

Стенографический отчет

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.277.04

Повестка дня:

Защита диссертации **Савченко Евгением Геннадьевичем**  
на соискание ученой степени кандидата технических наук:  
**"Улучшение метрологических и эксплуатационных  
характеристик преобразователей давления на основе  
структур «кремний на сапфире»"**

Специальность:

**05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и  
систем управления».**

Официальные оппоненты:

**Михайлов Петр Григорьевич, доктор технических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник  
отдела научных исследований, ФГБОУ  
ВО «Пензенский государственный  
технологический университет»,  
г. Пенза**

**Антонец Иван Васильевич, доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры авиационной  
техники, ФГБОУ ВО «Ульяновский  
институт гражданской авиации имени  
Главного маршала авиации Б.П.  
Бугаева», г. Ульяновск**

Ведущая организация - Ульяновский филиал ФГБУН Институт  
радиотехники и электроники им.  
В.А.Котельникова Российской академии наук

**ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА д 212.277.04**

**от 29 декабря 2021 года**

на заседании присутствовали члены Совета:

Ярушкина Н.Г., 1.	председатель Со- вета	д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
Киселев С.К. зам. 2.	председателя Со- вета	д.т.н., доцент	05.13.05	- технические науки
Наместников А.М., 3.	ученый секретарь Совета	д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
Браже Р.А. 4.		д.ф.-м.н., профессор	05.13.05	- технические науки
Васильев К.К. 5.		д.т.н., профессор	05.13.01	- технические науки
Гладких А.А. 6.		д.т.н., профессор	05.13.01	- технические науки
Дьяков И.Ф. 7.		д.т.н., профессор	05.13.12	- технические науки
Епифанов В.В. 8.		д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
Иванов О.В. 9.		д.ф-м.н., доцент	05.13.05	- технические науки
Клячкин В.Н. 10.		д.т.н., профессор	05.13.01	- технические науки
Крашенинников В.Р. 11.		д.т.н., профессор	05.13.01	- технические науки
Курганов С.А. 12.		д.т.н., доцент	05.13.05	- технические науки
Негода В.Н. 13.		д.т.н., доцент	05.13.12	- технические науки
Самохвалов М.К. 14.		д.ф-м.н., профессор	05.13.05	- технические науки
Сергеев В.А. 15.		д.т.н., профессор	05.13.05	- технические науки
Ташлинский А.Г. 16.		д.т.н., профессор	05.13.01	- технические науки

Председатель Совета,  
д.т.н., профессор

Ученый секретарь Совета,  
д.т.н., доцент

  
Н.Г. Ярушкина

  
А.М. Наместников



Председатель

**Уважаемые коллеги !**

На заседании диссертационного Совета Д212.277.04 из **23** члена Совета присутствуют 16 человек. Необходимый кворум имеем.

Членам Совета повестка дня известна. Какие будут суждения по повестке дня? Утвердить? (принято единогласно).

По специальности защищаемой диссертации **05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»** (технические науки) на заседании присутствуют 6 докторов наук.

Наше заседание правомочно.

Председатель

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени **кандидата технических наук Савченко Евгением Геннадьевичем** по теме: "Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире»".

Работа выполнена в Ульяновском государственном университете

Научный руководитель - **д.т.н., профессор Стучебников В.М.**

**Официальные оппоненты:**

**Михайлов Петр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела научных исследований, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза**

**Антонец Иван Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры авиационной техники, ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», г. Ульяновск**

Присутствуют оба оппонента, один из которых (Михайлов П.Г.) в удаленном режиме.

Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены.

Ведущая организация - **Ульяновский филиал ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук.**

Слово предоставляется **Ученому секретарю** диссертационного Совета д.т.н. **А.М. Наместникову** **д212.277.04** для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь

Соискателем **Савченко Евгением Геннадьевичем** представлены в Совет все необходимые документы для защиты кандидатской диссертации (зачитывает) :

- заявление соискателя;
- копия диплома о высшем образовании (заверенная);
- справка об обучении в аспирантуре;
- заключение по диссертации от организации, где выполнялась работа;
- отзыв научного руководителя;
- диссертация и автореферат в требуемом количестве экземпляров.

Все документы личного дела оформлены в соответствии с требованиями Положений ВАК.

Основные положения диссертации отражены **Савченко Е.Г.** в **18** научных работах, в т.ч. в **9 статьях в изданиях из перечня ВАК, 2 публикациях индексируемых Scopus**. Соискатель представлен к защите **27.10.2021 г.** (протокол №7). Объявление о защите размещено на сайте ВАК РФ **28.10.2021 г.**.

Вся необходимая информация по соискателю внесена в ФИС ГНА.

Председатель

Есть ли вопросы по личному делу соискателя к ученому секретарю Совета? (Нет).

Есть ли вопросы к **Савченко Е.Г.** по личному делу? (Нет).

**Евгению Геннадьевичу**, Вам предоставляется слово для изложения основных положений Вашей диссертационной работы.

Соискатель

Здравствуйте, уважаемый председатель, члены диссертационного совета, официальные оппоненты и гости. Хочу представить вашему вниманию работу по теме улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире». Как известно, неотъемлемой частью любой системы управления являются первичные преобразователи физических величин. Наиболее распространёнными и востребованными элементами системы управления являются датчики давления. Самыми распространёнными в России являются датчики давления на основе структур «кремний на сапфире». Дальнейшее развитие в части улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик таких преобразователей давления (ключевой элемент датчика давления) на основе структур «кремний на сапфире» тормозилось отсутствием исследований металлических составляющих этой структуры и их влияния на метрологические и эксплуатационные характеристики тензопреобразователей.

Цель настоящей диссертационного исследования – совершенствование метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей

давления на основе структур «кремний на сапфире» путём выбора наилучших материалов упругих элементов и их соединения с сапфиром.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи: 1) Металлографическое и рентгеноспектральное исследование паяного соединения лейкосапфира с титановым сплавом. 2) Оценка влияния соединительного слоя на метрологические характеристики тензопреобразователей давления. 3) Замена традиционного соединения припоем ПСр72 на пайку аморфным припоем на основе титана. 4) Выбор режима пайки и исследование влияния полученного соединения на метрологические характеристики преобразователей давления. 5) Исследование свойств материала упругой мембранны в широком диапазоне температур, подбор наилучшего материала, изучение влияния материала мембранны и его структурного состояния на метрологические характеристики преобразователей давления. 6) Изготовление партии преобразователей давления с различными комбинациями припоев и материалов мембранны, и исследование характеристик ТП в широком интервале температур и давлений на представительных выборках преобразователей давления с разными комбинациями припоев и материалов мембранны.

Основные положения, которые хотелось бы вынести на защиту: 1) Обнаружена сильная неоднородность соединительного слоя между титановым упругим элементом и сапфиром, полученного обычно используемой пайкой в вакууме припоем ПСр72 (самое распространённое соединение, которое используется во всех преобразователях давления на основе КНС), как по составу, так и по микротвёрдости. Вблизи поверхности сапфира концентрируется серебро, образуя мягкий слой, пластическая деформация которого вызывает погрешности измерения давления. 2) Установлено, что большие гистерезисные эффекты от давления и температуры, которые не поддаются схемотехнической и программной коррекции и существенно влияют на точность датчиков, – это не свойство ПЧЭ на основе КНС (как считалось ранее), а по большей части свойство паяного слоя. Эти оказалось возможным устранить, используя жесткий аморфный припой на основе титана и циркония. 3) Выбор материала упругого элемента и припоя сильно влияет на гистерезис первого нагружения и на характеристики ТП в области высоких температур. Было выявлено, что наилучшими на сегодняшний день являются титановые сплавы ВТ6 и ВТ9. 4) Для получения высокоточных ТП давления необходимо учитывать не только состав, но и структурное состояние металла упругого элемента.

На слайде представлен общий вид датчика давления. В данной диссертационной работе будет рассматриваться его первичная часть – первичный преобразователь давления, который непосредственно преобразуется физическую величину давление в пропорциональный электрический сигнал. Стоит отметить, что вот этой части, а именно электронному блоку преобразования, термокомпенсации и нормирования сигнала посвящено достаточно много работ и эта часть датчика уже достаточно подробно исследована. Также посвящено большое количество публикаций и диссертационных работ конструкции мембранны, а именно ее геометрии, распределению деформации по этой мемbrane и так далее. Но до сегодняшнего момента никто не занимался исследованием именно соединительного слоя этого элемента (мембранны) с полупроводниковым чувствительным элементом на основе КНС и оценкой того, как данное соединение влияет на метрологические и эксплуатационные характеристики преобразователя и возможно ли их улучшить.

На следующем слайде представлены конструктивные схемы преобразователей давления: одномембранные и двухмембранные. В данной работе будет рассмотрен самый простой тип – одномембранный преобразователь давления.

На следующем слайде представлены эпюры преобразования давления в электрический сигнал. Имеется идеальная характеристика (синяя прямая) преобразования. Естественно, любой датчик и преобразователь давления такой характеристикой не обладает, его реальная характеристика искривлена – зеленая кривая. У этой реальной характеристики присутствуют следующие параметры: нелинейность, вариация (несовпадение выходного сигнала при возрастании и убывании давления). Также есть такой параметр как гистерезис – несовпадение сигнала вначале измерений и после снятия давления. В приборостроении точностью преобразователя давления принято называть корень квадратный из комбинации суммы квадратов нелинейности, вариации и повторяемости. Также стоит отметить такую логическую цепочку точность преобразователя – есть точность датчика и соответственно точность системы управления. Данная работа посвящена улучшению характеристик, которые невозможны устраниить схемотехническим и программными средствами.

Нами в работе был введён термин, которого нет в ГОСТе, посвящённом датчикам давления. Этот параметр не регламентируется. Тем не менее, это важный параметр при прецизионных измерения давления. Называется этот параметр гистерезис первого нагружения. Это не совпадение начального выходного сигнала до нагружения прибора и после, при этом повторные нагружение прибора уже не приводит к изменениям начального выходного сигнала. Что примечательно, это явление возникает вновь после изменения температуры. Существует ещё один нереегламентированный параметр датчика давления как температурный гистерезис – это не совпадение начального выходного сигнала при нагреве и охлаждение, т.е. выходной сигнал датчика зависит от того предварительно был нагрет прибор или охлаждён.

Работа начиналась с того, что мы решили провести исследование материала упругой мембранны, которая может быть изготовлена из различных титановых сплавов доступных в России. Это было сделано для понимания того какой материал подходит больше. Основным критерием был предел прочности и предел текучести (величина напряжений при которых возникают пластические деформации). Т.е. в случае мембранны – чем выше данные пределы, тем лучше. Были проведены испытания при различных температурах на разрывной машине в результате чего был определён оптимальный сплав, это ВТ6. После этого была проведена оценка влияния режимов термообработки и был подобран специальный режим термообработки для получения максимально высоких механических характеристик. Далее, для понимания того, как этот преобразователь будет работать при температуре, были проведены на дилатометре измерения температурных коэффициентов линейного расширения материалов для понимания согласованности металлической мембранны с сапфиром. Как видно титановые сплавы имеют примерно одинаковую величину ТКЛР. Так что специально был подобран материал 29НК (ковар-сплав на основе железа), который оптимально подходит по температурному коэффициент линейного расширения к сапфиру.

