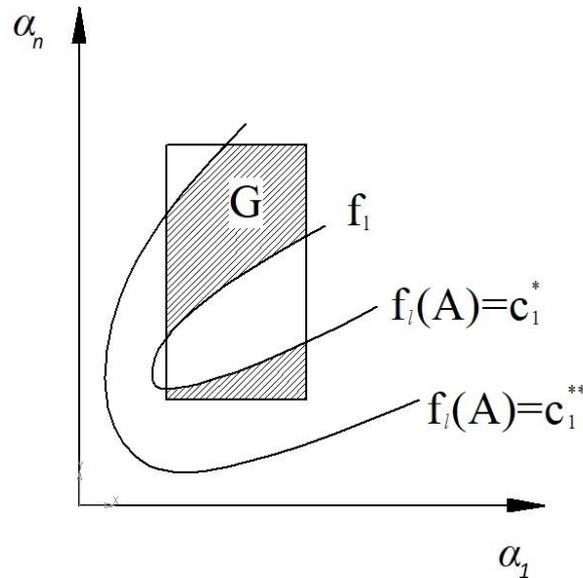


Рис.5.2. Множество G в параллелепипеде Π

При этом G может быть любым замкнутым множеством, для которого выполняется ограничение: объем G должен быть положительным ($V_G > 0$). Под критерием качества понимается характеристика системы, связанная с качеством монотонной зависимостью. Чем меньше (больше) критерий, тем лучше система, при прочих равных условиях. Для упрощения записи принято считать, что все заданные критерии $\Phi_1(A), \dots, \Phi_k(A)$ требуется уменьшить:

$$\Phi_v(A) \rightarrow \min. \quad (5.4)$$

Математическая формулировка оптимизационной задачи вызывает трудности, потому что критерии зачастую противоречат друг другу. В частности, при уменьшении толщины мембраны полупроводникового датчика давления на КНС мы уменьшаем массу изделия и увеличиваем чувствительность к измеряемому давлению, но в то же время снижаем прочность изделия.

В отдельных случаях расчетчики сводят процесс оптимизации к выбору одного решающего критерия качества $\Phi(A)$, который должен учитывать важность и значение каждого из индивидуальных критериев $\Phi_1(A), \dots, \Phi_k(A)$. Следует отметить, что проблема замены нескольких критериев одним – достаточно сложная и зачастую неразрешимая. В большинстве реальных задач такой подход себя не оправдывает, т.к. при грубом выборе $\Phi(A)$ решение математической задачи об отыскании точки \bar{A} , в которой

$$\Phi(\bar{A}) = \min_{A \in G} \Phi(A), \quad A \in G \quad (5.5)$$

оказывается практически плохим из-за того, что некоторые из значений $\Phi_v(\bar{A})$ превышают допустимые (по мнению проектировщиков) пределы. Чтобы избежать такой ситуации, необходимо ввести критериальные ограничения:

$$\Phi_v(A) \leq \Phi_v^{**} \quad (v=1, 2, \dots, k). \quad (5.6)$$

Критериальное ограничение Φ_v^{**} – это худшее значение критерия $\Phi_v(A)$, которое проектировщик считает приемлемым.

Обозначая D как множество точек A , удовлетворяющих ограничениям 2.1, 2.2, 2.3, $D \in G \in \Pi$, можно назвать D множеством допустимых точек, т.к. при формулировке задачи об отыскании точки \bar{A} такой, что

$$\Phi(\bar{A}) = \min_{A \in D} \Phi(A), \quad (5.7)$$

то решение этой задачи всегда существует и конструктора устраивает: как бы ни был выбран решающий критерий $\Phi(A)$, все значения $\Phi_v(A)$ удовлетворяют ограничениям 5.6. Таким образом получается, что главная трудность при переходе к математической задаче состоит в выборе критериальных ограничений Φ_v^{**} и в обеспечении непустоты множества допустимых точек D .

Обоснованный выбор критериальных ограничений невозможен без предварительного исследования системы: необходимо определить

возможности системы по каждому из критериев в области G и, в частности, представлять себе диапазоны изменения каждого из критериев.

В данной работе проведение многокритериальной оптимизации проводилось по методу исследования пространства параметров. Исследование области пространства параметров осуществлялось на основе ЛП $_{\tau}$ последовательности.

Последовательность точек $P_1 \dots P_i, \dots$ называется равномерно распределенной в n -мерном кубе K^n , если для любого параллелепипеда Π

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n(P)}{N} = V_{\Pi} \quad (5.8)$$

где $S_n(\Pi)$ – количество точек P_i с номерами $1 \leq i \leq N$, принадлежащих Π ;

V_{Π} – объем (n -мерный) параллелепипеда Π .

ЛП $_{\tau}$ последовательностью называется последовательность точек $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots, P_0$, n -мерного куба K^n , если любой её двоичный участок, содержащий не менее чем $2^{\tau+1}$ точек, представляет собой Π_{τ} сетку. Фраза «последовательность, любой двоичный участок которой представляет собой Π_{τ} -сетку» и образует при сокращении название ЛП $_{\tau}$.

ЛП $_{\tau}$ последовательности нашли широкое применение в различных задачах: многокритериальная оптимизация, моделирование физических и экономических процессов, случайный поиск, вычисление многомерных интегралов. ЛП $_{\tau}$ последовательности, которые впервые были описаны в работах И.М. Соболя, предназначались изначально для расчета многомерных интегралов. Позже ЛП $_{\tau}$ последовательности нашли применение для реализации поисковых процедур.

Более наглядно структура многокритериальной оптимизации представлена на рис.5.3.

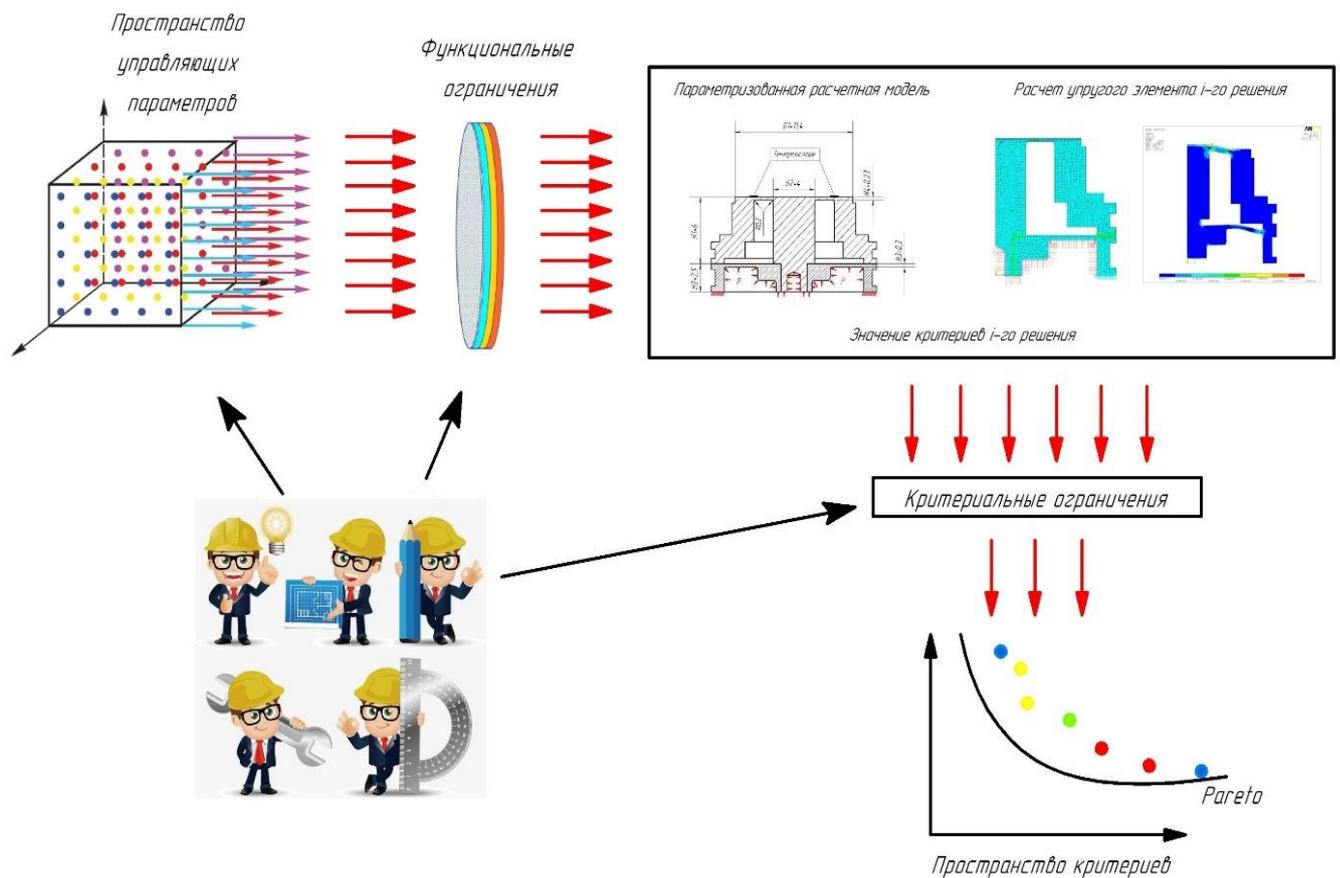


Рис.5.3. Схема многокритериальной оптимизации

5.1. Алгоритм оптимизации

Оптимизация исследуемого тензопреобразователя осуществляется в 2 этапа. В данной работе оптимизация осуществляется из предположения, что тензорезисторы имеют размер 1 x 1 мм и воспринимают только радиальную или тангенциальную деформацию. Размер тензорезистора используется только для определения области на мембране, в которой могут быть расположены ТР. Оптимизация также осуществляется из предположения, что деформацию воспринимает только центр базы ТР. На первом этапе, на основе ЛП_т последовательно генерируется вариант конструкции в параметрическом виде. Затем данный вариант конструкции проходит прочностной расчет в программном комплексе ANSYS. Решение происходит в геометрически линейной постановке с целью определения максимального сигнала, который возможно получить при данном расположении тензорезисторов в мостовой схеме. После проведения расчета в ANSYS, в

модели выбираются узлы, принадлежащие линии, на которой планируется размещение тензорезисторов. Из этих узлов отбираются те, на которых ТР будут расположены, не пересекаясь друг с другом и не вылезая за край мембраны.

Далее вводятся четыре переменные: - наилучшее расположение ТР растяжения; наилучшее расположение ТР сжатия; наилучшая ориентация ТР растяжения; наилучшая ориентация ТР сжатия. Выбранные узлы сортируются по критерию максимальной и минимальной радиальной и тангенциальной деформации. Далее определяется максимальная и минимальная деформация. Также определяются номера узлов, в которых значение деформаций максимально и минимально. Аналогично для тангенциальных деформаций. Затем вводятся параметры: максимальная деформация растяжения и минимальная деформация сжатия. Если максимальная деформация радиальная больше, чем максимальная деформации тангенциальная, то максимальная деформация растяжения становится равной максимальной радиальной деформации и наоборот. Аналогично повторяется для минимальной деформации. В результате получаем расположение и ориентацию ТР, для получения максимального сигнала. Для получения максимального сигнала необходимо использовать ТР с максимальной деформацией, неважно какой ориентации, и ТР с минимальной деформацией, определить значение выходного сигнала. Если сигнал больше, чем минимально допустимый сигнал, то вариант конструкции отправляется на расчет в нелинейной постановке, иначе – выход и переход к другому варианту.

