

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

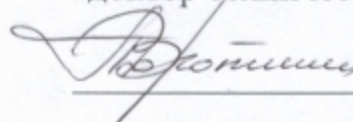


«Тульский  
государственный  
университет»  
(ТулГУ)



Проспект Ленина, д. 92, г. Тула, 300012  
Тел. (4872) 35-34-44, факс (4872) 35-81-81  
e-mail: info@tsu.tula.ru, http://tsu.tula.ru

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Тульский  
Государственный университет»  
доктор технических наук, доцент

 Воротилина М.С.



" 14 " ноября 2019г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Скворцова Павла Аркадьевича «Разработка методики расчета и проектирования  
упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**Актуальность работы.** Вопрос расчета и проектирования упругих элементов датчиков давления является сложной и наукоёмкой задачей. Проблемы повышения точности приборов, оперативного создания новых конструкций полупроводниковых датчиков давления, способных работать в различных эксплуатационных режимах, стоят достаточно остро. В настоящее время в условиях сложившейся экономической и политической обстановки для Отечественного приборостроения является весьма актуальным вопрос создания надежных расчетных методик. Современный подход к проектированию должен опираться на результаты расчетов, полученных на программно-вычислительных комплексах, и не должен допускать интуитивных действий разработчиков. Рассмотренная в диссертационной работе методика даёт производителям тензодатчиков на структуре «кремний на сапфире» возможность оперативно варьировать параметрами управления, получая при этом оптимальное множество решений. Данный подход позволяет на этапе проектирования выбрать вариант конструкции с наилучшими, по мнению группы экспертов, параметрами качества. Разработанная программа является приложением к хорошо зарекомендовавшему себя программно-вычислительному комплексу ANSYS и может быть использована конструкторами и технологами для решения производственных задач, связанных с расчетом и проектированием упругих элементов.

**Целью** диссертационной работы является разработка методики многокритериального проектирования упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре «кремний на сапфире», что укладывается в рамки актуальности рассматриваемой тематики исследований.

**Автор защищает:** методику многокритериального проектирования упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»; полученные теоретические и экспериментальные результаты, определяющие взаимосвязь между параметрами управления и параметрами качества; программную

реализацию методики многокритериального проектирования; предложенные варианты конструкций, превосходящие исходный вариант по всем параметрам качества.

**Научная новизна диссертационной работы заключается** в получении теоретических и экспериментальных данных, объясняющих влияние конструктивных размеров и физико-механических свойств материалов на функциональные характеристики датчика, в создании методики многокритериального проектирования и её реализация в виде прикладной программы, позволяющей разработчику выбрать рациональный вариант конструкции.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов по работе, списка литературы, содержащего 137 наименований, приложений, изложена на 153 страницах, включает 94 рисунка и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в диссертационной работе темы, поставлена цель, указана научная новизна работы, выбраны объект и предмет исследования.

В первом разделе приводится обзор конструкций различных полупроводниковых датчиков давления, а также описаны особенности расчета и проектирования полупроводниковых тензодатчиков на структуре «кремний на сапфире».

Во втором разделе осуществляется расчет упругого элемента мембранного типа тензодатчика на структуре «кремний на сапфире» аналитическими методами. Задача решается в области малых деформаций, при весьма больших прогибах по теории абсолютно гибкой мембраны, а также производится уточнённый расчет при произвольных прогибах.

В третьем разделе приводится экспериментальное исследование структуры КНС методом растровой электронной микроскопии. Исследована граница «сапфир-кремний», определена толщина слоя кремния и сапфировой подложки. Здесь же проводится экспериментальное исследование сплава, содержащего 72% серебра и 28% меди для дальнейшего использования полученных данных при численном моделировании слоя припоя, который на практике выполнен из серебряного припоя ПСр72. В ходе эксперимента были определены модуль упругости сплава, предел текучести, временное сопротивление, а также координатах условных напряжений была построена диаграмма деформирования исследуемого сплава.

В четвертом разделе производится численное моделирование упругого элемента серийно-выпускаемого тензодатчика на структуре «кремний на сапфире». Определены максимальные эквивалентные напряжения в конструкции, получено значение прогиба в центре мембраны, распределения радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности упругого элемента.

В пятом разделе приводятся основные сведения по многокритериальной оптимизации, описывается разработанный автором алгоритм и компьютерная программа.

В шестом разделе приведены результаты расчета с использованием разработанной программы, по итогам которых выбрана рациональная конструкция двухмембранного упругого элемента, приведены результаты экспериментальной проверки тестовой партии датчиков.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по работе.

**Методы исследования.** Методы линейной и нелинейной теорий тонких пластин и мембран, механики сплошных сред, конечно-элементные модели, реализуемые в среде ANSYS, экспериментальные исследования структуры КНС методом растровой электронной микроскопии и исследование деформационно-прочностных свойств материалов.

**Теоретическое значение** исследования заключается в проведении расчета деформирования упругого элемента полупроводникового датчика давления на структуре «кремний на сапфире», что позволило определить максимальные эквивалентные напряжения в упругом элементе и распределение деформаций на его поверхности. Автором исследована структура «кремний на сапфире» методом растровой электронной микроскопии, определены механические характеристики сплава, родственного по химическому составу с припоем ПСр 72.

**Практическое значение** диссертационной работы подтверждается возможностью применения разработанной автором программы на предприятиях, занимающихся выпуском полупроводниковых датчиков давления на структуре «кремний на сапфире». Данная программа используется в расчетной практике предприятия ЭПО «Сигнал», что подтверждено соответствующим актом внедрения. Благодаря данной программе разработчики полупроводниковых датчиков давления на структуре «кремний на сапфире» могут оперативно получать геометрию оптимальных вариантов конструкций, зная при этом значения параметров качества.

**Достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений и обеспечивается использованием высокоточного оборудования для проведения экспериментальных исследований, а также использованием корректными вариантами решения теоретических задач с использованием соотношений теории гибких пластин и мембран, использованием аналитических методов для исследования простейших моделей и проведением численных расчетов технических объектов в среде хорошо зарекомендовавшему себя программно-вычислительному комплексу ANSYS, к которому программа, разработанная автором может служить приложением.

**Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и основных выводов.** Рекомендуется использовать результаты диссертационной работы в деятельности научно-исследовательских организаций, конструкторских бюро и промышленных предприятий, занимающихся исследованием и разработкой тензодатчиков, имеющих осесимметричное очертание, в частности – ЦНИИСК (г. Москва), ЦНИИПСК (г. Москва), ПГ «МИДА» (г. Ульяновск), ОАО «НПО «Сплав» (г. Тула), ОАО «КБ Приборостроения» (г. Тула), МГУ, МГТУ им. Баумана, ВГТУ (г. Воронеж), СПбГУ, ИПМ РАН, ИМАШ РАН и других.

**Автореферат** в целом отражает содержание диссертации, цель и задачи исследования, раскрывает научную новизну работы и ее практическую значимость. В автореферате есть отдельные несовпадения с текстом диссертации (см. замечания, №6). Список представленных автором публикаций отвечает требованиям ВАК РФ.

**Апробация результатов** диссертационного исследования подтверждается перечнем опубликованных работ, две из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, три – опубликованы в журналах, индексируемых в базе SCOPUS. Материалы исследований докладывались на семи научных конференциях (Международных и Всероссийских). Основные результаты и

выводы свидетельствуют о личном вкладе автора в решение задач диссертационной работы.

Оценивая проведенные исследования, можно отметить, что при прочтении текста возникают **некоторые вопросы и замечания**, требующие дополнительных пояснений:

1. Расчету гибких пластин и оболочек посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых. Автору в обзорном разделе, следовало бы упомянуть исследования С.А.Амбарцумяна, А.С.Вольмира, В.В. Новожилова, В.В. Петрова, К.Ф. Черныха, В.В. Пикуля, В.Н. Паймушина, А.И. Голованова, М.С. Корнишина, Т.Кармана.

2. Поскольку задача решается в геометрически нелинейной постановке, приведенные автором аналитические решения осесимметричной задачи изгиба круглой пластины при малых прогибах в дальнейших исследованиях не используются и могут быть без особого ущерба сокращены. Что же касается нелинейных аналитических решений, то автор опускает информацию о пределах применимости той или иной модели, а также данные о постановке задач. Поскольку, материал второй главы в основном сведен к описанию результатов расчета осесимметричной мембраны известными методами, следовало бы пояснить, в какой мере эти результаты используются для решения основной задачи - разработке методики расчета и проектирования датчиков давления на структуре КНС.

3. При проведении численного моделирования автор не учитывает анизотропные свойства сапфира и кремния. Возникает вопрос, насколько корректно данное упрощение и как это повлияет на результаты расчета.

4. В экспериментальных исследованиях автором обнаружены напряжения в слое кремния 607 МПа, что свидетельствует о превышении его предела текучести. Насколько это согласуется с расчетами, проведенными в идеально упругой постановке.

5. При оценке степени геометрической нелинейности результатов численного расчета модели, в разделе 4 диссертации (см. стр. 92, рис. 4.7 диссертации, или стр. 18, рис. 16 автореферата) утверждается, что нелинейность составляет 0,14%. Возникает вопрос, какой критерий оценки нелинейности используется.

6. В диссертации и в автореферате имеются технические неточности. Так в автореферате на стр. 6 утверждается, что диссертация состоит из 4 глав, содержит 96 рисунков и 4 таблицы. На самом деле имеется 6 глав, 94 рисунка и 5 таблиц (две таблицы имеют один и тот же №4). Модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести и временное сопротивление в механике принято называть механическими характеристиками материалов, а автор их определяет более емким понятием, как физические (см. табл. 1 автореферата или табл. 2 диссертации).

Указанные замечания в целом не снижают ценность диссертационной работы П.А.Скворцова и могут быть учтены автором при дальнейших исследованиях. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, качественно оформлена, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и содержит решение актуальной задачи, связанной с проектированием датчиков давления на структуре «кремний на сапфире», обладающих высокими параметрами качества.


Диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, и её автор Скворцов Павел Аркадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Отзыв на диссертацию и автореферат П.А.Скворцова обсуждён и одобрен на межкафедральном научном семинаре по МДТТ им. Л.А.Толоконникова и расширенном заседании кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции» 12 ноября 2019 года, протокол № 5

Руководитель научного семинара по МДТТ им. Л.А.Толоконникова, доктор физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), профессор кафедры «Вычислительная механика и математика» Тульского государственного университета

 Маркин Алексей Александрович

Зав. кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции» Тульского государственного университета, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), профессор

 Трещев Александр Анатольевич

Адрес: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ФГБОУ ВО ТулГУ  
Телефон: +7 (4872) 35-34-44, Факс: +7 (4872) 35-81-81  
e-mail: info@tsu.tula.ru

*Трудников Мартина А.А. и Супрунов А.А.*  
*Заведующий*

*Зав. кафедрой*  
*12.11.2019*