В работе было проведено исследование стандартного классического паяного соединения, которое используется с советских времён во всех преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире». В этом соединении используется классический припой ПСр72, это

кристаллический припой на основе серебра и меди. Был изготовлен микрошлиф данного соединения, по шлифу с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра был измерен химический состав, также была измерена микротвёрдость. Как показали исследования данное соединение (с помощью припоя ПСр72) после высокотемпературной пайки имеет неоднородный состав (образуется жёсткое интерметалличное соединение титана с медью и возникает мягкий слой серебра непосредственно под сапфиром). Расчёты показывают, что данный мягкий слой имеет предел прочности ниже тех напряжений, при которых работает датчик в температурном диапазоне, что приводит к нежелательным пластическим деформациям в этом слое. А любая пластическая деформация в слое между мембраной и кристаллом – это погрешность преобразования датчика.

Далее был использован припой на основе титана, это жёсткий аморфный припой, разработанный в Московском инженерно-физическом институте. Данный припой позволил соединить титановую мембрану с сапфиром. Как показали исследования данное соединение однородно по химическим свойствам и механическим характеристикам. Более того его механические характеристики выше механических характеристик сплава, из которого изготовлена мембрана.

После чего была изготовлена большая партия преобразователей давления для оценки влияния материала упругого элемента и припоя на метрологические характеристики преобразователей. Первое на что посмотрели это влияние материала мембранны на температурный дрейф начального выходного сигнала. Была найдена взаимосвязь (демонстрируются графики) материала мембранны с метрологическими характеристиками преобразователей. Далее на слайдах представлена большая выборка с различными комбинациями материалов мембранны. На графике есть разделение по температуре испытаний, а цветовая палитра на гистограммах показывает различные припои. Как видно, припой действительно сильно влияет на метрологические характеристики, а именно вариация при минусовых температурах уменьшается в разы. Аналогично ведет себя и такой параметр как гистерезис, который входит в точность конечного датчика. Наиболее сильное влияние паяное соединение оказывает на гистерезис первого нагружения. Хочу обратить внимание, что в данном месте (демонстрируется место на гистограмме) присутствует разрыв шкалы, то есть гистерезис первого нагружения уменьшается в 100 раз. При прецизионных измерениях это очень маленькая величина и обнаружение этой погрешности позволило изготовить преобразователь давления, который на сегодняшний день используется в датчиках давления для криогенных температур. Данный слайд показывает (демонстрируются различные участки гистограмм) что нам действительно удалось улучшить параметр гистерезис первого нагружения, он отсутствует. В классическом соединении гистерезис при первом нагружении есть, потом он пропадает и вновь возникает при изменении температуры. Данный слайд тоже демонстрирует влияние припоя на гистерезис первого нагружения, здесь также видно, что оптимальным является припой на основе титана.

Далее был описан механизм возникновения гистерезиса первого нагружения. Была взята теория упругости и найдены взаимосвязи механических характеристик титановых сплавов, материалов и соединений с выходными сигналами преобразователей. Также, как оказалось, материал мембранны влияет и на параметр температурный гистерезис. Здесь, стоит отметить, что оптимальным также получилось соединение с использованием аморфного припоя на основе титана – температурный гистерезис при этом минимальен. На основе разработанных преобразователей

давления на сегодняшний момент удалось внедрить в производство и сейчас серийный изготавливаются эталонные датчики абсолютного и избыточного давления с основной приведённой погрешностью ниже 0,02%. Эти приборы используются в качестве эталонов в различных прецизионных системах управления.

Далее была проведена оценка влияния материалов на характеристики преобразователей давления в высокотемпературном диапазоне. Там уже возникает другая проблема: материал мембранны начинает «ползти» под давлением, т.е. при постоянном давлении выходной сигнал во времени изменяется. Это связано с таким параметром как предел ползучести металлического упругого элемента. Здесь видно (демонстрируется график) что при температуре 300 градусов характеристики прибора упираются в механические возможности мембранны.

Был разработан режим термомеханической стабилизации, заключающийся в выдержке прибора под давлением в полтора раза превышающим номинальное при повышенной температуре. Данная термомеханическая стабилизации помогла расширить температурный диапазон работы преобразователя до 350 градусов Цельсия, при этом раньше преобразователи работали до температуры 300 градусов. Это касается также гистерезиса и гистерезиса первого нагружения.

Последнее что удалось попробовать это влияние структурного состояния материала мембранны на характеристики преобразователя. Для данного эксперимента была использована одна интересная технология, это технология SLM (послойное лазерное спекание), это 3D печать из металлического порошка. Полученный материал оказался в конечном счете прочнее чем мембранны, изготовленная из катаного материала. На данном слайде представлены 3 микроструктуры, то есть было взято 3 группы приборов: это классические преобразователи без термообработки, преобразователи с закаленными мембранными и преобразователи с мембранными, «напечатанными» на 3D принтере. Как и ожидалось у нас наблюдается «ползучесть» характеристики при повышенных температурах, в варианте с закалкой получилось искривление данной характеристики, в варианте с «напечатанными» мембранными наблюдается положительный эффект, связанный с тем, что температура 300 градусов стала доступной для работы преобразователей.

#### Основные выводы и результаты:

1. Впервые детально исследовано паяное соединение титанового сплава с сапфиром (припой ПСр72). Это соединение сегодня используется практически во всех датчиках и преобразователях давления на основе КНС и играет в них одну из ключевых ролей, оказывающую непосредственное влияние на точность и стабильность преобразования давления в электрический сигнал. Показано, что:

- в паяном соединении присутствует чёткое разделение слоёв;
- титан образует интерметаллиды TiCu с медью, входящей в состав припоя ПСр72;

• максимальное количество серебра располагается непосредственно под сапфиром, что является самым мягким слоем, предел пластичности которого ниже температурных напряжений, возникающих при работе ТП. Это говорит о возможности пластических деформаций в слое припоя, что сказывается на точностных параметрах ТП и их стабильности. Выявлено, что данные недостатки соединения можно устранить, используя аморфный припой марки СТЕМЕТ.

2. Впервые получены и исследованы соединения упругих элементов ТП давления с лейкосапфиром с помощью высокотемпературной вакуумной

пайки аморфными припоями марки СТЕМЕТ на основе титана и циркония. Выявлено, что недостатки соединения припоеем ПСр72 можно устраниТЬ, используя припой СТЕМЕТ. Показано, что соединительный слой:

- однороден как по механическим свойствам, так и по химическому составу;

- величина микротвёрдости паяного соединения больше, чем микротвёрдость титанового сплава. Такая повышенная прочность соединительного слоя препятствует возникновению в нём пластических деформаций и ползучести при механическом нагружении, что существенно улучшает метрологические и эксплуатационные характеристики ТП и датчиков давления на их основе: вариация снижается в 4-7 раз; ГПН при отрицательной температуре снижается в 100 раз.

3. Разработан и введён в серийное производство в ПГ МИДА техпроцесс пайки припоеем СТЕМЕТ 1202, что привело к значительному улучшению характеристик (снижение вариации выпускаемых приборов) и, в частности, дало возможность освоить производство серии эталонных датчиков давления с точностью лучше 0,05% (до 0,01%). Такие датчики открывают путь к построению высокоточных систем управления для ответственных технологических процессов.

4. Теоретически обоснован и практически исследован техпроцесс термомеханической стабилизации тензопреобразователей, с помощью которого удалось расширить температурный диапазон работы высокоточных ТП давления до 350 °С.

5. Продемонстрировано влияние каждого из компонентов системы «материал мембранны-припой-сапфир» на метрологические характеристики ТП. Показано, что соединительный слой сильно влияет на такие параметры как ГПН и гистерезис, особенно при отрицательных температурах. Описан механизм образования ГПН. При высоких температурах (больше 150 °С) основную роль начинают играть механические свойства материала мембранны.

6. Экспериментально доказано, что структурное состояние металла упругой мембранны играет важную роль при проектировании преобразователей и датчиков давления на основе КНС с высокими метрологическими характеристиками. Показано, что оптимальной микроструктурой для упругих элементов датчиков давления является мелковзернистая структура 1-3 балла глобуллярного типа.

7. Показано, что использование аморфных припоев позволяет соединять ПЧЭ на основе КНС не только с титановыми сплавами, но и с другими материалами. Это открывает возможности дальнейшего улучшения характеристик ТП давления на основе КНС, что должно стать предметом дальнейших исследований в этом направлении.

В заключении я бы хотел продемонстрировать слайды с конкретными приборами, в которых уже внедрены усовершенствованные преобразователи давления, и показать в каких системах контроля и управления они используются. Вот наиболее популярные общепромышленные датчики используются в системах контроля и регулирования для газопроводов, в т.ч. атомной электроэнергетике, системы управления бурением и нефтедобычей. Датчик дифференциального давления широко распространён в России и используется в системах контроля и управления технологическими процессами, в системах коммерческого учета расхода природного газа. Получилось создать и серию специальных датчиков давления: датчики давления, работающие при криогенных температурах (т.к. удалось «побороть» гистерезис первого нагружения при отрицательных

температурах), эталонные датчики давления и высокотемпературные датчики давления расплава полимеров.

Также стоит отметить, что преобразователь с улучшенными метрологическими характеристиками работает в составе датчика давления, который работает в системе поддержания жизнеобеспечения космонавтов в Российском сегменте МКС. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Евгений Геннадьевич. Пожалуйста, вопросы, коллеги. У кого есть вопросы?

д.Ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

Можно?

Председатель

Да, пожалуйста.

д.Ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

По уточнению терминов. Вы в выводах использовали для характеристики соединительного сплава такой параметр, как предел пластичности. Объясните, что это такое?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Когда мы исследовали характеристики материалов упругого элемента, мы обращали внимание на два параметра – это предел пластичности и предел прочности. Предел пластичности – это то напряжение, ниже которого материал работает в упругой зоне, то есть без пластической деформации.

д.Ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

Это как предел упругости?

Соискатель

Предел упругости, предел текучести и предел пластичности – это одни и те же величины, просто предел пластичности в металлографии нормируется как... то есть это величина чуть ниже предела упругости, точнее чуть выше предела упругости. Предел упругости – это предел, ниже которого материалы работают в упругой зоне, то есть без пластической деформации. Предел текучести – это при котором пластическая деформация позволительна, но не более 0,2%, это чуть выше. Это называется предел упругости. Мы рассматривали его в докладе.

д.Ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

Понятно, но не предел пластичности, тем более что в докладе Вы сказали предел прочности.

Соискатель

Да, перепутал.

д.ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

Оговорились, наверное?

Соискатель

Да, да.

Председатель

Хорошо, тогда пожалуйста, пожалуйста.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Я привстану. Хотел сказать, какое давление Вы измеряете, статическое или динамическое?

Соискатель

В данной работе мы измеряем статическое давление.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

А каким образом получили Вы петли гистерезиса?

Соискатель

Петля гистерезиса. В данном случае преобразователь любой имеет вот такую вот петлю гистерезиса или вариацию, как мы называем ее, задается поступенчато статическое давление, разбивается диапазон датчика на четыре точки: четверть, половина, 75% и 100%.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

То есть, есть момент, когда отключаем, включаем, так далее. Есть моменты, это петля получается, да?

Соискатель

Да, да.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Но в процессе эксплуатации вот эта петля изменяется, изменяется сперва площадь – снижается до определенной точки, когда поверхностная твердость увеличивается – А точка, а потом начинается стабилизация, да? Скорость роста микротрещин уже на пластине зависит от угла наклонов, вот это, да. Вы исследовали? Исследовали вот эти явления?