На втором этапе расчет производится в геометрически нелинейной постановке. Выбираем нужные узлы, а затем строим таблицу вариантов:

- Радиус наклейки;
- Ориентация;
- Деформация,
- Нелинейность деформации.

Для каждого узла строятся две таблицы: таблица для ТР растяжения и таблица для ТР сжатия. Предполагается, что максимальная нелинейность будет при 50% нагрузки. Оцениваем нелинейность. Получаем значения нелинейности для вариантов растяжения и значения нелинейности для вариантов сжатия. Затем перебираются варианты и строятся таблицы испытаний. Из всех полученных вариантов выбирается с максимальным сигналом и минимальной нелинейностью. Затем осуществляется проверочный расчет для уточнения значения нелинейности. Для лучшего понимания алгоритм оптимизации приведен на рис.5.4, 5.5.

Алгоритм оптимизации был создан на языке C#. **Программа позволяет:**

1) Задавать вариацию отдельных параметров и формировать макрос этой вариации на языке APDL. Для работы программе необходима параметризованная модель расчета.

2) Запускать макрос вариации на расчет в ANSYS в пакетном режиме без участия пользователя. Результаты вариации подхватываются программой также в автоматическом режиме.

3) Оценивать параметры качества: нелинейность выходной характеристики, максимальные эквивалентные напряжения, рабочий коэффициент передачи. Также программой осуществляется выбор рациональной позиции тензорезисторов на поверхности упругого элемента.

В процессе оптимизационного расчета было рассчитано 200 вариаций, количество допустимых вариаций составило 169, из них Парето-оптимальных 27. В результате расчета были получены варианты конструкций тензопреобразователя, превосходящие исходный вариант по всем параметрам качества. Интерфейс программы показан на рис. 5.6 - 5.9

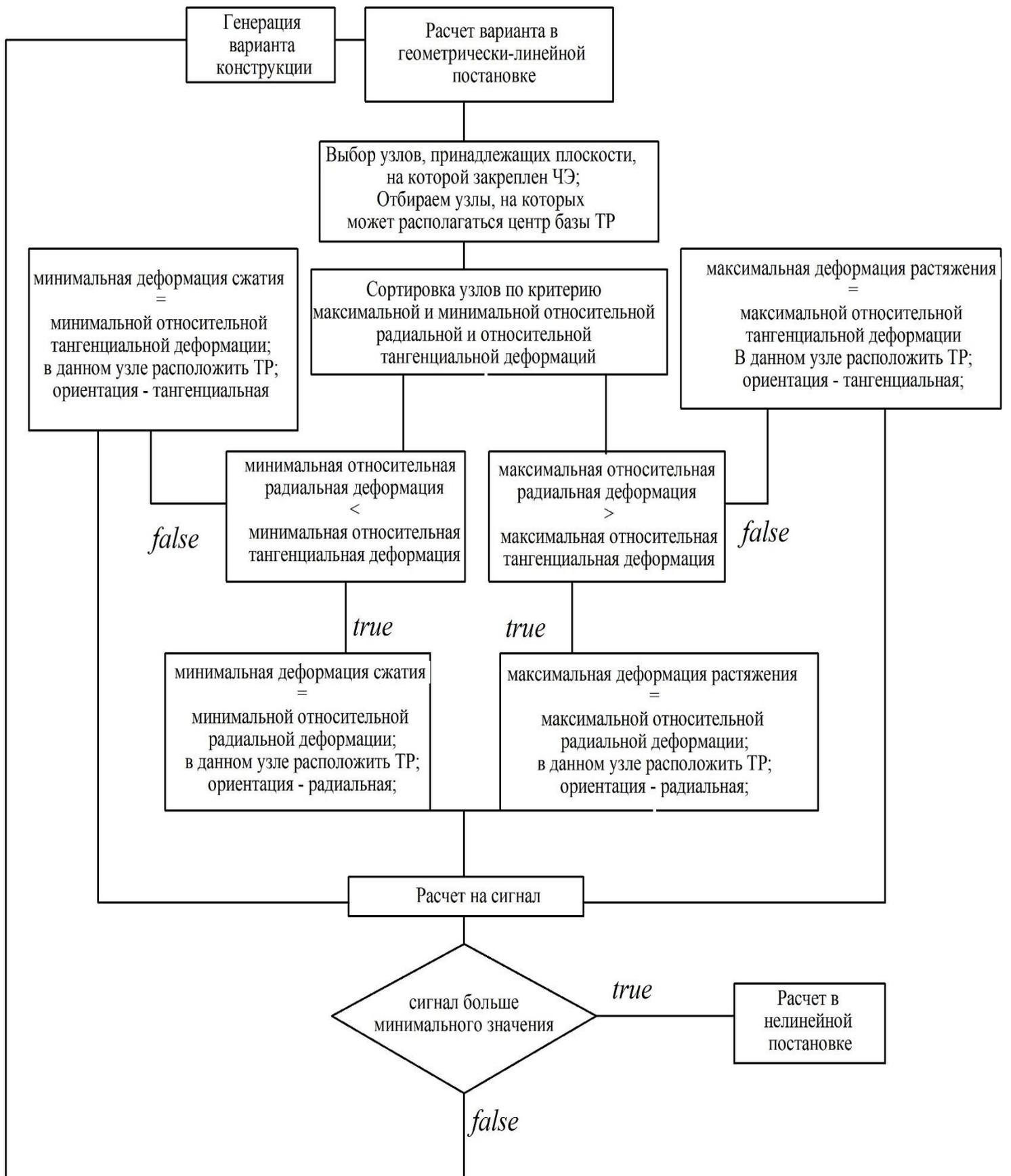


Рис.5.4. Первый этап алгоритма оптимизации

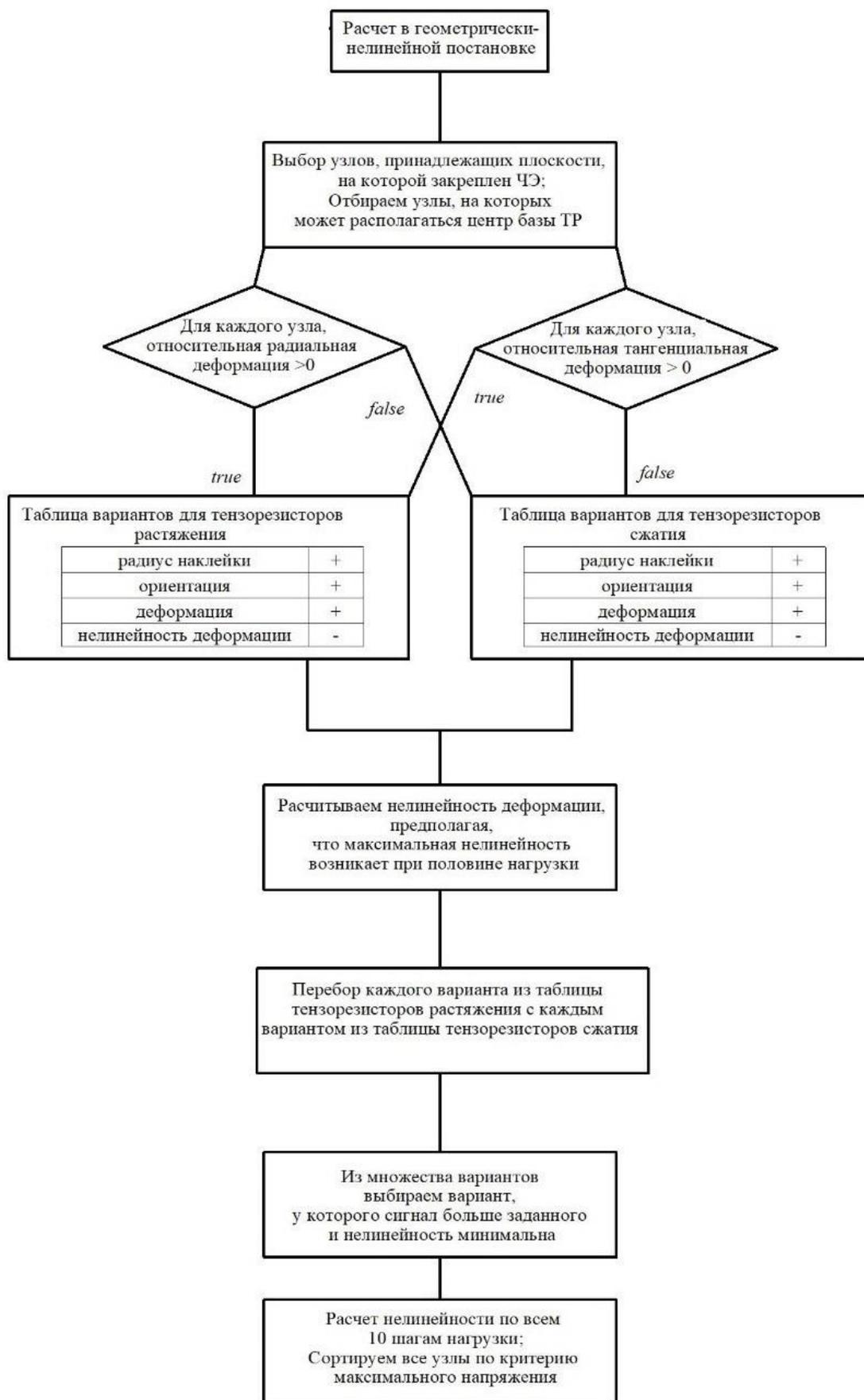


Рис.5.5. Второй этап алгоритма оптимизации

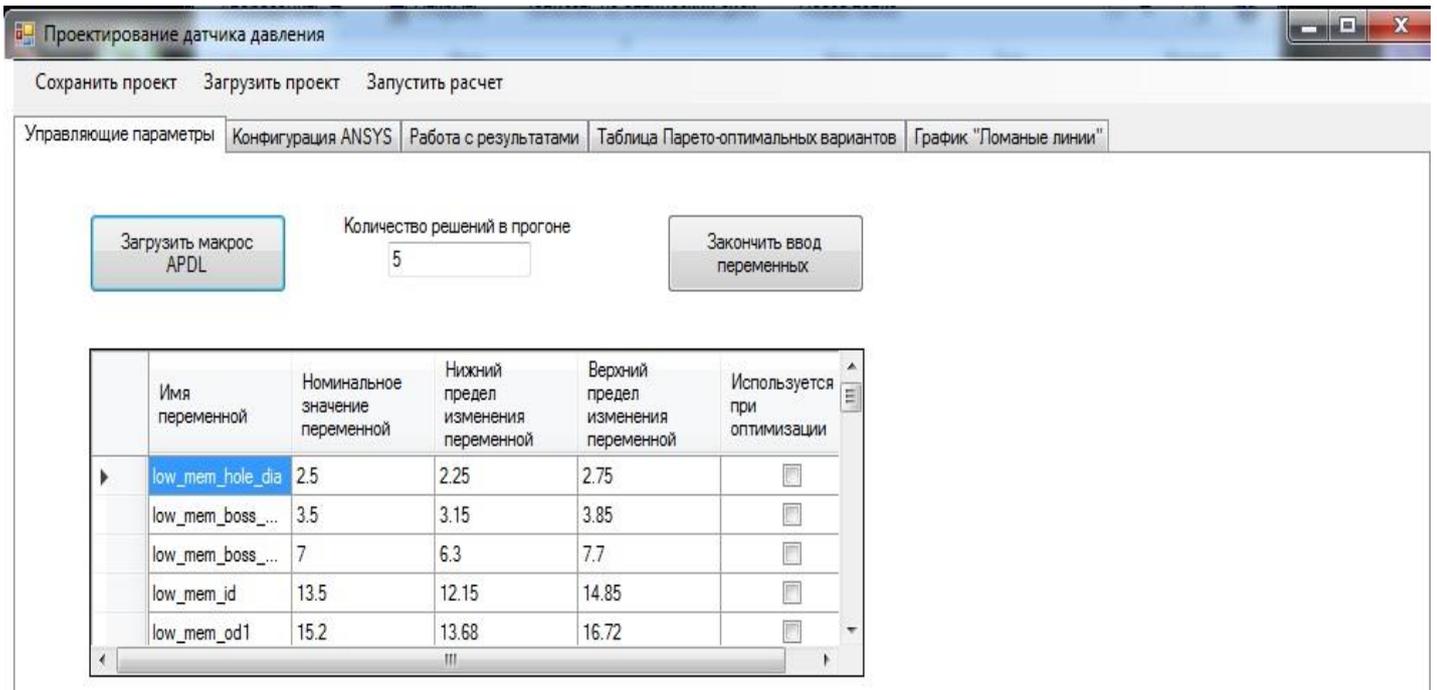


Рис.5.6. Изображение интерфейса программы. Окно ввода диапазона изменения параметров управления

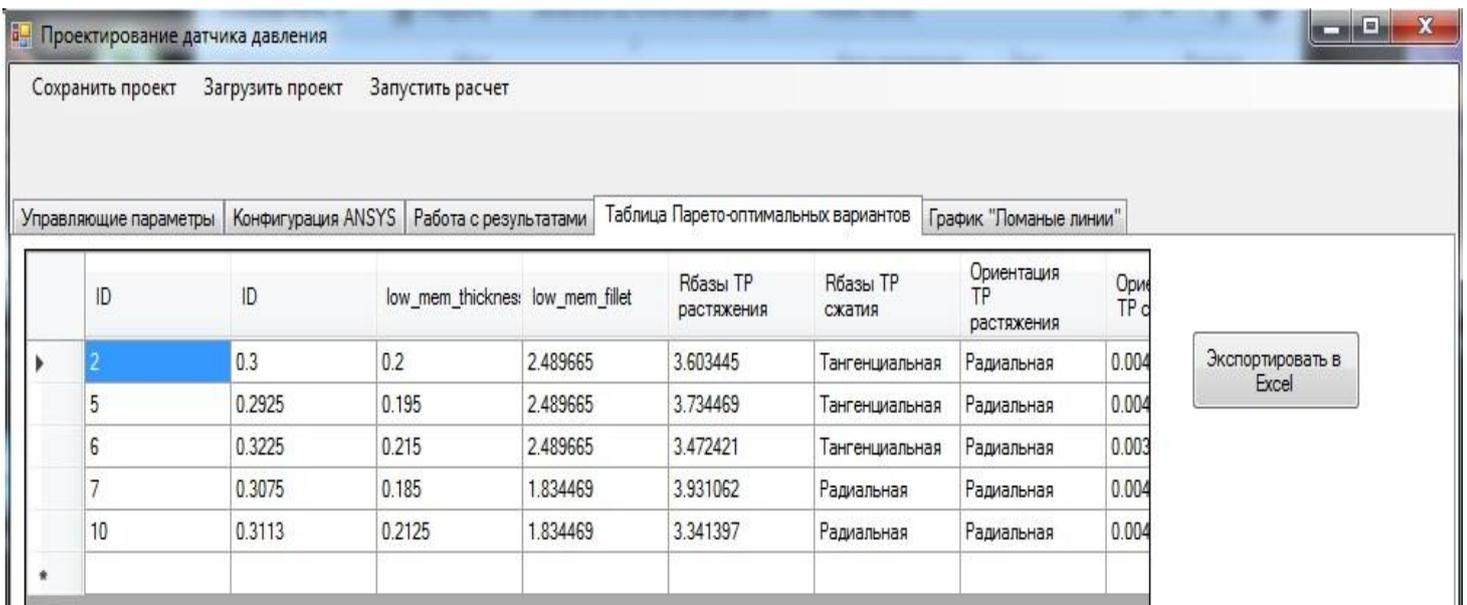


Рис.5.7. Изображение интерфейса программы. Параметры полученных в ходе оптимизации Парето-оптимальных решений

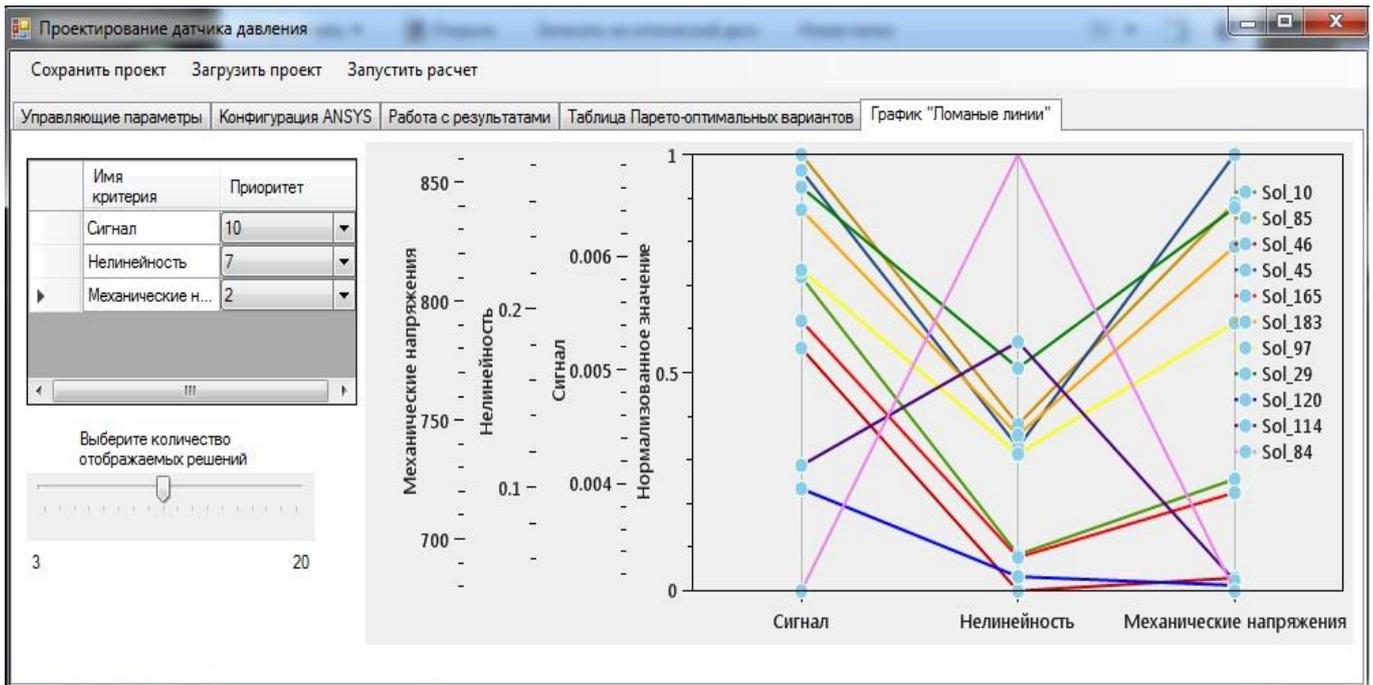


Рис.5.8. Изображение интерфейса программы. Графическая визуализация полученных вариантов

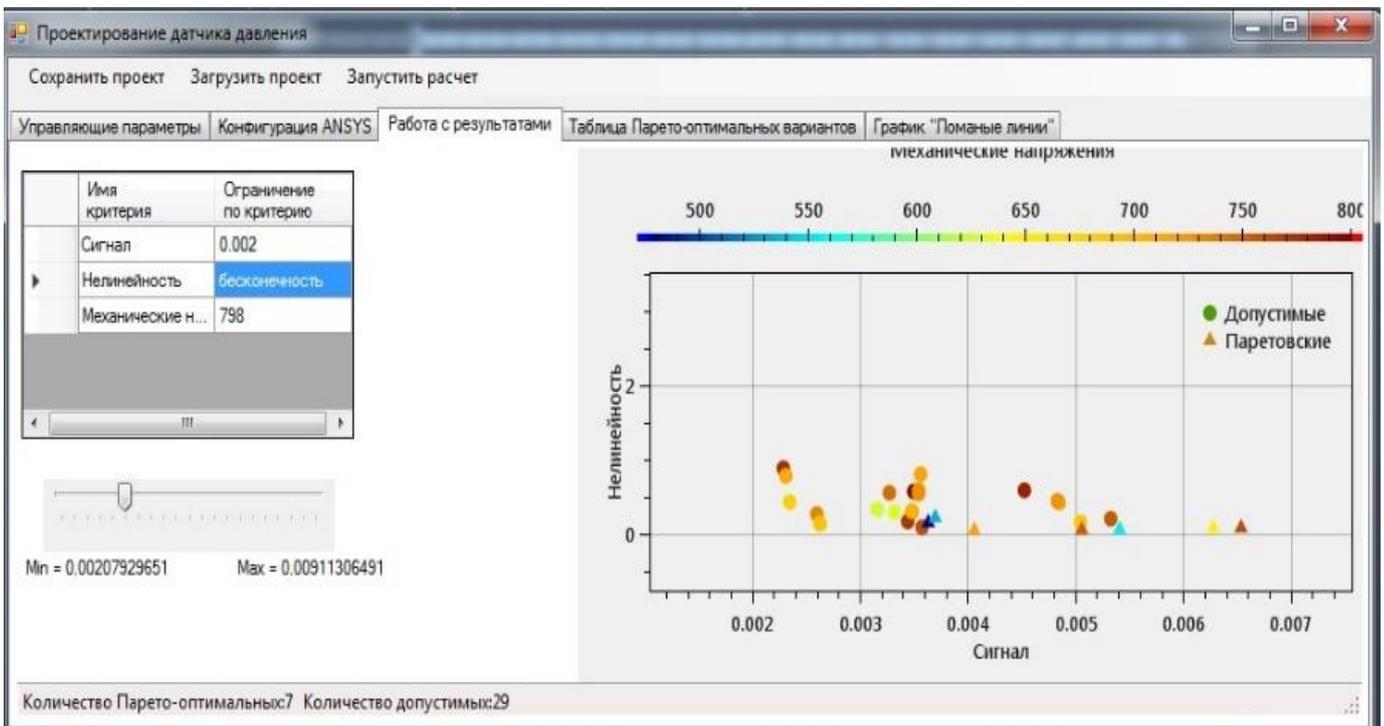


Рис.5.9. Изображение интерфейса программы. Множество допустимых решений

5.2. Выводы по главе

1. Создана авторская методика многокритериальной оптимизации и проектирования упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре кремний на сапфире.
2. Методика реализована в виде авторской программы на языке C#. Программа позволяет: задавать диапазон изменения параметров управления и указывать количество пробных точек в n-мерном пространстве параметров управления, генерировать в пакетном режиме макрос на языке APDL, запускать макрос на расчет в ANSYS, оценивать параметры качества и представлять их пользователю. В программе имеется возможность экспорта данных для дальнейшей работы.
3. При решении задачи многокритериальной оптимизации было рассчитано 200 вариантов конструкций, из них допустимых оказалось 169, Парето-оптимальных 27. Парето-оптимальные варианты передаются лицу принимающему решение для выбора рациональной конструкции.