Соискатель

Я понял, спасибо за вопрос. К сожалению, данное явление не исследовали. В данной работе рассматривал задачи именно статического давления.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

И теперь в автореферате утверждаете, что оптимальным является сплав ВТ9 и ВТ16, оптимальным. Вы почему утверждаете, у вас критерии есть оптимальности?

Соискатель

Критерии оптимальности – это... Во-первых, почему рассматривается данный вид сплава, стоит сказать об этом, потому что температурный коэффициент линейного расширения сапфира достаточно низкий и с любым материалом его соединять не получается, то есть его просто физически рвет.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Экспериментальным путем.

Соискатель

Да, поэтому берутся, именно рассматриваются титановые сплавы.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Составляется же математическая модель же, чтобы оптимально, критерии оптимальности: условное привлечение, варьируемые параметры и так далее. И потом проверяется устойчивость, тогда можно утверждать, что ВТ9, ВТ16 оптимально такие-то. Теперь у меня вопрос возник по автореферату. Впервые были детально исследованы паяные соединения титанового сплава, в то же время утверждать что-то они применяются в промышленности. Что ж здесь у вас нового?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Данный тип соединения используется во всех датчиках давления на основе структур «кремний на сапфире, изготавливаемых на территории России, но соединение это исследовано впервые, то есть разработано оно в НИИТеплоприбор в 70-х годах прошлого века, но именно исследовано это соединение впервые.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Еще вопрос. Все титановые сплавы, кроме ОТ4 являются двухфазными, в то же время вы утверждаете, что ОТ4 – однофазный. Как понять вот этот смысл?

Соискатель

Да, здесь некоторая, так сказать, игра слов. Все титановые сплавы, которые мы использовали в данной работе, являются двухфазными за исключением ОТ4. Данный сплав является однофазным.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Ага. Вот использовали технологию SLM, да? Могли бы объяснить вкратце, что за технология?

Соискатель

Да, сейчас покажу. Спасибо за вопрос. Это, кстати, очень перспективная популярная технология в данное время – это технология Selective Laser Melting, так называемое послойно лазерное стекание, то есть это изготовление деталей послойным стеканием лазером из порошкового материала.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

И последний вопрос. Значит использовали температуру 300°C? Каким образом Вы достигали этой температуры?

Соискатель

Сейчас покажу. Спасибо за вопрос.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

И как Вы работали с этим температурным режимом?

Соискатель

Вот смотрите. Вот сама структурная схема испытаний, то есть у нас, соответственно, измеритель выходных сигналов преобразователя, в данном случае это просто многоканальный прецизионный вольтметр, задатчик давления эталонный в виде грузопоршневого манометра, источник питания. Все приборы размещались в термокамере, внутри размещалась термопара для контроля температуры.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Понятно. Как Вы получали 300°C, 350°C там, 400°C?

Соискатель

Высокотемпературная печь у нас есть, которая работает от -100°C до +550°C.

Председатель

Коллеги, пожалуйста, вопросы. Да, пожалуйста, Константин Константинович.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Я вот почему-то при предварительном рассмотрении обращал внимание, на то, что всё-таки этот датчик больше Вы позиционируете как элемент системы управления. Вы могли бы привести улучшение характеристик каких-нибудь систем управления с применением вашего датчика?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Да, с удовольствием. В частности, разработанный преобразователь давления с улучшенными характеристиками используется в датчике дифференциального давления производства МИДА, который используется в системе управления расходом и коммерческим учета газа компании «ЭЛЬСТЕР Газэлектроника» из Арзамаса, то есть этот датчик используется в системе учета и контроля газа, соответственно, чем точнее датчик, тем фактически меньше потребитель переплачивает за газ.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Непонятный показатель качества с точки зрения системы управления. Понимаете? То есть система управления может иметь такие характеристики, как точность, надежность, в конце концов. Вот такие. Система управления – это нечто замкнутое, что следит, и датчик должен быть не в составе. В составе такой вот системы, будет она, действительно, система автоматического управления или, может, атомная энергетика или что-то вот?

Соискатель

Я понял. Спасибо за вопрос. В тех системах, где используются данные датчики давления, чем точнее датчик давления, тем точнее система управления.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Евгений Геннадьевич, это понятно. На сколько? Понимаете, может быть, изменение повышения точности вашего датчика не приведет, если система управления какая-то особенная? Не приведет к лучшему характеристике этой системы. Перечислите, какие системы управления, в каких системах управления может использоваться ваш датчик?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Наш датчик используется в системе управления атомными электростанциями, гидроэлектростанциями, в системах управления контроля учета газовых носителей, системах контроля и хранения сжиженного природного газа, его транспортировки, то есть один из основных параметров помимо температуры – это контроль давления.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Это понятно. Понимаете, что я делаю? Меня интересуют системные характеристики, то есть на сколько улучшаются характеристики систем,

но это я понимаю, из того, что Вы перечислили, есть надежда, что, действительно, эти системы управления станут лучше. Хорошо было бы, если бы это показать диссертации, но, в принципе, можно представить. Но еще один вопрос. Вы не сказали, каким пунктам специальности соответствует ваша диссертация?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Данная диссертационная работа соответствует второму пункту специальности, а именно улучшение точностных метрологических характеристик первичных измерителей, входящих в состав системы управления, также расширение их эксплуатационных характеристик.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Спасибо.

д.Ф-м.н., профессор Самохвалов М.К.

То есть теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования?

Соискатель

Да.

Председатель

Прошу, коллеги, вопросы, пожалуйста. Пожалуйста, Анатолий Афанасьевич.

д.т.н., профессор Гладких А.А.

Евгений Геннадьевич, я как-то не услышал влияние вибрационных нагрузок. Исследовался ли такой вопрос, или у вас только статическая нагрузка была?

Соискатель

Спасибо за вопрос. В данной работе влияние вибрационных нагрузок не исследовалось, точнее результаты не представлены, но вообще такие исследования были, были проведены, в частности, при разработке датчика давления, который эксплуатируется на МКС, то есть такие испытания...

д.т.н., профессор Гладких А.А.

Простите, но Вы предполагаете, что ваши датчики будут противостоять каким-то особым вот таким вибрационным нагрузкам, которые используются в тех устройствах управления, которые были перечислены в заключительной части доклада?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Да, противостоять будут, так как они уже на сегодняшний момент используются, проведены испытания, в том числе вибрационные, в компаниях, занимающихся космическими технологиями, ракетостроением и так далее.

д.т.н., профессор Гладких А.А.

Спасибо.

Председатель

Пожалуйста, Рудольф Александрович.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Три вопроса у меня. В пункте 3 выводов Вы говорите, что точность вашего датчика достигает 0,01%. Пожалуйста, 15 слайд показите. Я смотрю на этот график температурного дрейфа начального выходного сигнала, смотрю на среднее значение и на абсолютные погрешности. В конце графика там по красной кривой 20% погрешность, если верить этим разноскам, на нижней кривой 100% погрешность. В начале кривой, где первая точка, соответственно, 100% и 200% погрешность. Возникает вопрос: чем определялась абсолютная погрешность этих измерений, таким образом?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Смотрите, начать стоит с того, что на данном графике представлены температурный дрейф, температурная зависимость начального выходного сигнала от температуры...

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Я понял. Я об этом и говорю.

Соискатель

Данная погрешность компенсируется электронным блоком.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Не надо компенсации. Чем определялась величина погрешности? Вот эти разноски как Вы нарисовали?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Стоит уточнить, вот эти разноски – это не погрешность измерения конкретного, здесь указана... Была выборка приборов по 10 приборов, то есть 10 приборов с мембраной из титанового сплава имеют вот такой разброс.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

То есть это не для одного прибора, а для серии приборов?

Соискатель

Это не для одного прибора. Это да, разброс серии приборов.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Хорошо. Продолжение этого вопроса. Статическое измерение. Если Вы поставили свой прибор в конкретную систему управления в аппаратуру, никто не гарантирует вам температурного изменения в процессе эксплуатации. Допустим, если у вас  $100^{\circ}\text{C}$  за бортом,  $+/- 1^{\circ}\text{C}$  – это легкое дуновение ветра, а это  $1$  от  $100$  уже  $1\%$  погрешности. Как реализуются на практике эти  $0,01\%$ ? У вас же невысокостабилизированный там по температуре какой-то стоит контейнер, где этот датчик находится?

Соискатель

Я понял. Спасибо за вопрос. Что касается именно  $0,01\%$ , то это относится к эталонным датчикам давления, которые рассчитаны на работу в диапазоне от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$ . Данная коррекция внутри этого небольшого диапазона от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$  осуществляется посредством электронной термокомпенсации.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

То есть все компенсирующие внешние воздействия условия предполагаются присутствующими? И имеется в виду погрешность интегральная?

Соискатель

Да.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Хорошо. Я понял. Спасибо. Еще один вопрос. 23 слайд, пожалуйста. Какова максимальная величина измеряемого давления? Я смотрю тут у вас порядка одной атмосферы?

Соискатель

Нет. Спасибо за вопрос. Смотрите, что касается диссертационной работы, первая часть, посвященная общепромышленным преобразователям давления, давление там задавалось  $4 \text{ МПа}$ , то есть это  $40$  атмосфер. Вот данный датчик с таким характеристиками, внутри которого стоит усовершенствованный преобразователь давления, может измерять давление, начиная от  $10 \text{ кПа}$  до  $250 \text{ МПа}$  – до  $2,5$  тысяч атмосфер.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

То есть вот эти графики, они только какой-то фрагмент перекрывают?

Соискатель

Да. В данном случае представлен датчик абсолютного давления на давление 100 кПа, ну т.е. на одну атмосферу.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

А если 1 МПа сделаем, увеличим в 10 раз?

Соискатель

Когда мы увеличиваем в 10 раз, там меняется фактически толщина мембранны.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Это другой датчик уже будет?

Соискатель

Будет датчик другой.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

То есть это серия, другой диапазон? На каждый диапазон своя мембрана?

Соискатель

На каждый диапазон варьируется своя мембрана, именно так.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Понятно. Тогда возникает еще один вопрос интегрального характера. Если так или иначе кругом у вас электронные компенсаторы стоят, то какие именно вещи, которые нельзя скомпенсировать, удалось улучшить применением ваших припоев?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Как раз вернувшись к этой картинке, то есть такая величина, как нелинейность, которая показывает отклонение реальной характеристики от прямой, она легко и давно уже достаточно умело компенсируется схемотехническими программными средствами. Температурная погрешность, о которой мы говорили до этого: температурная погрешность как начального выходного сигнала, так и диапазона изменения датчика, тоже компенсируется, а вот такие вещи, как вариация выходного сигнала и гистерезис, а также такой параметр как гистерезис первого нагружения, который нигде не регламентирован и

воспроизводится только после определенных изменений температуры, их компенсировать электроникой нельзя. И поэтому, если мы перед электроникой ставим классический преобразователь, то у нас эта погрешность переходит и в конечную погрешность датчика. Если мы эти погрешности убираем на этапе преобразователя, мы получаем более точный датчик.

д.ф-м.н., профессор Браже Р.А.

Хорошо, спасибо.

д.т.н., профессор Сергеев В.А.

Вот там 16, 17 и 18 слайды, пожалуйста. Там, где сравнение с разными припоями. Уточните, на какой выборке этих образцов проводились измерения? То есть каждый столбик – это образец, получается?

Соискатель

Да, спасибо за вопрос.

д.т.н., профессор Сергеев В.А.

Здесь у вас по четыре или по пять образцов?

Соискатель

По пять.

д.т.н., профессор Сергеев В.А.

А на 19 слайде уже какая-то другая выборка по количеству? Наверное, надо какое-то среднее значение определить, СКО в пределах выборки и так дальше, чтобы можно было говорить о закономерностях и зависимостях каких-то?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Да, этому слайду стоит уделить побольше времени и пояснить. Здесь каждый столбец – это отдельный прибор. Соответственно, была изготовлена комбинация из материалов мембранные и три разных варианта соединения: припой на основе титана, циркония и классическое соединение. Когда в диссертационной работе приводятся сравнительные характеристики, тогда там, действительно, считается среднее значение, среднеквадратичное отклонение и так далее. Здесь выборка представлена именно в таком виде для демонстрации того, что существует некоторая кучность, и для большего понимания картины в целом. Что касается 19 слайда, то на нем как раз представлены средние значения для разных титановых сплавов. И этот слайд служит для понимания того, что гистерезис первого нагружения возникает именно после изменения температуры. То есть вот он был, потом он пропал, температуру изменили – он возник вновь. На приборах с твердым аморфным припоеем на основе титана такой вещи не наблюдается. Здесь уже да, среднее значение.

д.т.н., профессор Сергеев В.А.

Понятно. Всё, спасибо.

Председатель

Пожалуйста, коллеги, есть еще вопросы? Да, пожалуйста.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Евгений Геннадьевич, непосредственно по тексту диссертации. На странице 20-й или 26-й где-то у вас рассматривается измерительный четырехплечий мост. Там написано: «Если в отсутствие измеряемого параметра сопротивление тензорезисторов одинаковое:  $R_1, R_2, R_3, R_4 = R_0$ , то выходное напряжение тензочувствительной схемы при питании моста постоянного напряжения по питанию определяется выражением:  $U_{\text{выхода}}=U_{\text{питания}}(R_1-R_2)/(R_1+R_2)$ . Откуда такое выражение получилось? Во-первых, если берем при нуле, то у нас будет ноль. А если у нас все параметры заданы, тогда это известная формула: разность произведения противолежащих плечей делить на сумму смежных плечей.

Соискатель

Спасибо за вопрос. Согласен с замечанием.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Вопрос по автореферату. Как я понял, рисунок 17 на странице 20 базовый. Это типовой график, да? Здесь написано, что это типичное отклонение для ВТ6 без термообработки. То есть это база, и Вы с ним сравниваетесь, раз без термообработки идет? Вы же термообработку сравниваете?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Данная картинка - это классический преобразователь давления. Здесь четыре его характеристики при разных температурах. При повышенной температуре наблюдается вот такое отвисание обратной ветви, когда мы опускаемся по давлению, связанное с тем, что происходит пластическая деформация материала мембранны. Здесь приборы, которые изготовлены по технологии послойного лазерного спекания, то есть это один прибор и его же характеристика при четырех температурах +40°C, +100°C, +220°C и +300°C.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Но это не ваше?

Соискатель

Нет, это экспериментальные результаты.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Но это ваша разработка, то, что Вы защищаете?

Соискатель

Да.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Вот то, что на этом рисунке, который сверху, да?

Соискатель

Это последняя часть диссертационной работы, где мы как раз оценивали влияние структурного состояния на метрологические характеристики. Здесь три мембранны с разным структурным состоянием. То есть характеристика у одного и того же прибора может быть такая, такая и такая в зависимости от того, в каком структурном состоянии находится мембрана, которая используется в этом преобразователе.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Здесь Вы пишите: «...это приводит к ощутимому гистерезису...» сверху. «На рисунке 17 представлены типичные значения отклонения от линейной зависимости» и дальше...

Соискатель

Я понял. Спасибо за вопрос. Да, мне кто-то в отзывах на автореферат тоже указал, там есть опечатка в подписи рисунка. В данном случае, наверное, это относится к другому рисунку.

д.т.н., доцент Курганов С.А.

Всё, нет вопросов.

Соискатель

Спасибо.

Председатель

Хорошо. Так, коллеги... Да, пожалуйста.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Евгений Геннадьевич, можно восьмой слайд? Тут графики как раз, которые демонстрируют температурный гистерезис. Поясните, пожалуйста, условия проведения эксперимента, при которых получены вот эти графики.

Соискатель

Спасибо за вопрос. На данном графике представлено значение начального выходного сигнала при фиксированной температуре (при комнатной), но это значение получено при разных предшествующих обстоятельствах. А именно, данные точки получены при температуре +40°C, когда до этого прибор находился при -40°C. Данная точка тоже при комнатной температуре, но прибор после +80°C. То есть температура здесь одна и та же при изменении сигнала, просто прибор до этого либо извлекался из холода, либо из +80°C. Соответственно вот эта величина, то есть не совпадение сигнала в зависимости от того с минуса прибор пришел или с плюса называется температурным гистерезисом. Фактически это понятие также ввели мы, но в зарубежном приборостроении параметры температурного гистерезиса тоже нормируются.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Физически, возникновение вот этого температурного гистерезиса, как Вы его называете, понятно, но здесь еще присутствует линейное нарастание сигнала.

Соискатель

Линейное нарастание сигнала в данном случае величина небольшая. Есть еще такой параметр, как стабильность преобразователя. То есть это временная нестабильность преобразователя. При комнатной температуре он лежит, а выходной сигнал в любом случае всегда куда-то немножко дрейфует. То есть здесь температурный гистерезис на фоне нестабильности.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Временной нестабильности. На самом деле, даже если посмотреть, небольшой ее не назвать. Фактически здесь стабильность при физических нагрузлениях такая же, как и температура гистерезиса по величине.

Соискатель

Спасибо за вопрос. В данном случае я могу объяснить это тем, что вот эти температуры фиксировались четко, а в данном случае температура измерения этих точек, то есть комнатная, она каждый раз была немножко различной и здесь еще есть небольшой вклад просто температурного дрейфа, который электроникой компенсируется. То есть здесь температура как бы всегда комнатная, но она не фиксировалась термостатом и так далее, то есть она всегда немножко отличалась и поэтому здесь возможно еще есть вклад температурного дрейфа.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

В лаборатории становилось всё теплее, теплее и теплее.

Соискатель

Если эти испытания разложить по времени, то это примерно где-то полтора месяца и поэтому...

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Всё, тогда понятно.

Соискатель

То есть здесь выход на режим каждый, то два часа печь греется, два часа просто стоит. То есть это не один день.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Я просто предполагал, что это гораздо меньший период по времени. Всё, тогда понятно. Спасибо.

Председатель

Виктор Николаевич, пожалуйста.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Когда встраивается в систему управления такой датчик, если он не линейный, то программист обычно извлекает из паспорта просто узлы интерполяционные, пары вот этих точек: сигнал, допустим, напряжение и давление. Если есть температурная зависимость, у него появляется еще один ряд для интерполяции, да? Вот в вашем случае, что поддерживает встраивание его в устройство управления, какие паспортные данные? Они поменялись по характеру по сравнению с двумя вот этими (раз температурная зависимость) с двумя этими рядами интерполяционных узлов или это не так? Или что-то другое?

Соискатель

Понял вас. Спасибо за вопрос. Существует два вида продукции. Это конечный датчик давления с нормированным выходным сигналом, у которого внутри стоит микропроцессор. В него туда уже вшиты все интерполяционные вещи...

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Мы про интегрированный интегральный датчик говорим.

Соискатель

Да.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Вы же не разрабатываете эту электронную часть, значит, Вы всё равно должны давать тому разработчику датчиков эти вещи.

Соискатель

Да, разработчику датчиков с этим преобразователем дается температурная зависимость и зависимость выходного сигнала от давления. Он рассчитывает эти коэффициенты и соответственно всё это у себя использует. Таким образом, он может убрать нелинейность характеристики и температурную погрешность. Но такие параметры, как вариация, гистерезис, гистерезис первого нагружения, если они использованы в преобразователе, устранить на этапе электроники или программной обработки нельзя. То есть мы убираем эти погрешности в преобразователе и говорим, что это важно для конструирования точных датчиков давления.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Спасибо.

Председатель

Я думаю, что отличный вопрос как раз Виктор Николаевич задал, который поясняет, каким образом разработчики могут встроить этот датчик при конструировании и синтезе системы управления.

Коллеги, есть еще вопросы? Нет вопросов.

**Согласны ли члены Совета сделать технический перерыв?** (Нет).  
Тогда продолжаем работу.

**Ученому секретарю Совета** предоставляется слово для оглашения отзыва научного руководителя работы **профессора Стучебникова В.М.**

(Отзыв прилагается).

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, отзыв научного руководителя о диссертационной работе Савченко Е.Г., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Тема диссертации Е.Г. Савченко, несомненно, актуальна, поскольку давление – это важнейший контролируемый параметр в практических системах контроля и управления, а с развитием этих систем к метрологическим и эксплуатационным характеристикам входящих в их состав датчиков предъявляются всё более жёсткие требования.

Выбор объекта исследования – тензореобразователи (ТР) давления на основе структур «кремний на сапфире» (КНС) также является оправданным по некоторым причинам. Во-первых, в основе большинства датчиков давления лежит тензорезистивный эффект в полупроводниках или металлах и сплавах, а конструктивно в них используются мембранные упругие элементы чашечного типа, воспринимающие давление, на которых тем или иным образом закреплены тензорезисторы, изменяющие свое сопротивление под действием деформации мембранны. Во-вторых, ТР давления на основе КНС впервые были разработаны в СССР и показали широчайшие потенциальные возможности точного измерения давления в условиях высоких и криогенных температур, а также в условиях радиации. На основе таких ТР в 70-х годах были разработаны и освоены в

производстве комплексы датчиков «Сапфир» и «Сапфир-22», которые стали основным средством измерения давления в промышленности СССР последней четверти прошлого века. В настоящее время ряд зарубежных фирм обращается к ТП давления на основе КНС как передовому направлению в измерении давления. Наконец, что немаловажно, ТП на основе КНС являются единственными общепромышленными преобразователями давления, полностью изготавливаемыми в современной России.

В последние десятилетия исследования и разработки ТП и датчиков давления на основе КНС были продолжены в Промышленной группе «Микроэлектронные датчики» (ПГ МИДА, г. Ульяновск). Были проведены исследования по оптимизации расположения тензорезисторов на поверхности мембран, расчётом и коррекции конструктива мембран и ТП в целом, выполнен ряд работ по температурной компенсации приборов на КНС, цифровой коррекции погрешностей. Эти работы позволили реализовать некоторые потенциальные возможности ТП на основе КНС в серийном выпуске ряда малогабаритных датчиков давления МИДА-12П, МИДА-13П, МИДА-15 с улучшенными метрологическими характеристиками и расширенным диапазоном эксплуатации.

Вместе с тем до последнего времени оставался в тени вопрос о влиянии металлических составляющих ТП (упругая металлическая мембрана и соединительный слой мембрана-сапфир) на метрологические и эксплуатационные характеристики ТП на основе КНС. Именно такая задача, требующая как материаловедческих, так и метрологических исследований, была поставлена перед докторантом, и с этой задачей Е.Г. Савченко успешно справился.

В представленной диссертации получены следующие основные результаты.