Глава 6. Результаты многокритериальной оптимизации

В результате оптимизационного расчета, выполненного с помощью авторской программы, были получены варианты конструкции ТП на КНС, которые превосходят исходный вариант по всем параметрам качества, таблица 4.

Таблица 4. Сравнение вариантов конструкций

Параметры качества	Базовый вариант конструкции	Парето-оптимальный вариант №1	Парето-оптимальный вариант №2	Парето-оптимальный вариант №3
$\sigma_{\text{экв макс}}$, МПа	798	841,4	683,6	678
Изменение $\sigma_{\text{экв макс}}$ по сравнению с базовым вариантом конструкции, %	-	5,43	14,33	15,04
Нелинейность выходной характеристики, %	0,39	0,135	0,042	0,29
Изменение нелинейности по сравнению с базовым вариантом конструкции, %	-	65	89	25,6
Рабочий коэффициент передачи, мВ/В	4,6	6,9	5,2	3,0
Изменение рабочего коэффициента передачи по сравнению с базовым вариантом конструкции, %	-	50	13	35

В ходе оптимизационного расчета было рассчитано 200 вариантов конструкций, из них 7 получились Парето-оптимальными. Ниже приводятся данные по управляющим параметрам для Парето-оптимальных вариантов.

Таблица 4. Сравнение управляющих параметров исходной конструкции с варианта с полученными Парето-оптимальными вариантами

Управляющие параметры	Базовый вариант конструкции	Парето-оптимальный Вариант №1	Парето-оптимальный вариант №2	Парето-оптимальный вариант №3
H2, мм	2.5	2.47	2.68	2.43
H3, мм	0.3	0.28	0.33	0.32
H4, мм	0.23	0.208	0.25	0.25
D1, мм	11.4	11.52	11,5	11,8
D2, мм	4	4.1	4.26	4,2

Наиболее предпочтительным для разработчиков является вариант №1. Также в процессе расчета было выявлено, что необходимо изменить расположение ТР на поверхности ЧЭ рис. 6.1. Уменьшение размера ПЧЭ благоприятно скажется и на экономической составляющей производства. Так, если за рабочий день производится в среднем 80 датчиков, то за год количество датчиков $\approx 247 \text{ раб дней} * 80 \text{ датчиков / день} = 19760 \text{ датчиков}$. Стоимость одной пластины КНС диаметром 76 мм составляет 5000 рублей, среднее количество элементов, которое возможно с неё получить при такой топологии ПЧЭ – 35 штук. Тогда стоимость 1 элемента составляет $5000 \text{ руб.} / 35 \text{ шт.} \approx 143 \text{ руб./шт.}$ Оптимизация размеров ПЧЭ позволит получить с одной пластины ≈ 50 ПЧЭ, в таком случае стоимость 1 элемента составит 100 руб.

За один год использование оптимизированной топологии позволит предприятию сэкономить примерно 850 000 рублей.

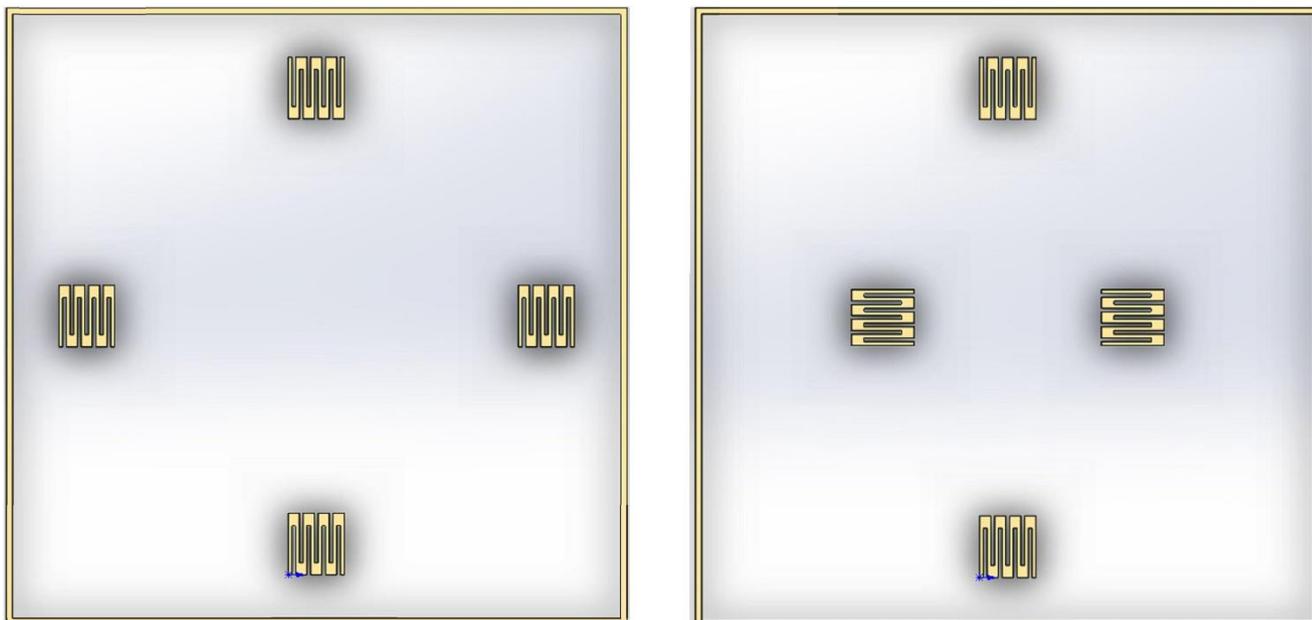


Рис. 6.1. Слева - исходная конструкция ПЧЭ, справа – полученная в результате оптимизации. Размер ПЧЭ 10x10 мм.

6.1. Экспериментальная проверка достоверности результатов

В данной главе приведены результаты экспериментального исследования партии датчиков, имеющих геометрию Парето-оптимального варианта, полученного в ходе оптимизационного расчета.

Все испытания тензопреобразователей, если их условия не оговариваются при описании отдельных методов испытаний, проводятся при следующих нормальных условиях:

- 1) температура окружающей среды $(23\pm 5)^\circ\text{C}$; тензопреобразователи должны быть выдержаны при указанной температуре до начала испытаний не менее 30 мин; температура должна контролироваться с погрешностью не более 1°C ;
- 2) относительная влажность окружающего воздуха от 30 до 80 %;
- 3) атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм. рт. ст.);
- 4) вибрация, тряска, удары, электрические и магнитные поля, кроме земного, должны отсутствовать;

- 5) питание осуществляется стабилизированным постоянным током ($1,5 \pm 0,001$) мА. Нестабильность тока питания должна быть не более 0,001 мА;
- б) тензопреобразователи должны быть выдержаны при включенном питании до начала испытаний не менее 10 мин.

Проверка влияния изменения температуры окружающего воздуха производится в камере тепла (холода) без перестановки тензопреобразователя. Тензопреобразователь выдерживается при установленной температуре не менее 1 ч. Температура в камере контролируется с погрешностью ± 2 °С.

Проверка сопротивления моста R_m при нормальных условиях проводится по схеме, представленной на рис. Величина сопротивления тензомоста должна быть в диапазоне от 2,3 кОм до 4,85 кОм. Источник питания тензопреобразователя должен быть выключен. Сопротивление моста измеряют по прибору PV-2 в режиме измерения сопротивления. Проверку начального значения выходного сигнала U_0 проводят по вольтметру PV2, после установки питания по вольтметру PV1, при значении давления равным нулю.

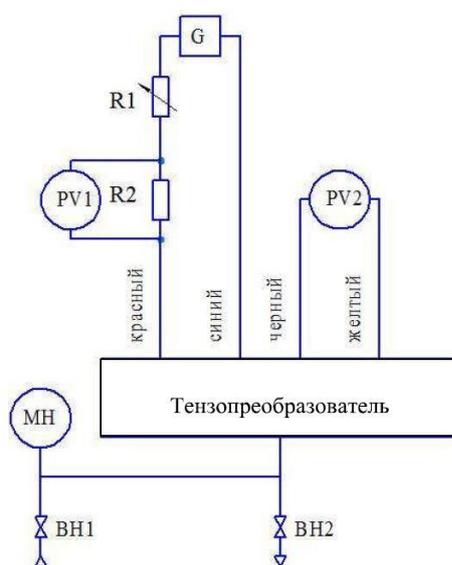


Рис.6.2. Схема измерения электрических характеристик тензопреобразователей PV1, PV2 – вольтметры, G – источник питания, R1, R2 – магазины сопротивлений, МН – манометр образцовый, ВН1, ВН2 – вентили

Начальное значение выходного сигнала не должно превышать значения 5 мВ. Проверка диапазона изменения выходного сигнала U_d проводится по схеме, представленной на рис.6.2 в следующей последовательности: после установки питания по вольтметру PV1 измеряют по вольтметру PV2 значения выходного сигнала при значениях измеряемого давления, равных 0, 50, 100% его номинального значения при прямом и обратном ходе.

Температуры окружающего воздуха при проверках на прямом и обратном ходе не должны отличаться друг от друга более чем на 1 °С. Диапазон изменения выходного сигнала U_d определяется по формуле:

$$U_d = U_{\max} - U_0, \quad (6.1)$$

где U_0 – величина начального значения выходного сигнала, измеренного при питании постоянным током, мВ U_{\max} – величина выходного сигнала при номинальном значении измеряемого давления и питания постоянным током, мВ. Проверку вариации выходного сигнала γ_v определяют как разность между значениями выходного сигнала, при значениях измеряемого давления равного 0, 50, 100%, соответствующими одному и тому же значению измеряемого параметра при прямом и обратном ходе, и выраженная в процентах от диапазона изменения выходного сигнала. Вариацию выходного сигнала γ_v определяют по формуле:

$$\gamma_v = \frac{U_{ox} - U_{пх}}{U_d} \cdot 100\%, \quad (6.2)$$

где U_{ox} – выходной сигнал при обратном ходе,

$U_{пх}$ – выходной сигнал при прямом ходе;

U_d – диапазон выходного сигнала.

Нелинейность выходного сигнала γ_n определяют по результатам методики для проверки диапазона изменения выходного сигнала. Измерения производят при прямом и обратном ходе. При приёмно-сдаточных испытаниях нелинейность выходного сигнала, выраженную в процентах от его диапазона

определяют в точке, соответствующей 50% номинального значения измеряемого давления по формуле:

$$\gamma_H = 0,5 \left| \frac{U_c - U_0}{U_d} - \frac{P}{P_{\text{НОМ}}} \right| \cdot 100\%, \quad (6.3)$$

$$\text{где } U_c = \frac{U_{\text{пх}} + U_{\text{ох}}}{2},$$

$U_{\text{пх}}$ – значение выходного сигнала при давлении, равном 50% номинального значения, при прямом ходе при 23°C;

$U_{\text{ох}}$ – значение выходного сигнала при давлении равном 50% номинального значения, при обратном ходе при 23°C.

Проверка влияния воздействия кратковременной перегрузки давлением производится следующим образом. Для тензопреобразователей определяют значение выходного сигнала при нулевом значении измеряемого давления, затем повышают давление до предельного значения. Выдерживают тензопреобразователь под этим давлением в течение 15 мин, сбрасывают давление до нуля и вновь определяют значения выходного сигнала при нулевом значении измеряемого давления. Изменение начального значения выходного сигнала тензопреобразователя до и после воздействия перегрузки не должно превышать 0.15 % его диапазона. Если изменение начального значения выходного сигнала превышает указанную величину, то тензопреобразователь выдерживают без давления в течение 4 часов и вновь проверяют начальное значение выходного сигнала. Изменение начального значения выходного сигнала до воздействия перегрузки и после 4-х часовой выдержки не должно превышать 0,15 %.