1. Подробно исследована новая, нерегламентированная погрешность ТП давления – гистерезис первого нагружения (ГПН); описан её механизм, показана связь этого явления с характеристиками соединительного слоя и предложено физико-технологическое решение, практически исключающее эту погрешность.
2. Впервые детально исследовано стандартное паяное соединение титанового сплава с сапфиром (припой ПСр72). Показано, что в соединительном слое:
  - присутствует чёткое разделение составляющих элементов;
  - титан вблизи поверхности мембранны образует интерметаллиды TiCu с медью, входящей в состав припоя ПСр72;
  - максимальное количество серебра располагается непосредственно под сапфиром, что является самым мягким слоем, предел пластичности которого ниже температурных напряжений, возникающих при работе ТП. В результате в слое припоя могут возникать пластические деформации, ведущие к ГПН и нестабильности ТП.
3. Предложено, реализовано и исследовано соединение упругих элементов ТП давления с сапфиром с помощью высокотемпературной вакуумной пайки аморфными припоями марки СТЕМЕТ на основе титана и циркония. Показано, что в этом случае соединительный слой:
  - однороден как по механическим свойствам, так и по химическому составу;
  - величина микротвёрдости паяного соединения больше, чем микротвёрдость титанового сплава. Такая повышенная прочность

соединительного слоя препятствует возникновению в нём пласти- ческих деформаций и ползучести при механическом нагружении, что существенно улучшает метрологические характеристики ТП: вариа- ция снижается в 4-7 раз, ГПН при отрицательных температурах уменьшается в 10-15 раз.

- Разработан и внедрён в серийное производство в ПГ МИДА техпро- цесс пайки припоем СТЕМЕТ 1202, что привело к значительному улучшению характеристик выпускаемых приборов и, в частности, дало возможность освоить производство серии эталонных датчиков давления с точностью лучше 0,05% (до 0,01%). Такие датчики от- крывают путь к построению высокоточных систем управления для ответственных технологических процессов.
  - Показано, что использование аморфных припоев позволяет соеди- нять сапфир не только с титановыми сплавами, но и с другими материалами. Это открывает возможности дальнейшего улучшения характеристик ТП давления на основе КНС и может стать предметом дальнейших исследований в этом направлении.
4. Теоретически обоснован и практически осуществлён техпроцесс тер- момеханической стабилизации тензопреобразователей, с помощью ко- торого удалось расширить температурный диапазон работы высокоточных ТП давления до 350 °С.
  5. Экспериментально показано, что структурное состояние металла упругой мембранны играет важную роль при изготовлении высокоточных ТП давления на основе КНС. Оптимальной микроструктурой для тита- новых упругих элементов ТП давления является мелкозернистая структура 1-3 балла глобуллярного типа.
  6. Все результаты диссертации внедрены в серийное производство ТП и датчиков давления Промышленной группы МИДА

В целом диссертация представляет законченное исследование, яв- ляющееся решением важной научно-технической задачи совершенствования приборов измерения давления. Хотя исследования проводились на ТП давления на основе КНС, полученные результаты могут быть исполь- зованы при разработке датчиков давления других типов. Результаты ра- боты в полной мере опубликованы, апробированы и внедрены в ООО МИДАУС Промышленной группы МИДА.

Следует отметить, что в процессе работы над диссертацией Е.Г. Савченко проявил себя не только как активный и вдумчивый исследова- тель, но и как человек, заинтересованный во внедрении результатов своей работы в производство. При его активном участии в ООО МИДАУС создана испытательная лаборатория, позволяющая настраивать и иссле- довать ТП и датчики давления с основной погрешностью не хуже 0,05%, а также отложен контроль структуры и состава материалов для упругих элементов ТП. Очень важно, что диссертант стремится быть в курсе всех публикаций по интересующим его вопросам.

Считаю, что диссертационная работа Е.Г. Савченко является за- конченным научным исследованием, в котором решается актуальная за- дача улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик тен- зорезисторных преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире». По объёму и научному уровню полученных результатов, а также по оформлению диссертационная работа удовлетворяет требованиям

ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Савченко Евгений Геннадьевич, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления". Отзыв подписан генеральным директором ЗАО МНС Промышленной Группы МИДА, доктором технических наук, профессором, действительным членом Российской метрологической академии Стучебниковым В.М.

Председатель

**Ученому секретарю Совета** предоставляется слово для оглашения заключения организации, где выполнялась работа и отзыва ведущей организации.

**Ученый секретарь** оглашает заключение организации, где выполнялась работа. Затем зачитывает отзыв ведущей организации.

(Заключение и отзыв прилагаются).

Председатель

На автореферат диссертации поступило 8 отзывов, все они положительные. Согласны ли члены Совета заслушать обзор отзывов или зачитать их полный текст?

Слово для обзора отзывов, поступивших на диссертацию, предоставляется **Ученому секретарю Совета**.

Ученый секретарь зачитывает обзор отзывов.

(Отзывы прилагаются).

**1. АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения».**

Отзыв подписан начальником НИО-22, к.т.н., Козловым А.И.

Замечания: 1) В автореферате отсутствуют сведения о метрологических и эксплуатационных характеристиках современных датчиков давления иностранного производства; 2) В списке публикаций автора отсутствуют сведения о защите разработанных соискателем технических решений объектами интеллектуальной собственности: патентами на изобретения, полезными моделями и т.д.

**2. Чистопольский филиал «Восток» Казанского Национального исследовательского технического Университета им. А.Н. Туполева.**

Отзыв подписан заведующим кафедрой приборостроения, к.т.н., доцентом Прохоровым С.Г.

Замечания: 1) В автореферате отсутствуют сведения о том в каких конкретно системах управления используются исследуемые датчики; 2) Часть рисунков имеет очень мелкий шрифт.

**3. Научно-производственный комплекс "Технологический центр".**

Отзыв подписан директором, д.ф.-м.н., профессором Светухиным В.В. и к.т.н., начальником НИЛ ПП Кицюком Е.П.

Замечания: 1) Указанная оптимальной микроструктура мембранны - мелкозернистая 1-3 балла глобуллярного типа - в основном тексте автореферата не упоминается; 2) Аббревиатура ПЧЭ в тексте автореферата не расшифрована; 3) Из текста автореферата и рисунка 3 непонятно, в чем преимущество сплава ВТ-6 над ВТ-16.

**4. ООО «Ферри Ватт».**

Отзыв подписан главным конструктором, к.т.н., профессором Саликеевым С.И.

Замечания: 1) Автореферат был бы более информативен, если бы хотя бы на отдельные работы (наиболее значимые), перечисленные на стр. 4 и 11 были даны ссылки; 2) Из рис. 3 неясно почему сплав ВТ-16 не является оптимальным; 3) В автореферате отсутствуют сведения об оценке суммарной погрешности измерений.

#### **5. АО «Промсервис».**

Отзыв подписан ведущим специалистом перспективного планирования, к.т.н., Колесниковым А.Н.

Замечания: 1) В качестве характеристики механических свойств мягкой зоны соединительного слоя припоя ПСр72 автор применяет понятие «предел пластичности», которое в металловедении не используется. Как вариант – предел упругости; 2) В отношении поведения под напряжением сплавов титана при околоскомнатных температурах справедливо все же оперировать не понятием «ползучесть», а «микропластическая деформация»; 3) Согласно шкале величин зерен, принятой в материаловедении, самыми крупными являются зерна 0 и 1 баллов. Так что называть, как делает автор, структуру титанового сплава с зернами 1-3 баллов мелкозернистой-сомнительно; 4) На рис.3 автореферата на самом деле показана «Диаграмма «напряжение-деформация» при растяжении»; 5) На рис.20 – путаница (дублирование) с описанием Рис.17; 6) Утверждение «Показано, что механические свойства сплава ВТ6 можно повышать с помощью различных термообработок» – очевидно; 7) Экспериментальные данные свидетельствуют о лучших характеристиках ПД, полученных пайкой припоеем СТЕМЕТ 1202, чем СТЕМЕТ 1410. Однако в выводах эти припои присутствуют на равных. Целесообразно также было бы уточнить, использован припой в виде ленты или порошка? 8) Использование припоя СТЕМЕТ требует подогрева до 800-850 °С. Как это отражается на кремнии? Сапфире? 9) Использование технологии SLM при изготовлении мембранны сложно обосновать экономически.

#### **6. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева».**

Отзыв подписан руководителем лаборатории госэталонов и научных исследований в области измерений низкого абсолютного давления и вакуума, к.т.н. Чернышенко А.А.

Замечания: 1) В списке публикаций автора отсутствуют единоличные публикации автора; 2) В автореферате отсутствует информация о сравнении метрологических характеристик полученных улучшенных датчиков с датчиками иностранного производства.

#### **7. ОАО «Манотомъ».**

Отзыв подписан главным экспертом по инновационному развитию, к.т.н., доцентом Свинолуповым Ю.Г.

Замечаний нет.

#### **8. Национальный исследовательский Томский политехнический университет.**

Отзыв подписан заведующим кафедрой – руководителем отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры Инженерной школы ядерных технологий, доктором технических наук, доцентом Горюновым А.Г. и ведущим научным сотрудником научно-образовательной лаборатории электроники и автоматики физических установок, к.т.н. Надеждиным И.С.

Замечания: 1) В автореферате не уделено внимания к параметрам временной стабильности характеристик тензопреобразователей с предложенной новой технологией их изготовления.

Председатель

Слово для ответа на замечания по заключению и отзывам предоставляется соискателю. Просьба отвечать только на те замечания, которые Вы считаете принципиальными, не нужно комментировать те замечания, с которыми Вы согласны. Пожалуйста.

Соискатель

Спасибо. Хочу отметить, что с большинством замечаний я согласен, но в то же время хотел бы пояснить пару моментов. Первое, что касается отсутствия в списке литературы иностранных публикаций. Хотел бы уточнить, что связано это с тем, что, вообще, использование структуры «кремний на сапфире» в датчикостроении, такие датчики присутствуют только на российском рынке. То есть это российское изобретение, в мире никто такие приборы не производит. Соответственно, исследование таких приборов за границей не производится. Также хотел бы отметить, что тенденция такова, что иностранные государства у нас, начиная с прошлого года, активно приобретают эти преобразователи давления.

И также из ключевых моментов хотел бы сказать, что большая часть замечаний связана все-таки с ограниченностью автореферата и в диссертации недостающие данные указаны. И что касается шкалы, балльной шкалы микроструктуры. То, о чем говорил специалист из Димитровграда, то есть существует балльная шкала микроструктур от первого до десятого. Самой мелкой считается там шкала десятого класса. Но это спрашивливо именно к стали. У титановых сплавов, у них отдельная есть микроструктурная шкала титановых сплавов. Там первый и третий баллы являются самыми мелковернистыми структурами.

В принципе, со всеми остальными отзывами и замечаниями я согласен.

Председатель

Хорошо. Спасибо. Коллеги, переходим к отзывам оппонентов.

Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту - **д.т.н. Михайлову Петру Григорьевичу**. Петр Григорьевич работает сегодня с нами дистанционно. Пожалуйста, Петр Григорьевич, Вам слово.

д.т.н., профессор Михайлов П.Г.

Здравствуйте, спасибо за внимание. Итак, я немножко добавлю, а потом уже сам отзыв зачитаю.

Дело в том, что я занимался этими датчиками большую часть жизни. И знаю что это такое и как сказал Савченко, на самом деле, за рубежом КНС не производят, есть отдельные попытки. Также они не производят, не разрабатывают и титановые сплавы. Это всё почему? Потому что или эти датчики являются датчиками единичного производства, не как, значит, полупроводниковые там, зарядил пластины и получил тысячи.