Лучшей проверкой результатов работы является экспериментальное подтверждение полученных данных. Для эксперимента была изготовлена пробная партия датчиков в количестве 40 штук. В ходе эксперимента определялись два основных параметра качества: нелинейность и выходной сигнал. Результаты эксперимента представлены на рис.6.3,6.4.

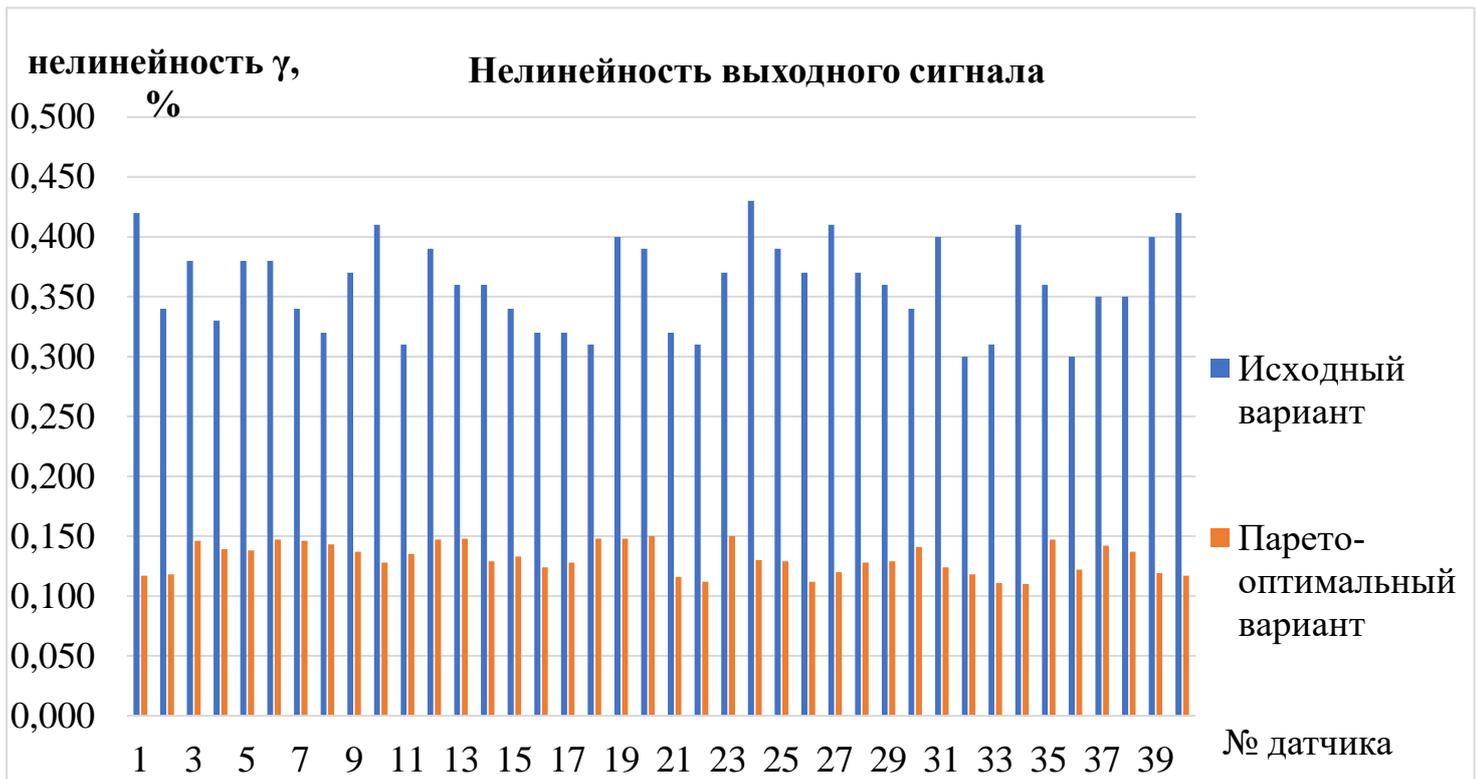


Рис.6.3. Сравнительный анализ по величине нелинейности выходного сигнала серийно-выпускаемого и полученного в ходе оптимизационного расчета датчиков давления



Рис.6.4. Сравнительный анализ по величине выходного сигнала серийно-выпускаемого и полученного в ходе оптимизационного расчета датчиков давления

Эксперимент проводился на оборудовании для серийно-выпускаемых датчиков давления рис.6.5.



Рис.6.5. Испытание датчиков в камере тепла(холода)

Как уже говорилось ранее, несмотря на уточнение методики расчета, при технологическом процессе возникает ряд неотъемлемых погрешностей, которые требуют трудоёмкой настройки датчика. Наибольшую сложность представляет процесс подбора балансирующего сопротивления и сопротивления шунта, которые вводятся в тензомост для устранения эффекта начального дрейфа нуля.

6.2. Выводы по главе

1. На основе многокритериальной оптимизации осуществляется выбор рациональной конструкции упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре «кремний на сапфире». Выбранный вариант конструкции имеет следующие параметры качества: максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв макс}} = 841,4$ МПа, нелинейность выходной характеристики 0,135 %, рабочий коэффициент передачи 6,9 мВ/В.

2. На основании проведенного расчета становится возможным изменить топологию полупроводникового чувствительного элемента на структуре КНС, что позволит получить экономию средств на производство в размере 850 000 рублей в год.

3. Результаты расчета легли в основу создания новой партии датчиков, обладающих улучшенными параметрами качества. Средний выходной сигнал по партии новых датчиков составил 208,5 мВ, по партии серийно-выпускаемых датчиков составил 145 мВ. Средняя величина нелинейности выходного сигнала по партии новых датчиков 0,132 %, по партии серийно-выпускаемых датчиков 0,361 %.

Выводы по работе

1. В работе проведен прочностной расчет упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире» по аналитическим выражениям и в программном продукте ANSYS. Получены: значение максимального эквивалентного напряжения на поверхности чувствительного элемента 439 МПа, прогиб центра чувствительного элемента 0,0138 мм, распределение радиальной и тангенциальной деформаций по поверхности ЧЭ. Определено место наилучшего расположения тензорезистора.
2. Экспериментально исследована структура КНС. Определена толщина кремниевого слоя 0,8 мкм, сапфировой подложки 68,69 мкм. Определены максимальные напряжения, возникающие при эпитаксии: в слое кремния 607 МПа, в сапфировой подложке 19 МПа. Напряжения такой величины в слое кремния свидетельствуют о превышении предела текучести кремния, что приводит к зарождению дислокаций несоответствия.
4. Экспериментально исследован сплав, состоящий из 72 % серебра и 28 % меди, и определены его прочностные характеристики: $E = 88$ ГПа, предел прочности $\sigma_B = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа.
5. Разработана методика расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире». Методика реализована в виде авторской программы на языке C#. Рассчитано 200 вариантов, получено 27 Парето оптимальных, выбран 1 со следующими параметрами качества: максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв макс}} = 841,4$ МПа, нелинейность выходной характеристики 0,135 %, рабочий коэффициент передачи 6,9 мВ/В.
6. Создана пробная партия датчиков и проведено их экспериментальное исследование. Среднее значение выходного сигнала по партии новых датчиков составило 208,5 мВ, по партии серийно-выпускаемых датчиков составило 145 мВ. Средняя величина нелинейности выходного сигнала по партии новых датчиков 0,132 %, по партии серийно-выпускаемых датчиков

0,361 %. Использование оптимизированного чувствительного элемента позволит предприятию получить финансовую выгоду $\approx 850\,000$ рублей в год.

Список литературы

1. Андреев, К.А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления / К.А. Андреев, Ю.Н. Тиняков, В.А. Шахнов // Датчики и системы. – 2013. – №9. – С. 2-9.

2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1981.

3. Бабичев А.П. Бабушкина Н.А. Братковский А.М. и др. Физические величины: справочник. Под ред. Григорьева И.С. Мейлихова Е.З. – М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

4. Баринов И.Н. Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе структуры “Кремний-на-диэлектрике”: дисс. ...канд. техн. наук. Пенза, 2005. 210 с. (акцент в технологию)

5. Барулина, М.А. Математическое моделирование датчика давления в условиях механических и тепловых ударов / М.А. Барулина, В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов // Датчики и системы. – 2009. – №8. – С. 37- 39.

6. Басов К.А. Ansys: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

7. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Вергазов И. Р., Громков Н. В., Москалёв С. А. Датчики давления с частотным выходным сигналом на основе нано и микроэлектромеханических систем с уменьшенным влиянием температуры // НиКа. 2010.

8. Бинь Ф.В. Методика многокритериального управления процессом автоматизированного проектирования пильного блока лесопильного станка: дисс ... канд. Техн. Наук. Москва. 2017. 178 с.

9. Бычков В.В. Высокоточные аналоговые и цифровые измерительные преобразователи давления: дисс. ...канд. техн. наук. Томск, 2006. 232 с.

10. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 132 с.

11. Валишвили Н.В., Гаврюшин С.С. Сопротивление материалов и конструкций. М.: Изд-во Юрайт, 2017. – 420с.

12. Волков В. С., Баринов И. Н., Дарвин В. Ю. Микрооптомеханический преобразователь на основе карбида кремния для высокотемпературных датчиков давления // Международный симпозиум «Надежность и качество»: труды. НиКа. 2012.

13. Волков В. С., Французов М. В., Рыблова Е. А. Аналитическое и численное моделирование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2 (16). С. 110–117.

14. Волохов И.В. Технологические методики повышения стабильности параметров тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2008. 143 с.

15. Гаврюшин С.С. Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. №12. С. 22 – 32.

16. Гаврюшин С.С. Разработка методов расчета и проектирования упругих оболочечных конструкций приборных устройств: дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. Москва. 1994. 316 с.

17. Гаврюшин С.С. Численное моделирование процессов нелинейного деформирования тонких упругих оболочек // Математическое моделирование и численные методы. 2014. Т.1. №1. С.115–130.

18. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 479с.

19. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Исследование напряженного-деформированного состояния чувствительного элемента полупроводникового датчика давления, выполненного на структуре «кремний на сапфире» // Материалы VII международной конференции «Кристаллофизика и

деформационное поведение перспективных материалов» (2-5 октября 2017 г.): тезисы докладов. 2017. С.62.

20. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Многокритериальная оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Приводы и компоненты машин. 2018. №3-4. С.27-30.

21. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Моделирование двухмембранного преобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 15–19 февраля 2016 г.): тезисы докладов. 2016. С. 80–81.

22. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация конструкции полупроводникового тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» (КНС) // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 19–23 марта 2018 г.): тезисы докладов. 2018. С. 77–78.

23. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа» (ТПГУ, Тула 27 ноября – 1 декабря 2017 г.): тезисы докладов. 2017. С.41-48.

24. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Полупроводниковые тензопреобразователи на структуре «кремний на сапфире». Особенности расчета и проектирования // Материалы международной научно-практической конференции «Наука нового времени: Сохраняя прошлое – создаём будущее» (Санкт-Петербург 22-23 декабря 2017 г.): тезисы докладов. 2017. С.36-39.

25. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Расчет упругого элемента тензодатчика на структуре кремний на сапфире (КНС) // Автоматизация и управление в машиностроении. – М., МГТУ «СТАНКИН». 2016. №1. С.52-56.

26. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Численное моделирование тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Машиностроение и инженерное образование. 2017. №3(52). С. 56-63.

27. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Оптимизация пространственного расположения рабочих элементов в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2018. №1. С.3-8.

28. ГОСТ 22520-85 Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия. Введ. 01.07.86. М.: Изд-во стандартов, 1986. 25 с.

29. ЗАО "ОРЛЭКС". Каталог продукции. Режим доступа: http://orlex.ru/index.php?option=com_content&task=category§ionid=3&id=9&Itemid=9 (дата обращения: 29.05.2018)

30. ЗАО «МИДАУС». Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.midaus.com/katalog/preobrazovатели-davleniya.html> (дата обращения 17.04.2017).

31. ЗАО «Научно-производственный комплекс «ВИП». Каталог продукции. Режим доступа: http://www.zaovip.ru/products/pressure_transducers (дата обращения 17.04.2017).

32. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. 318 с.

33. Ильгамов М.А., Галимов Н.К. О влиянии среднего давления среды на закритический изгиб круглой пластины // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. 2018. №4. С.5-10.

34. Ильинская Л.С., Подмарьков А.Н. Полупроводниковые тензодатчики. – М.: Изд-во «Энергия», 1966. 118 с.

35. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. Ansys в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

36. Катков А.Н. Вторичные преобразователи для тензометрических датчиков давления: дисс. ...канд. техн. наук. Пенза, 2011. 182 с.
37. Клокова Н.П. Тензорезисторы. – М.: Машиностроение, 1990. 220 с.
38. Ключников Н.М., Стучебников В.М., Устинов А.А. Некоторые свойства полупроводниковых чувствительных элементов на основе структур КНС для тензопреобразователей давления // Радиоэлектронная техника №1(4), 2011. - С.52-59.
39. Козлов А.И. Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления: дисс. ...канд. техн. наук. Ульяновск, 2014. 113 с.
40. Козлов А.И., Мартынов Д.Б., Пирогов А.В., Стучебников В.М. Повышение точности микроэлектронных преобразователей давления на основе структур КНС // Материалы X Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2008». С. 159-168.
41. Козлов А.И., Пирогов А.В., Стучебников В.М. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи // Датчики и системы. 2009. №8. С. 50–53.
42. Козлов А.И., Стучебников В.М. Экспериментальное определение распределения деформаций в круглой упругой мембране тензопреобразователя давления // Приборы. 2014. №7 (169). С.41-44.
43. Кривченко Т.П. Полупроводниковые датчики компании Motorola / Т.П. Кривченко, И.Н. Чепурин // Электронные компоненты. № 2, 2003. – С.43.
44. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. – М.: Машиностроение, 1987. 112 с.
45. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. Пособие для вузов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1983. 320 с.
46. Любимский В.М. Проблемы проектирования интегральных тензопреобразователей давления на основе слоев поликристаллического кремния: дисс. ...док. техн. наук. Новосибирск, 2005. 295 с.

47. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Серебро. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
48. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1971. 424 с.
49. Москалев С.А. Полупроводниковые микроэлектромеханические системы датчиков давления с улучшенными техническими характеристиками: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2013. 140 с.
50. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.–382 с.
51. НИИФИ. Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.niifi.ru/production/sensors/> (дата обращения: 29.05.2018)
52. Николаева А.С. Разработка методики расчета и проектирования актюаторов дискретного действия: дисс. ... канд. Техн. Наук. Москва. 2015. 154 с.
53. НПК "Технологический Центр". Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.tcen.ru/rus/products/novinki> (дата обращения 29.05.2018)
54. ООО «Микротензор». Каталог продукции. Режим доступа: <http://microtensor.ru/catalog/mikroelektronnye-tenzopreobrazovateli-izbytochnogo-davleniya> (дата обращения: 29.05.2018)
55. Осадчий Е.П., Тихонов А.И., Карпов В.И. и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
56. Пат. 1451566 СССР, МПК G01L9/04. Полупроводниковый тензопреобразователь / Кикнадзе Г.И., Лурье Г.И., Плещ А.Г., Стучебников В.М., Хасиков В.В., Черницын В.Н.; опубл. 15.01.1989. Бюл. №2.
57. Пат. 2016289061 США, МПКВ81В3/00, В81С1/00. Silicon-on-sapphire device with minimal thermal strain preload and enhanced stability at high temperature: / G.Brown; опубл.06.10.2016.

58. Пат. 2392592 Российская федерация, МПКG01L9/04. Датчик давления / В.А. Стефанович, Г.Б. Лебедев, С.Н. Нелина; опубл. 20.06.2010. Бюл. №17.

59. Пат. 3436440 Германия, МПКG01L9/00, G01L9/06, H01L23/12. Semiconductor measuring instrument: / M. Poppinger, K.G. Ehrler, H. Hagen, K. Heimer, V. Krisch; опубл. 10.04.1986.

60. Пат. 934258 СССР, МПК G01L9/06. Полупроводниковый тензопреобразователь / Стучебников В.М.; опубл. 07.06.1982. Бюл. №21.

61. Пат. 94036810 Российская федерация, МПК G01L11/00. Двухмембранный тензопреобразователь малых давлений для медицинской техники / Воробьева В.В., Горохов В.Н., Зимин И.М.; опубл. 27.06.1996.

62. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: «Сов. радио», 1975. 192 с.

63. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 256 с.

64. Полищук И.Н. Коррекция статических характеристик полупроводниковых измерительных преобразователей информационно-измерительных систем: дисс. ...канд. техн. наук. Уфа, 2003. 183 с.

65. Протопопов А.А., Виговский В.И. Многокритериальная оптимизация высокооборотного центробежного насоса // Политехнический молодёжный журнал. 2017. №5. С. 1-7.

66. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. – Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука.1988. 712 с.

67. Радченко С.Г., Козырь О.В. Применение ЛПт равномерно распределённых последовательностей для решения прикладных задач моделирования // Математические машины и системы. 2014. С. 151 – 158.

68. Разумовский И.А., Одинцев И.Н., Чернятин А.С. Методы исследования напряженно-деформированного состояния // Материалы 4-ой

Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение». 2018. С. 225-228.

69. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. 475 с.

70. Реньян В.Р. Технология полупроводникового кремния: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1969. 336 с.

71. Рогожин А.Д. Разработка и исследование интегральных измерителей давлений: дисс. ...канд. техн. наук. Арзамас, 2000. 113 с.

72. Савченко Е.Г., Стучебников В.М. Гистерезис первого нагружения в преобразователях давления на основе структур КНС // http://midaus.com/images/docs/ГПН_в_преобразователях%20давления.pdf (дата обращения 11.02.2019)

73. Савченко Е.Г., Стучебников В.М. Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире» // http://midaus.com/images/docs/Пайка_сапфира_титановым_сплавом.pdf (дата обращения 11.02.2019)

74. Савченко Е.Г., Стучебников В.М. Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире» // Сварочное производство. 2013. №1. С. 23-25.

75. Стучебников В.М. Структуры «кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. №6. С. 678–696.

76. Татмышевский К.В. Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: дисс. ...док. техн. наук. Владимир, 2009. 338 с.

77. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер : пер. В.И. Контовта под редакцией Г.С. Шапиро. – М. : Наука, 1966. 592 с. : ил.

78. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости : пер. с англ. / Под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. 1979. 560 с.

79. Ушков А.В. Разработка конструктивно-технологических методов производства кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам: дисс. ...канд. техн. наук. М., 2008. 161 с.

80. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. 16-е изд., испр. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016. 543 с.

81. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галёркина: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.

82. Чернецов А.М., Соколов А.В. Чувствительные элементы и измерительные модули датчиков давления. Вопросы стандартизации и унификации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013 . № 3 (27). С. 148–155.

83. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н., Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 248 с.

84. Шиккульская О.М. Метод моделирования чувствительных элементов датчиков на основе фрактального подхода: дисс. ...док. техн. наук. Астрахань, 2009. 459 с.

85. Шиккульский М.И. Энерго-информационные модели микроэлектронных датчиков давления: дисс. ...канд. техн. наук. Астрахань, 2005. 158 с.

86. Шупиков А.Н., Литвинов Л.А., Угримов С.В., Сотрихин С.Ю., Ярещенко В.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса распространения волн в сапфировых стержнях // Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 57 (1099). С. 115 – 125.

87. Энгельское приборостроительное объединение «Сигнал». Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.eposignal.ru/products/catalog/228/1500/> (дата обращения 20.03.2017).

88. Ярещенко В.Г. Экспериментальное исследование процессов скоростного деформирования методом динамического широкополосного тензометрирования // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов, изд-во Харьковский авиационный институт,

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, 2014. №3.
С. 103-110.

89. Bogue R. Non-silicon MEMS - The hard and soft alternatives // *Sensor Review*. 2016. Vol. 36 (3). P. 225-230. DOI: 10.1108/SR-03-2016-0057

90. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V. *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications*. New York: Springer, 2009. – 481 p.

91. ESI. Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.esi-tec.com> (дата обращения: 29.05.2018)

92. Excell, J. SOS for sensors // *Engineer*. 2004. Vol. 293 (7642). P. 32.

93. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Evaluation of output signal nonlinearity for semiconductor strain gauge // *Solid State Phenomena*. November 2017. Volume 269. P.60-70. ;

94. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Skvortsov A.A. Numerical modeling and optimization of the design of the corrugated pressure sensor membrane // *Periodico Tche Quimica*. 15. Special issue (1). P. 174-181. ;

95. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A., Skvortsov A.A. Optimization of semiconductor pressure transducer with sensitive element based on “silicon on sapphire” structure // *Periodico Tche Quimica*. 2018 .- Vol. 15 , Issue 30 .- С. 678 – 686. ;

96. Guo S., Eriksen H., Childress K., Fink A., Hoffman M. High temperature smart-cut SOI pressure sensor // *Sensors and actuators*. 2009. A 154. P. 255-260.

97. Hoffmann K. *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*. Germany, Darmstadt: HBM Company, 2001. 36p.

98. Honeywell. Каталог продукции. Режим доступа: <https://www.honeywell.com> (дата обращения: 29.05.2018)

99. Hong-Zhi L., Wen-Juan J., Sheng W., Ting ZH., Hui L., He-Qin L., Qiang Z. Investigation of hi-precision marine pressure sensor based on Silicon-on Sapphire // *Sensors and transducers*. 2016. Vol. 202. P. 46-50.

100. Jackson R.G. *Novel sensors and sensing*. Published by Institute of Physics Publishing, 2004. 299 p.

101. Keller. Каталог продукции. Режим доступа: http://www.keller-druck.com/home_e/paprod_e/hm_transd_e.asp (дата обращения: 29.05.2018)

102. Kreuzer M. Wheatstone Bridge Circuits Show Almost No Nonlinearity and Sensitivity Errors When Used for Single Strain Gage Measurements <https://www.hbm.com/en/3196/tips-and-tricks-wheatstone-bridge-circuits-show-almost-no-nonlinearity-and-sensitivity-errors-when-used-for-single-strain-gage-measurements/> (accessed March 20, 2017).

103. Kulesh N.A., Kudyukov, E.V., Balymov K.G., Beloyshov A.A. Simulation and optimization of silicon-on-sapphire pressure sensor // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1886, Paper № 020013. DOI: 10.1063/1.5002910.