И по поводу композитной структуры, которая рассматривалась Евгением Геннадьевичем. Эта композитная структура, состоящая из сапфира, значит, мембранны, дальше припоя. И в конце концов действительно

структур на основе кремния. Кроме того, КНС применяется очень широко в интегральных схемах. Но, так как у кремния и сапфира сильно отличаются коэффициенты терморасширения, поэтому при формировании соответствующих кремниевых структур там образуется большие механические напряжения, которое не позволяет, так сказать, как мы говорили, что нужен целый ряд изделий (номиналов), не позволяет брать широкий диапазон давления. Поэтому стараются эти напряжения или сбалансировать, или уменьшить, но это так сильно не удается.

По поводу доклада Евгения Геннадьевича. Мне очень понравился его доклад. Это доклад специалиста, который начинал разработку чувствительных элементов, анализ, значит, технологии применял. И уже на выходе стабилизировал структуру датчика, то есть увеличил его точность.

Все ответы мне понравились. Они все по делу были, это специалист. Мне понравились вопросы членов комиссии. Детально, по теме и так далее.

Итак, разрешите мне зачитать отзыв, но не полностью, а ... Вы разрешаете мне, да?

Председатель

Да, да. Пожалуйста, Петр Григорьевич. То, что Вы считаете нужным.

д.т.н., профессор Михайлов П.Г.

Актуальность темы диссертации: развитие приборостроения неразрывно связано с постоянным совершенствованием измерительной аппаратуры. В области общепромышленных датчиков давления наибольшее распространение получили датчики на основе тензометрических преобразователей давления. Совершенствование их метрологических характеристик осуществляется за счет повышения чувствительности, снижения нелинейности, гистерезиса и снижения влияния дестабилизирующих факторов, основным из которых является температура. Поэтому тема диссертационной работы Савченко Е.Г., направленная на повышение метрологических характеристик тензопреобразователей давления для систем управления, является весьма актуальной.

Второе, научно-технический уровень и научная ценность диссертации. Научная ценность работы заключается в том, что автором был впервые экспериментально исследован соединительный слой сапфира с упругим элементов в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире», и показано его влияние на метрологические характеристики преобразователей. Хотя по этому поводу много было диссертаций, но здесь вот как раз, вы знаете, были построены модели математические и так далее.

После чего была произведена оптимизация характеристик тензопреобразователей путём соединения сапфира с упругой мембраной аморфным припоем на основе титана, а также подобран оптимальный режим пайки. При этом был исследован новый метод изготовления упругих элементов, путём селективного лазерного плавления. Это позволило обеспечить возможность разработки ТП с более высокими метрологическими характеристиками. Это первая такая попытка. Полученные автором экспериментальные данные по гистерезису первого силового нагружения, были связаны с теорией упругости и теоретически объяснены. Таким образом, использованные автором методы экспериментальных исследований и

теоретического анализа, оказались достаточными для разработки новых ТП для датчиковой аппаратуры.

Практическая ценность работы. Благодаря отсутствию гистерезиса при первом нагружении в области отрицательных температур в ТП с оптимизированным соединением, удалось разработать и наладить выпуск датчиков давления, работающих при криогенных температурах (до -200 °C), а также улучшить характеристики общепромышленных датчиков, работающих при отрицательных температурах. Оптимизация соединения лейкосапфира с упругой мембраной позволила в 4-7 раз снизить вариацию и гистерезис выходного сигнала ТП, особенно при отрицательных температурах. Получены ТП, работающие до температуры 350 °C с точностью 0,01-0,05%. Очень интересны результаты, полученные доктором наук при формировании упругих элементов методом селективного лазерного плавления (SLM 3D-печати) из порошка. Разработанный автором докторской диссертации процесс термомеханической стабилизации ТП позволил значительно повысить эксплуатационные и метрологические характеристики ТП. Полученные научные и практические результаты внедрены в серийное производство датчиковой аппаратуры ООО «МИДАУС»., что является очень важным.

Четвертое. Теперь замечания для доктора наук.

1. Необходимо ясно разъяснить, в чем различие докторской диссертационной работы от ранее защищенных по той же тематике докторских диссертаций, в частности:

-Козлов А.И. Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления Специальность: 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. УЛГТУ Ульяновск – 2014

-Скворцов П.А. Московский политехнический университет Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре "кремний на сапфире" 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры Москва, 2019

-Бушуев О.Н. Компьютерное моделирование преобразователей давления и численные методы оценки их состояния 05.13.18 ЮУ ГУ Челябинск 2015

2. В содержании докторской диссертации не принято использовать сокращения, которые очевидны только для специалистов (КНС, ЧЭ, ГПН и проч.) и приводить химические формулы сплава.

3. В содержании есть словосочетания, которые используются в ограниченном лексиконе «факторы, ограничивающие их характеристики», «нелинейность, вариация, гистерезис, ГПН, температурный гистерезис, нестабильность ползучесть» «с целью улучшения метрологических характеристик преобразователей».

4. Неудовлетворительное качество рисунков и не рекомендуемые подрисуночные форматы надписей (курсив) (1.3, 2.1, 2.31)

5. В библиографии практически нет ссылок на современные зарубежные источники, кроме того, сам список источников недостаточный и очень много старой литературы (с 1962 по 1974).

Указанные замечания не снижают общей ценности докторской диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты докторской диссертации. Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором при подготовке доклада, представляемого к защите.

Говоря о работе в целом, в качестве ее достоинства следует отметить эффективное использование в ней современных методов исследования материалов, объяснение экспериментальных данных, используя основы материаловедения. В изложении материалов и выводов

прослеживается логическая связь. Автор работы показал умение ставить и решать задачи, анализировать полученные результаты и грамотно формулировать выводы.

Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, является законченной научно-исследовательской работой и может быть квалифицирована, как совокупность научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых, вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области приборостроения.

Диссертационная работа Савченко Евгения Геннадьевича на тему «Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире», предложенная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», является законченной научно-квалификационной работой, которая по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению выполненных исследований, технических и технологических разработок полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук: п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а сам автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по заявленной специальности.

Всё. Еще я хотел бы... Сожаление огромное, что Владимир Михайлович умер, никто не ожидал. Я его знал еще, когда он работал в Подлипках. И нам передавал тематику по графикам. Такой человек, который создал в России первое предприятие, которое является самым значительным в России и за рубежом.

Спасибо за внимание.

(Отзыв прилагается).

#### Председатель

Спасибо Вам, Петр Григорьевич. Спасибо Вам за память о нашем коллеге, профессоре Стучебникове.

Пожалуйста, Евгений Геннадьевич, Вы можете ответить на замечания оппонента.

#### Соискатель

Спасибо еще раз, Петр Григорьевич. Вдвойне приятно получить отзыв от специалиста большого в приборостроении. Что касается замечаний, то со всеми замечаниями я согласен, но хотел бы пояснить на счет первого пункта. Отличия всё-таки диссертационных работ Козлова, Скворцова и Бушуева принципиальны от моей. С этими диссертационными работами я хорошо знаком, в некоторых из них даже принимал относительно удаленное участие. Целью этих работ является такая же как и у моей: улучшение метрологических характеристик преобразователей давления.

Единственное, что моя работа посвящена, как я и говорил ранее, исследованиям именно влияния соединительного слоя. Козлов же занимался исследованием распределения деформаций по поверхности мембранны. Скворцов занимался модерированием. То есть фактически цель у

нас всех была одна, но мы занимались, так сказать, разными направлениями, позволяющими улучшить метрологические характеристики. Спасибо.

Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту - **д.т.н. Антонцу Ивану Васильевичу.**

д.т.н., профессор Антонец И.В.

Уважаемый председатель, уважаемый совет. Вашему вниманию представляется отзыва на диссертационную работу Савченко Евгения Геннадьевича «Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05.

Тоже в качестве небольшого эпиграфа, если так можно выразиться, я расскажу о том, что с Евгением Геннадьевичем я познакомился в октябре месяце этого года, когда я приехал на предприятие, там был еще Владимир Михайлович.

Меня приятно удивила солидность этого предприятия, мне экскурсию организовали потом, но сначала, естественно, я заслушал доклад Евгения Геннадьевича о его работе. Это направление мне тоже очень близко, тем более многие из вас знают об этом. Я хочу сказать в связи с этим вот что, найти в отложенном технологическом процессе, который присутствует на этом предприятии, найти слабое звено, обосновать, обосновать замену этого технологического процесса - это дорогостоящее. Вот что я хотел сказать.

И сегодняшний доклад Евгения Геннадьевича подтверждает его достаточно высокий уровень в том вопросе, котором он занимается.

Тема диссертационной работы автора соответствует одному из важных направлений области приборостроения – исследование, проектирование и производство перспективной датчиковой аппаратуры на основе достижений технологии кремниевой микроэлектроники. Ну...я немножко сокращу. Основными задачами, которые должны решаться при создании датчиков давления, являются: повышение точности измерения; повышение быстродействия; повышение термоустойчивости в расширенном диапазоне температур; снижение энергопотребления, массы, габаритов и стоимости; повышение стойкости к воздействию механических факторов; повышению стойкости к воздействию электромагнитных полей и радиационным излучениям. Одним из наиболее популярных типов таких тензопреобразователей являются тензопреобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС), которые обладают целым рядом достоинств. Диссертационная работа Е.Г. Савченко направлена на совершенствование метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» путём выбора наилучших материалов упругих элементов и их соединения с сапфиром. В работе решаются вопросы улучшения точности тензопреобразователей давления и расширения их температурного диапазона эксплуатации. Отсюда вытекает актуальность представленной диссертационной работы.

Полученные в диссертационной работе теоретические, практические результаты и выводы обоснованы с позиций метрологии исследования,

основаны на корректных исследованиях основных принципов построения элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, теории планирования эксперимента, теории системного анализа и теории прочностного анализа и ряде других.

Материалы диссертации соответствуют основным научно-техническим положениям проектирования датчиковой аппаратуры, что подтверждено 18-ю публикациями автора в различных научно-технических изданиях.

Научную новизну диссертационных исследований составляют:

1. Впервые детально исследован слой, соединяющий мембрану из титанового сплава с сапфировой подложкой чувствительного элемента мембранныго датчика давления, и установлено что при стандартной пайке припоеем ПСр72 в соединительном слое четко выделяются три области различной толщины с резко различающимся составом и механическими свойствами

2. Экспериментально доказано, что оптимальной микроструктурой титанового сплава для упругой мембраны тензопреобразователей давления на основе структур КНС, обеспечивающей минимальные остаточные напряжения и статические погрешности датчиков является мелкозернистая структура 1-3 балла глобуллярного типа.

Наиболее значимыми и новыми результатами работы являются:

1. Показано, что недостатки соединения подложки с мембраной на известного припоя, обусловленные неоднородностью его состава по толщине, можно устранить, используя высокотемпературную вакуумную пайку аморфными припоями марки СТЕМЕТ на основе титана и циркония, при этом соединительный слой однороден по химическому составу и механическим свойствам, имеет микротвёрдость больше микротвёрдости титанового сплава, что препятствует возникновению в нём пластических деформаций и ползучести при механическом нагружении.

2. Теоретически обоснован и практически исследован техпроцесс термомеханической стабилизации тензопреобразователей с помощью которого удалось расширить температурный диапазон работы высокоточных тензопреобразователей давления до 350 °С.

Наиболее значимыми практическими результатами работы являются:

1. Благодаря уменьшению гистерезиса первого нагружения (параметр, который не поддается схемотехнической и программной коррекции) в 50-100 раз при отрицательных температурах в ТП с усовершенствованным соединением, удалось разработать и освоить выпуск датчиков давления, работающих при криогенных температурах (до -200 °С), а также существенно улучшить характеристики общепромышленных датчиков.

2. Изменённое соединение лейкосапфира с упругой мембраной позволило в 4-7 раз снизить вариацию и гистерезис выходного сигнала ТП, особенно при отрицательных температурах. Это привело к повышению точности датчиков на основе таких ТП.

3. Разработаны ТП и датчики давления на основе КНС, работающие до температуры 350 °С, для измерения давления расплавов полимеров и эталонные датчики давления с точностью 0,01-0,05%. Эти приборы освоены в серийном производстве на известном предприятии МИДА.

Материалы диссертации и автореферата изложены квалифицированно, логично. Следует отметить, как положительную сторону использования автором при оформлении диссертации современных графических редакторов. Замечания к диссертационной работе.

1. В работе отсутствует сравнительная оценка технических характеристик датчиков давления с улучшенных тензопреобразователей

давления на основе структур «кремний на сапфире» с датчиками давления иностранных производителей. Ну Евгений Геннадьевич уже отвечал на этот вопрос, наверное, действительно не стоит раскрывать ноу-хау. Может быть только на каком-нибудь рекламном уровне.

2. Имеются замечания по оформлению иллюстраций (стр. 102, 109). Слишком большое количество информации в одной иллюстрации, лучше было бы представить данные с помощью большего числа рисунков.

3. В работе отсутствуют данные о наличии либо отсутствии таких нерегламентированных погрешность тензопреобразователей давления как гистерезис первого нагружения и температурный гистерезис в датчиках давления, построенных на других чувствительных элементах (емкостные, вибрационно-частотные и др.).

4. Из работы неясно может ли быть разработанная автором методика термомеханической стабилизации применима к другим измерителям давления мембранныго типа.

5. Учитывая практическую направленность работы, патентоспособные результаты, имеющие новизну, целесообразно запатентовать.

**Заключение.** Отмеченные недостатки не снижают научной ценности диссертационной работы и общую положительную оценку оппонируемой диссертации. Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достоверны и отличаются новизной. Диссертация Савченко Е.Г. является законченной научно-исследовательской работой, а результаты научно-технических решений и экспериментальных исследований вносят значительный вклад в развитие проектирования и производство датчиковой аппаратуры – важного направления приборостроения.

По основным научным результатам диссертации опубликовано 18 печатных работ. Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации, а её содержание соответствует специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

На основании изложенного считаю, что диссертация Е.Г. Савченко «Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук: п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Савченко Е.Г. заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по заявленной специальности.

(Отзыв прилагается).

#### Председатель

Слово для ответа на замечания оппонента предоставляется соискателю.

#### Соискатель

Спасибо большое еще раз, Иван Васильевич. С основными замечаниями я согласен. Хотелось бы сказать... Немножко пояснить о сравнении данных датчиков с датчиками иностранного производства, для понимания вообще всей ситуации в целом. Хотел бы отметить, что на сегодняшнее время в Ульяновске на частном предприятии производятся датчики давления, особенно в области низких температур и криогенных температур,

которые конкурируют не с российскими производителями, а действительно не имеют мировых аналогов.

Все остальные температурные диапазоны, общепромышленные. То есть наши российские датчики составляют полноценную конкуренцию импортным датчикам. То есть по точности мы не уступаем. В области криогенных и высоких температур по этой части приборостроения, как ни странно, мы находимся не в догоняющих, а, наоборот, пытаются догнать нас. Спасибо.

Председатель

Спасибо.

д.т.н., профессор Антонец И.В.

Почему «как ни странно»? Так и должно быть.

Председатель

Нет, мир большой, и мы часть мира, наверное, в этом смысле исключительно, я считаю...

Кто хочет выступить?

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Меня беспокоил вот этот вопрос по поводу соответствия специальности, но вот после обсуждения, я все-таки думаю, что вполне можно представить эту диссертацию по этой специальности. Я имею в виду, надо наверно в будущем, тем кто представляет по этой специальности диссертации, иметь в виду, что это либо элемент вычислительной техники и надо сказать, насколько он улучшает характеристики, либо как элемент системы управления и рассмотреть системно, то есть насколько улучшается сама система управления. Но тем не менее датчики, которые представлены, они действительно хорошие, действительно характеристики явно выше чем характеристики известных датчиков, поэтому и будучи примененными в системах управления, эти системы управления, конечно повысят свои характеристики, ну и тем более пункт два действительно близок по характеру к тому что здесь было, поэтому я считаю, что учитывая еще и очень хорошую защиту, замечательные ответы на вопросы, чувствуется, что Евгений Геннадьевич у нас сложившийся специалист, понимает всё это прекрасно, разрабатывал, я буду голосовать «за».

Председатель

Спасибо, Константин Константинович. Коллеги, пожалуйста, кто хочет высказаться, по существу есть вопросы, пожалуйста Сергей Константинович.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

На самом деле эту работу мы слушали еще на НТС нашего факультета, и даже вот за то время, пока работа проходила вот это вот цикл, когда, соответственно, совет принимал к защите. Видно, что Евгений

Геннадьевич много работал над своей работой и в принципе сегодня мы видели такую очень хорошую уверенную защиту, когда, несмотря на то что вопросы на самом деле...

Видно было, что работа разноплановая, несмотря на то что она относится к приборостроению, к элементам устройства, многое из смежных областей, предложены оригинальные технические решения, которые позволили улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики данных элементов систем.

Евгений Геннадьевич, вполне уверенно отвечал на все вопросы исследуемых областей. По своей диссертации показал достаточные знания, я считаю, что он вполне достоин присуждения той степени, на которую претендует, я буду поддерживать, голосовать «за».

#### Председатель

Хорошо, спасибо, Сергей Константинович. Пожалуйста.

д.т.н., профессор Сергеев В.А.

Собственно, мое мнение было отражено в заключении ведущей организации, тем не менее, несколько моментов хотелось бы отметить.

Во-первых, мы видим пример очень качественной и хорошо построенной и обоснованной работы экспериментального плана, но вот было в замечаниях ведущей организации: хорошо, чтобы бы были какие-то модели: аналитические, численные ли, компьютерные, имитационные, которые позволяют все-таки устанавливать некие закономерности, зависимости контролируемых параметров или тех, которые... Важных параметров этих датчиков, преобразователей даже точнее, значит с характеристиками вот этого контактного соединения, материала контактного соединения. Ну, это как рекомендация.

Хотел бы подчеркнуть, что, вообще говоря, вот мне понравилось, что гипотеза, собственно проблема понятна. Есть несколько показателей. Точных, которые непредсказуемы, по существу, да. Вот этот гистерезис первого нагружения и так далее, что он оказывается меняется в зависимости от предыстории датчика и запрограммировать это, как выяснилось, хотя мы задавали этот вопрос на НТСе в своем время и на обсуждении, почему нельзя скорректировать, нельзя, потому что много комбинаций в которых оказываются эти датчики. И этот гистерезис ведет себя непредсказуемым образом.

Исходная гипотеза появилась, когда он просто увидел структуру вот этого паяного соединения ПСр72 и здесь вопрос: что 100 лет вроде бы известный припой, но в составе вот этой вот титановой мембранны и сапфира, вот этого слоя, когда они... Я уверен, что он сделал это впервые и увидел, что этот слой неоднородный и здесь оказалась зарыта самая такая причина, что нужно пытаться создать однородные паяные слои, до этого надо было догадаться и это было сделано соискателем.

И правильно претендует, говорит, что впервые, потому что опубликованы, во-первых, результаты. Во-вторых, нет в литературе данных о структуре вот этого паяного слоя. Здесь есть для нас, например, очень интересно и полезно, потому что мы тоже занимаемся отчасти такими подобными приборами и паяные слои оказывают очень существенное влияние на характеристики необязательно преобразователя, других соединений тоже.

Второй важный момент, это то, что он набрал все-таки вот эту вот статистику и просто продемонстрировал, что характеристики явно улучшаются с теми припоями, которые он применил.

Я призываю членов Совета, сам буду голосовать, естественно «за», мне кажется, что это сложившийся уже исследователь и вполне самостоятельно решающий серьезные задачи. Буду голосовать «за» и всех призываю присоединиться ко мне, спасибо.

Председатель

Спасибо, Вячеслав Андреевич. Пожалуйста, коллеги, есть ли еще желающие выступить?

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Будут, будут. Пару слов.

Председатель

Да-да, конечно.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Представленная тема, диссертационная тема не вызывает сомнения в актуальности. Очень ценная, потому что без датчиков невозможно измерять все величины, которые производятся. Вот здесь например трубопроводы, которые из Уфы до Нижнего Новгорода тянутся для подачи нефти, газов и так далее. Если датчик имеет погрешность, то эти кубометры очень большие, будут. Следует отметить, что даже публикации в SCOPUSE. В работе есть научная новизна, есть фактическая значимость этой работы и безусловно достоин присуждения ученой степени кандидата наук.

Председатель

Хорошо, спасибо.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Да, хотелось еще, отметить. Я в свое время, когда защищался в Казанском технологическом университете, и как обычно я докладывался, и там отметили: структура диссертации, введение, актуальность, первая глава, обзорная часть, вторая глава, теоретическая часть. На основе поставленных задач составляется теория. На основе теории, теоретической части составляется методика – это третья глава. Это как, где и что. И последняя, это четвертая глава – это результаты исследования. Здесь три главы: результаты, методика, вместе смешаны. Надо выделять, чтобы четко было понятно и так далее. Вот это я запомнил раз и навсегда.

Председатель

Коллеги, есть ли еще желающие выступить, или подводим черту под дискуссией? (нет)

**Соискателю предоставляется заключительное слово.**

Соискатель

Хотел бы сказать спасибо диссертационному совету, выразить благодарность оппонентам. Конечно, самый большой и значимый вклад в мою работу внёс Стучебников В.М., хотел бы ещё раз его вспомнить. Всем спасибо.

Председатель

Переходим к голосованию. Какие будут предложения по составу счетной комиссии? Поступили предложения включить в состав счетной комиссии Гладких А.А., Негоду В.Н., Самохвалова М.К.

Прошу голосовать. Возражений нет.

Председатель

Прошу счетную комиссию приступить к работе.

(Счетная комиссия организует тайное голосование.)

Председатель

Коллеги! Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии Самохвалову М.К..

Оглашается протокол счетной комиссии.  
(Протокол счетной комиссии прилагается).

Кто против? (Нет).

Кто воздержался? (Нет).

Протокол счетной комиссии утверждается.

Таким образом, на основании результатов тайного голосования (за - 16 , против - 0 , недействительных бюллетеней - 0) диссертационный совет Д212.277.04 при Ульяновском государственном техническом университете признает, что диссертация **Савченко Е.Г.** содержит новые решения по улучшению метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире», соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (**п.9 "Положения" ВАК**), и присуждает **Савченко Евгению Геннадьевичу** ученую степень кандидата технических наук по специальностям **05.13.05.**

Председатель

У членов Совета имеется проект заключения по диссертации **Савченко Е.Г.**. Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? (Нет). Принимается.

Какие будут замечания, дополнения к проекту заключения?  
**(Обсуждение проекта)**.

Председатель

Есть предложение принять заключение в целом с учетом редакционных замечаний. Нет возражений? Принимается единогласно.