104. Kulite Semiconductor Products. Каталог продукции. Режим доступа: <https://www.kulite.com/products/> (дата обращения: 29.05.2018)

105. Kyowa. Каталог продукции. Режим доступа: <http://kyowa.ru/produktsiya.html> (дата обращения: 29.05.2018)

106. Lee S.M., Yum J.H., Larsen E.S., Lee W.C., Kim S.K., Bielawski C.W., Oh J. Advanced silicon on isolator: crystalline silicon on atomic layer deposited beryllium oxide // Nature. 2017. Vol. 7. P.1-7. DOI: 10.1038/s41598-017-13693-6.

107. Li C., Cordovilla F., Jagdheesh R., Ocaña J.L. Design optimization and fabrication of a novel structural SOI piezoresistive pressure sensor with high accuracy // Sensors (Switzerland). 2018. Vol. 18 (2). DOI: 10.3390/s18020439

108. Li Ch., Cordovilla F., Ocaña J.L. Design optimization and fabrication of a novel structural piezoresistive pressure sensor for micro-pressure measurement // Solid State Electronics. 2018. Vol. 139. P. 39–47.

109. Li X., Liu D., Huang M., Liu W. An Overview of the SOS High Temperature Pressure Sensor // proceedings of the 6th international conference on advanced design and manufacturing engineering. 2016. P. 393-397. DOI: 10.2991/icadme-16.2016.64

110. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method. Fourth Edition. Nelson, a division of Thomson Canada Limited, 2007. P. 1-11.

111. Mäkinen J., Suni T. Thick-Film SOI Wafers: Preparation and Properties // Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition. 2015. P. 206-237.
112. Mäkinen, J., Suni, T. Thick-Film SOI Wafers: Preparation and Properties. (2015) Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition, pp. 206-237.
113. Manguo H., Defeng L., Chao L., Zhanshe G., Xin L. Design of temperature compensation for silicon-sapphire pressure sensor // IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST) / IEEE international School on Imaging. Proceedings paper. 2017. P. 214 – 218.
114. Meggitt Endevco. Каталог продукции. Режим доступа: <https://buy.endevco.com> (дата обращения: 29.05.2018)
115. MinebeaMitsumi. Каталог продукции. Режим доступа: <http://www.minebea-mcd.com/en/index.html> (дата обращения: 29.05.2018)
116. Mo C.T., Chen C.Z., Zhang L.L., Sun, F.J. Temperature compensation of SOS pressure sensor // Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University. 2004. Vol. 25 (2). P. 160-163. DOI:
117. Omega. Каталог продукции. Режим доступа: <https://www.omega.com/en-us/sensors-and-sensing-equipment/pressure-and-strain/c/pressure-transducers> (дата обращения: 29.05.2018)
118. Pramanik A., Zhang L.C. Residual stresses in silicon-on-sapphire thin film systems // International Journal of Solids and Structures. 2011. Vol. 48. P. 1290–1300.
119. Reissner E. On axisymmetrical deformations of thin shells of revolutions // Proc. Symp. Appl. Math. – N.Y., 1950. V.3. P. 27-52.
120. Reissner E. On the theory of thin elastic shell // H. Reissner Aniversary Volume Contributions to Applied Mechanics. – Ann Arbor, Mich. 1949. P.231-247.
121. Sahagen, Armen N., Matthews, Jan D. Silicon on sapphire pressure transducer applications // Instrumentation in the Aerospace Industry, Proceedings of the ISA Aerospace Instrumentation Symposium. 1989. Vol. 35, P. 693-697.

122. Sanders J.L. Nonlinear theories for thin shells // *Quart. Appl. Math.* 1963. V.21. N1. P.21-36.
123. Savchenko Y.G., Stuchebnikov V.M. Brazing of sensitive elements for pressure transducers with the «silicon on sapphire» structure // *Welding International*. 2014. Vol. 28 (1), P. 62-64.
124. Sensonetics. Каталог продукции. Режим доступа: http://www.sensonetics.com/downhole_products.html (дата обращения: 17.04.2017).
125. Ștefănescu D.M. Handbook of force transducers. Principles and components. Springer, 2011. 612 p.
126. Stuchebnikov V.M. Sos strain gauges for force and pressure transducers// <https://studylib.net/doc/18085834/sos-strain-gauge-sensors-for-force-and-pressure-transducers>
127. SUCO Technologies. Каталог продукции. Режим доступа: <https://suco-tech.com/products/pressure-monitoring/pressure-transducers/high-pressure-oem-series/> (дата обращения: 29.05.2018)
128. Svinolupov Yu.G., Naumov L.A. Precision digital pressure sensor // *Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry*. 2016. Vol 10. P. 105-109.
129. The Endress+Hauser group. Каталог продукции. Режим доступа: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure> (дата обращения: 29.05.2018)
130. Trafag. Каталог продукции. Режим доступа: <https://www.trafag.com/en/products/pressure-transmitter/> (дата обращения: 29.05.2018)
131. Tykhan M., Mokrytskyu V., Teslyuk V. Effect of the membrane thermodetlection on the accuracy of a tensoresistive pressure sensor // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4/7 (88). P. 32-37. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107239
132. Vas'kov Y.A., Emel'yanov G.A. Intelligent pressure sensors based on silicon on sapphire structures: The influence of noises on measurement accuracy //

Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75(11). P. 2086-2090. DOI: 10.1134/S0005117914110174

133. Yao Z., Liang T., Jia P., Hong Y., Qi L., Lei Ch., Zhang B., Xiong J. A High-Temperature Piezoresistive Pressure Sensor with an Integrated Signal-Conditioning Circuit // Sensors. 2016; Vol. 16(6):913. Doi:10.3390/s16060913

134. Zhang Yan-Hong. A novel pressure Microsensor with 30- μ m-thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region / Yan-Hong Zhang, Chen Yang, Zhao-Hua Zhang, Hui-Wang Lin, Li-Tian Liu, Tian-Ling Ren // IEEE SENSORS JOURNAL. December 2007. – Vol. 7, № 12. – pp. 1742-1748.

135. Zhanshe G., Chao L., Yanshan W., Defeng L., Manguo H., Xin L. Design and Experimental Research of a Temperature Compensation System for Silicon-on-Sapphire Pressure Sensors // IEE Sensors Journal. 2017. Vol 17. P. 709-715. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2633324.

136. Zhao L.B., Zhao Y.L., Jiang Z.D. Design and fabrication of a piezoresistive pressure sensor for ultra high temperature environment // Journal of Physics: Conference Series. 2006. Vol. 48. P. 178–183.

137. Zhou G., Zhao Y., Guo F., Xu W. A Smart High Accuracy Silicon Piezoresistive Pressure Sensor Temperature Compensation System // Sensors. 2014. Vol. 14(7). P. 12174-12190. DOI: 10.3390/s140712174

Приложение 1. APDL-файл алгоритма оптимизации

FINISH

/CLEAR,START

minimal_signal = 0.002

*afun,deg

!нижняя мембрана

!диаметры:

*set, low_mem_hole_dia, 2.5

*set, low_mem_boss_dia1, 3.

*set, low_mem_boss_dia2, 7

*set, low_mem_id,13.5

*set, low_mem_od1, 15.2

*set, low_mem_od2, 16

!ВЫСОТЫ:

*set, low_mem_total_height, 2.5

*set, low_mem_thickness, 0.3

*set, low_mem_central_boss_y_level,1

*set, low_mem_bottom_skirt_height,0.5

*set, low_mem_top_skirt_height, 0.5

!скругление

*set, low_mem_fillet, 0.2

!верхняя мембрана

*set, top_mem_foot_id, 13.5

*set, top_mem_foot_od, 16

*set, top_mem_foot_height, 0.5

*set, top_mem_stem_height, 5.77
*set, top_mem_thickness, 0.23
*set, top_mem_pcb_od, 11.4
*set, top_mem_top_step_dy, 0.5
*set, top_mem_body_od, 12
*set, top_mem_body_height, 2.9
*set, top_mem_hip_dia, 14.4
*set, top_mem_hip_height, 0.6
*set, top_mem_bottom_skirt_height, 0.5
*set, top_mem_top_hat_height, 0.7
*set, top_mem_foot_y_level, 2
*set, top_mem_foot_wall_outer_dia, 15.2
*set, top_mem_shallow_cavity_dia, 9.5
*set, top_mem_shallow_cavity_depth, 1.5
*set, top_mem_deep_cavity_dia, 7.8
*set, top_mem_trunk_dia, 4

/prep7

!материал и КЭ

!ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ

*SET,e1,1.18e5

*SET,mu1,0.38

*SET,dens1,4.5e-6

ET,1,PLANE183

!*

!*

KEYOPT,1,3,1
 KEYOPT,1,6,0
 KEYOPT,1,10,0
 !*
 MPTEMP,,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,EX,1,,e1
 MPDATA,PRXY,1,,mu1
 k,,0.5*low_mem_hole_dia,0
 k,,0.5*low_mem_hole_dia,low_mem_total_height
 k,,0.5*top_mem_foot_id,low_mem_total_height
 k,,0.5*low_mem_od2,low_mem_total_height
 k,,0.5*low_mem_od2,low_mem_total_height-low_mem_top_skirt_height
 k,,0.5*low_mem_od1,low_mem_total_height-low_mem_top_skirt_height
 k,,0.5*low_mem_od1,low_mem_top_skirt_height
 k,,0.5*low_mem_od2,low_mem_top_skirt_height
 k,,0.5*low_mem_od2,
 k,,0.5*low_mem_id
 k,,0.5*low_mem_id,low_mem_total_height-low_mem_thickness
 k,,0.5*low_mem_boss_dia2,low_mem_total_height-low_mem_thickness
 k,,0.5*low_mem_boss_dia2,low_mem_central_boss_y_level
 k,,0.5*low_mem_boss_dia1,low_mem_central_boss_y_level
 k,,0.5*low_mem_boss_dia1

*do,i,1,14,1 !построение линий в цикле

```

    l,i,i+1
*enddo
l,1,15
*do,i,10,13,1 !нанесение галтелей в цикле
    lfillt,i,i+1,low_mem_fillet
*enddo
al,all
!построение геометрии измерительной мембраны
k,,1.3/2,0
k,,1.3/2,1.5
k,,0,1.5+0.65/tan(60)
k,,ky(2)+top_mem_stem_height+top_mem_thickness
k,,top_mem_pcb_od/2,ky(27)
k,,top_mem_pcb_od/2,ky(27)-top_mem_top_step_dy
k,,top_mem_body_od/2,ky(29)
k,,top_mem_body_od/2,ky(29)-top_mem_body_height
k,,top_mem_hip_dia/2,ky(31)
k,,top_mem_hip_dia/2,ky(32)-top_mem_hip_height
k,,top_mem_foot_od/2,ky(33)
k,,top_mem_foot_od/2,ky(2)+top_mem_foot_y_level-top_mem_top_hat_height
k,,top_mem_foot_wall_outer_dia/2,ky(35)
k,,top_mem_foot_wall_outer_dia/2,ky(2)+top_mem_bottom_skirt_height
k,,top_mem_foot_od/2,ky(2)+top_mem_bottom_skirt_height
k,,top_mem_foot_od/2,ky(2)
k,,top_mem_foot_id/2,ky(2)

```

```

k,,top_mem_foot_id/2,ky(2)+top_mem_bottom_skirt_height
k,,top_mem_shallow_cavity_dia/2,ky(41)
k,,top_mem_shallow_cavity_dia/2,ky(41)+top_mem_shallow_cavity_depth
k,,top_mem_deep_cavity_dia/2,ky(41)+top_mem_shallow_cavity_depth
k,,top_mem_deep_cavity_dia/2,ky(27)-top_mem_thickness
k,,top_mem_trunk_dia/2,ky(27)-top_mem_thickness
k,,top_mem_trunk_dia/2,ky(2)
k,,low_mem_hole_dia/2,ky(2)
k,,low_mem_hole_dia/2,0
*do,i,24,48,1 !рисование линий в цикле
    l,i,i+1
*enddo
l,24,49
lfillt,40,41,low_mem_fillet
lfillt,41,42,low_mem_fillet

lsel,s,,,20,47,1
al,all
allsel

!одинаковое разбиение на контактных линиях для создания совместной сетки
lesize,3,,,20
lesize,35,,,20

!вставка дополнительной точки
adele,1
ldele,2

```

```

k,,kx(47),ky(47)
1,2,54
1,3,54
asel,s,,2
lsla,u
al,all
allsel
!совместная сетка на осевом участке штока
lesize,1,,NINT(low_mem_total_height/0.1)
lesize,44,,NINT(low_mem_total_height/0.1)
!совместная сетка
lesize,2,,NINT((kx(47)-kx(2))/0.1)
lesize,43,,NINT((kx(47)-kx(2))/0.1)
lesize,all,0.2
amesh,1,2,1
lrefine,23,,2,1,1
lrefine,41,,2,1,1
!склеивание контактных узлов
CPINTF,ALL,0.0001,
FINISH
/SOL
! NLGEOM,1
! nsubst,10
! autots,0
DL,9, ,ALL,

```

!выбор линий для приложения давления

lsel,s,,10,18,1

lsel,a,,45

lsel,a,,20,21,1

sfl,all,pres,3

allsel

SBCTRAN

solve

/post1

set, last

lsel,s,,23

nsll,s,1

ESLN,S

nsle,r,corner

!размеры тензорезисторов

sg_p_length = 1!длина ТР растяжения

sg_p_width = 1!ширина ТР растяжения

sg_p_wire_count = 10! число проводников в измерительной решетке ТР
растяжения

sg_n_length = 1!длина ТР сжатия

sg_n_width = 1!ширина ТР сжатия

sg_n_wire_count = 10! число проводников в измерительной решетке ТР
сжатия

!Определение границ

!Определение максимально линейного размера для всех тензорезисторов

max_dim = max(max(sg_p_length, sg_p_width), max(sg_n_width, sg_n_length))

membrane_r = kx(28)

right_margin = sqrt(membrane_r**2 - (0.5*max_dim)**2)

left_margin = 0.5*max_dim + 0.5*max_dim

!повторная выборка узлов, находящихся в пределах right_margin и left_margin

nsel,r,loc,x,left_margin,right_margin

*get, nCount, Node, 0, count

best_loc_sg_p = 0

best_loc_sg_n = 0

best_orient_sg_p = 1

best_orient_sg_n = 1

!Выбор максимальных значений радиальной и тангенциальной деформаций для выбранных узлов:

nsort,epel,x,1

*GET,max_eps_r,SORT,,MAX

*GET,min_eps_r,SORT,,MIN

*get,max_eps_r_node_number,sort,,imax

*get,min_eps_r_node_number,sort,,imin

nsort,epel,z,1

*GET,max_eps_t,SORT,,MAX

*GET,min_eps_t,SORT,,MIN

!номера узлов, где окружная деформация максимальная и минимальная соответственно

*get,max_eps_t_node_number,sort,,imax

*get,min_eps_t_node_number,sort,,imin

max_eps_p = 0!максимальная деформация растяжения

min_eps_n = 0!минимальная деформация сжатия

*if,max_eps_r,gt,max_eps_t,then

best_loc_sg_p = nx(max_eps_r_node_number)

best_orient_sg_p = 1

max_eps_p = max_eps_r

*elseif

best_loc_sg_p = nx(max_eps_t_node_number)

best_orient_sg_p = 2

max_eps_p = max_eps_t

*endif

*if,min_eps_r,lt,min_eps_t,then

best_loc_sg_n = nx(min_eps_r_node_number)

best_orient_sg_n = 1

min_eps_n = min_eps_r

*elseif

best_loc_sg_n = nx(min_eps_t_node_number)

best_orient_sg_n = 2

min_eps_n = min_eps_t

*endif

!расчет максимально возможного сигнала

signal = max_eps_p - min_eps_n

*create, nl_simulation

```
!расчет на нелинейность
FINISH
/SOL
NLGEOM,1
nsubst,20
autots,0
/SOL
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
DL,9, ,ALL,
!выбор линий для приложения давления
lsel,s,,10,18,1
lsel,a,,45
lsel,a,,20,21,1
sfl,all,pres,3
allsel
SBCTRAN
solve
/post1
set, last
lsel,s,,23
nsl,s,1
ESLN,S
nsle,r,corner
nsl,r,loc,x,left_margin,right_margin
```

set, last

*dim, sg_p, array, 4, nCount*2 !максимально возможное число вариантов: удвоенное число узлов

*dim, sg_n, array, 4, nCount*2

j = 1

k = 1

*do,i,1,nCount,1

*get, strain_r, node, node(0,0,0), epe1, x

*get, strain_t, node, node(0,0,0), epe1, z

*if, strain_r, gt, 0, then!если деформация положительная, то в первый массив

sg_p(1,j) = nx(node(0,0,0))!координата

sg_p(2,j) = 1!тип ориентации - радиальная

sg_p(3,j) = strain_r!деформация

j = j+1

*else! в другом случае это писать во второй массив

sg_n(1,k) = nx(node(0,0,0))!координата

sg_n(2,k) = 1!тип ориентации - радиальная

sg_n(3,k) = strain_r!деформация

k = k+1

*endif

!то же самое повторяется для окружной деформации

*if, strain_t, gt, 0, then!если деформация положительная, то в первый массив

sg_p(1,j) = nx(node(0,0,0))!координата

sg_p(2,j) = 2!тип ориентации - радиальная

sg_p(3,j) = strain_t!деформация

j = j+1

*else! в другом случае это писать во второй массив

sg_n(1,k) = nx(node(0,0,0))!координата

sg_n(2,k) = 2!тип ориентации - радиальная

sg_n(3,k) = strain_t!деформация

k = k+1

*endif

nsl,u,,,node(0,0,0)

*enddo

positive_node_count = j

negative_node_count = k

!повторная выборка узлов:

lsl,s,,,23

nsll,s,1

ESLN,S

nsle,r,corner

SET,,,1,,0.5,,

!цикл расчета параметра по нелинейности для вариантов растяжения

*do,i,1,positive_node_count-1,1

*if,sg_p(2,i),eq,1,then!считывание нужного типа деформации в зависимости от ориентации резистора

*get, strain_05, node, node(sg_p(1,i),0,0), epe1, x

*else

*get, strain_05, node, node(sg_p(1,i),0,0), epe1, z

*endif

sg_p(4,i) = (strain_05-0.5*sg_p(3,i))/sg_p(3,i)

*enddo

! то же самое для вариантов сжатия

*do,j,1,negative_node_count-1,1

*if,sg_n(2,j),eq,1,then!считывание нужного типа деформации в зависимости от ориентации резистора

*get, strain_05, node, node(sg_n(1,j),0,0), epe1, x

*else

*get, strain_05, node, node(sg_n(1,j),0,0), epe1, z

*endif

sg_n(4,j) = (strain_05-0.5*sg_n(3,j))/sg_n(3,j)

*enddo

min_signal = 0.002

max_nl = 100500

!gf- целевая функция, которая должна быть минимизирована, чтобы финальная нелинейность схемы была минимальна

best_sg_p_index = 0

best_sg_n_index = 0

!основной цикл подбора варианта растяжения и варианта сжатия

*do,i,1,positive_node_count-1,1

```

*do,j,1,negative_node_count-1,1
    signal = sg_p(3,i)-sg_n(3,j)
    *if,signal,gt,min_signal,then
        nl = abs(sg_p(4,i)/sg_n(4,j)-sg_p(3,i)/sg_n(3,j))
        gf = abs(nl)
        *if,gf,lt,max_nl,then
            best_sg_p_index = i
            best_sg_n_index = j
            max_nl = gf
        *endif
    *endif
*enddo

*enddo

allsel
set,last
signal = sg_p(3,best_sg_p_index)-sg_n(3,best_sg_n_index)
top_nl = -100
! SET,,1,,0.5,,
*do,i,1,10,1!расчет нелинейности по всем 10 шагам нагрузки
    SET,,1,,0.1*i,,
    *if,sg_p(2,best_sg_p_index),eq,1,then

*get,strain_p,node,node(sg_p(1,best_sg_p_index),ky(27),0),epel,x
    *else
    *get,strain_p,node,node(sg_p(1,best_sg_p_index),ky(27),0),epel,z
    *endif

```

```

*if,sg_n(2,best_sg_n_index),eq,1,then

*get,strain_n,node,node(sg_n(1,best_sg_n_index),ky(27),0),epel,x

*else

*get,strain_n,node,node(sg_n(1,best_sg_n_index),ky(27),0),epel,z

*endif

signal_step = strain_p-strain_n

nl_step = abs((signal_step-0.1*i*signal)/signal*100)

*if,nl_step,gt,top_nl,then

    top_nl = nl_step

    top_nl_load = 0.1*i

*endif

*enddo

!определение максимального напряжения

LSEL,ALL

NSLL,S,1

nsort,s,eqv,1

*get,str_max,sort,0,max

*cfopen, results, txt,,append

*cfwrite,,sg_p(1,best_sg_p_index)! радиус ТР растяжения

*cfwrite,,sg_n(1,best_sg_n_index)! радиус ТР сжатия

*cfwrite,,sg_p(2,best_sg_p_index)! ориентация ТР растяжения

*cfwrite,,sg_n(2,best_sg_n_index)! ориентация ТР сжатия

*cfwrite,,signal

```

```

        *cfwrite,,top_nl
        *cfwrite,,str_max
    *cfclos

    ! *if,sg_n(2,best_sg_n_index),eq,1,then!считывание нужного типа
деформации в зависимости от ориентации резистора

    !     *get, strain_05_n, node, best_sg_n_index, epel, x

    ! *else

    !     *get, strain_05_n, node, best_sg_n_index, epel, z

    ! *endif

    ! *if,sg_p(2,best_sg_p_index),eq,1,then!считывание нужного типа
деформации в зависимости от ориентации резистора

    !         *get, strain_05_p, node, best_sg_p_index, epel, x

    !     *else

    !         *get, strain_05_p, node, best_sg_p_index, epel, z

    ! *endif

    ! signal_05 = strain_05_p-strain_05_n

    ! a_nl_3 = (signal_05-0.5*signal)/signal*100

*end

*if,signal,gt,minimal_signal,then

    *use, nl_simulation

*else

    /exit

*endif

```

Приложение 2. Акт о внедрении результатов диссертационной работы

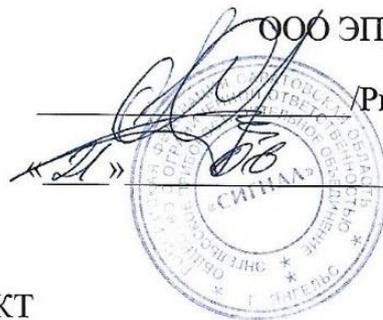
«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по науке и развитию

ООО ЭПО «Сигнал»

/Рыжков А.Л./

2018 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Скворцова Павла Аркадьевича, посвященной разработке методики расчета и проектирования упругих элементов полупроводниковых датчиков давления на структуре КНС, выполненной на кафедре «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета внедрены на ООО ЭПО «Сигнал» и используются при расчетах и проектировании полупроводниковых датчиков давления.

Начальник отдела 103

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Савельев С.Г.', written in a cursive style.

Савельев С.Г.