***Заключение объявляется соискателю.***

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА № 212.277.04, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕ-  
СКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» ПО ДИССЕРТАЦИИ

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 29.12.2021 № \_\_\_\_\_

О присуждении Савченко Евгению Геннадьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата ТЕХНИЧЕСКИХ наук.

Диссертация «Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире»

по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» принята к защите 27.10.2021 (протокол заседания №7) диссертационным советом № 212.277.04, созданным на базе ФГБОУ ВО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (432027, г. УЛЬЯНОВСК, ул. СЕВЕРНЫЙ ВЕНЕЦ, 32) № 678/НК от 18.11.2020.

**Соискатель** Савченко Евгений Геннадьевич 29 июля 1989 года рождения. В 2016 году соискатель окончил очную аспирантуру в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», работает и.о. начальника научно-исследовательской лаборатории в ООО «Мидаус» (Микроэлектронные Датчики и Устройства).

Диссертация выполнена на кафедре Физического материаловедения Инженерно-физического факультета высоких технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

**Научный руководитель** – Стучебников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской метрологической академии, директор ЗАО МНС Промышленной Группы МИДА (Микроэлектронные Датчики).

Официальные оппоненты:

1. **Михайлов Пётр Григорьевич**, доктор технических наук, спец. 05.11.14 «Технология приборостроения», профессор, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»;
2. **Антонец Иван Васильевич**, доктор технических наук, спец. 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», доцент, профессор кафедры авиационной техники ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук в своем положительном отзыве, подписанном **Сергеевым Вячеславом Андреевичем**, доктором технических наук, профессором, директором УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН указала, что диссертационная работа Е.Г. Савченко является завершенной научно-квалификационной работой, по объему и научному уровню полученных результатов отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 28.08.2017 №1024) и содержит новое решение важной научно-технической задачи улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» для применения в системах автоматизированного управления различных технологических процессов, а её автор Савченко Евгений Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 18 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 9 работ, 2 статьи индексированы в Scopus.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Основные результаты представлены в следующих наиболее значимых работах:

- 1) Савченко, Е.Г. Влияние структурного состояния титановой мембранны на характеристики преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» / Е.Г. Савченко, В.М. Стучебников // Приборы. - 2020 - № 3. - С.11-16.
- 2) Савченко, Е.Г. Гистерезис первого нагружения в преобразователях давления на основе структур КНС / Е.Г. Савченко, В.М. Стучебников // Датчики и системы. - 2017. - №7. - С. 23-29.
- 3) Савченко, Е.Г. Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире» / Е.Г. Савченко, В.М. Стучебников // Сварочное производство. - 2013 - №1. - С. 23-25.

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов, все отзывы положительные.

1. АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (г. Ульяновск). Отзыв подписан начальником НИО-22, к.т.н., **Козловым А.И.** **Замечания:** автореферате отсутствуют сведения о метрологических и эксплуатационных характеристиках современных датчиков давления иностранного производства. В списке публикаций автора отсутствуют сведения о защите разработанных соискателем технических решений объектами интеллектуальной собственности: патентами на изобретения, полезными моделями и т.д.
2. Чистопольский филиал «Восток» Казанского Национального исследовательского технического Университета им. А.Н. Туполева (г. Чистополь). Отзыв подписан заведующим кафедрой приборостроения, к.т.н., доцентом Прохоровым С.Г. **Замечания:** в автореферате отсутствуют сведения о том в каких конкретно системах управления используются исследуемые датчики. Часть рисунков имеет очень мелкий шрифт.
3. Научно-производственный комплекс "Технологический центр" (г.

- Зеленоград).** Отзыв подписан директором, д.ф.-м.н., профессором **Светухиным В.В.** и к.т.н., начальником НИЛ ПП **Кицюком Е.П.** **Замечания:** указанная оптимальной микроструктура мембранны - мелкозернистая 1-3 балла глобулярного типа - в основном тексте автореферата не упоминается. Аббревиатура ПЧЭ в тексте автореферата не расшифрована. Из текста автореферата и рисунка 3 непонятно, в чем преимущество сплава ВТ-6 над ВТ-16.
- 4. ООО «Ферри Ватт» (г. Казань).** Отзыв подписан главным конструктором, к.т.н., профессором **Саликеевым С.И.** **Замечания:** автореферат был бы более информативен, если бы хотя бы на отдельные работы (наиболее значимые), перечисленные на стр. 4 и 11 были даны ссылки. Из рис. 3 неясно почему сплав ВТ-16 не является оптимальным. В автореферате отсутствуют сведения об оценке суммарной погрешности измерений.
- 5. АО «Промсервис» (г. Димитровград).** Отзыв подписан ведущим специалистом перспективного планирования, к.т.н., **Колесниковым А.Н.** **Замечания:** в качестве характеристики механических свойств мягкой зоны соединительного слоя припоя ПСр72 автор применяет понятие «предел пластичности», которое в металловедении не используется. Как вариант – предел упругости. В отношении поведения под напряжением сплавов титана при околосошовных температурах справедливо все же оперировать не понятием «ползучесть», а «микропластическая деформация». Согласно шкале величин зерен, принятой в материаловедении, самыми крупными являются зерна 0 и 1 баллов. Так что называть, как делает автор, структуру титанового сплава с зернами 1-3 баллов мелкозернистой-сомнительно. На рис.3 автореферата на самом деле показана «Диаграмма «напряжение-деформация» при растяжении». На рис.20 – путаница (дублирование) с описанием Рис.17. Утверждение «Показано, что механические свойства сплава ВТ6 можно повышать с помощью различных термообработок» – очевидно. Экспериментальные данные свидетельствуют о лучших характеристиках ПД, полученных пайкой припоеем СТЕМЕТ 1202, чем СТЕМЕТ 1410. Однако в выводах эти припой присутствуют на равных. Целесообразно также было бы уточнить, использован припой в виде ленты или порошка? Использование припоя СТЕМЕТ требует подогрева до 800–850 °С. Как это отражается на кремнии? Сапфире? Использование технологии SLM при изготовлении мембранны сложно обосновать экономически.
- 6. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург).** Отзыв подписан руководителем лаборатории госстандартов и научных исследований в области измерений низкого абсолютного давления и вакуума, к.т.н. **Чернышенко А.А.** **Замечания:** в списке публикаций автора отсутствуют единоличные публикации автора. В автореферате отсутствует информация о сравнении метрологических характеристик полученных улучшенных датчиков с датчиками иностранного производства.
- 7. ОАО «Манотомъ» (г. Томск).** Отзыв подписан главным экспертом по инновационному развитию, к.т.н., доцентом **Свинолуповым Ю.Г.** **Замечаний нет.**
- 8. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск).** Отзыв подписан заведующим кафедрой – руководителем отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры Инженерной школы

ядерных технологий, доктором технических наук, доцентом **Горюновым А.Г.** и ведущим научным сотрудником научно-образовательной лаборатории электроники и автоматики физических установок, к.т.н. **Надеждиным И.С.** **Замечания:** в автореферате неделено внимания к параметрам временной стабильности характеристик тензопреобразователей с предложенной новой технологией их изготовления.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой компетентностью в области разработки элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, наличием публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях по теме диссертационной работы, что позволило им определить научную и практическую ценность диссертации. Официальные оппоненты не имеют совместных проектов и совместных публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработаны** мембранные тензопреобразователи давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками, у которых вариация уменьшена в 4–7 раз, гистерезис первого нагружения при отрицательной температуре снижен в 100 раз, расширен температурный диапазон работы до 350 °C при сохранении точности.

**Предложены** новые подходы к проектированию датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире», позволяющие учесть влияние металлических составляющих преобразователей (упругая металлическая мембрана и соединительный слой мембрана-сапфир) на их метрологические и эксплуатационные характеристики.

**Доказана** взаимосвязь метрологических характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» с механическими свойствами соединительного слоя лейкосапфира и титановой мембраны.

**Введено** понятие «гистерезис первого нагружения» – нерегламентированная погрешность преобразователей давления, не поддающаяся схемотехнической коррекции и отрицательно влияющая на точность прецизионных датчиков давления.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**Доказана** и описана взаимосвязь механических свойств металлических элементов преобразователя давления с его метрологическими характеристиками, что даёт возможность корректировки существующих математических моделей преобразователей давления.

**Применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы металлографического и рентгеноспектрального анализа, статистической обработки результатов измерений, а также методы расчёта метрологических характеристик измерительных приборов;

**изложены** экспериментальные и теоретические способы выбора металлических составляющих преобразователей давления, влияющих на их метрологические и эксплуатационные характеристики;

**раскрыто** отрицательное влияние на метрологические и эксплуатационные характеристики преобразователей и систем управления на их основе – использование стандартного паяного соединения титанового сплава с сапфиром (припой ПСр72) неоднородного по химическому составу и механическим свойствам. Показано, что недостатки соединения подложки с мембраной на основе припоя ПСр72, обусловленные неоднородностью его состава по

толщине, можно устраниТЬ, используя высокотемпературную вакуумную пайку аморфными припоями марки СТЕМЕТ на основе титана и циркония; **изучено** влияние металлических составляющих тензопреобразователей давления (упругая металлическая мембрана и соединительный слой мембраны-сапфир) на метрологические и эксплуатационные характеристики ТП на основе КНС;

**проведена** модернизация серийно выпускаемых тензопреобразователей и датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире».

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** в серийное производство датчики давления с новыми тензопреобразователями, обладающими улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками, предназначенные для высокоточных систем управления и контроля;

**разработаны** преобразователи и датчики давления на основе КНС, работающие до температуры 350 °С, для измерения давления расплавов полимеров и эталонные датчики давления с точностью 0,01–0,05%. Эти приборы освоены в серийном производстве ПГ МИДА;

**разработан** и опробован процесс термомеханической стабилизации ТП. Процесс позволяет улучшить эксплуатационные и метрологические характеристики ТП.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: для экспериментальных работ результаты получены на современном сертифицированном и поверенном оборудовании;

достоверность разработанных научных положений и выводов подтверждена результатами опытных испытаний образцов ТП и датчиков давления производства Промышленной Группы МИДА, а также серийным производством приборов;

теория не противоречит известным физическим принципам и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

использованы современные методы металлографических и метрологических измерений и обработки их результатов, произведен аналитический обзор результатов и достижений в исследуемой области.

**Личный вклад** соискателя состоит в: выполнении теоретических и всех экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая экспериментальные методики исследований, подготовку шлифов для металлографического анализа, макетных образцов ТП и оснастки для испытаний, выбор необходимого оборудования и проведение измерений, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В работе отсутствуют аналитические и численные модели, связывающие параметры структуры и механические свойства материала слоя контактного соединения с метрологическими и эксплуатационными характеристиками ТП и датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» и объясняющие полученное улучшение указанных характеристик;
2. Отсутствует сравнение исследуемых преобразователей с зарубежными преобразователями и датчиками.

Соискатель Савченко Е.Г. согласился с критическими замечаниями,

ответил на вопросы и дал необходимые разъяснения по замечаниям в ходе защиты и в отзывах на диссертационную работу.

На заседании 29.09.2021 диссертационный совет принял решение: за новые научно-обоснованные технические решения в области разработки преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» присудить Савченко Е.Г. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

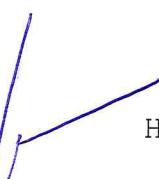
Защита окончена. Есть ли замечания по процедуре защиты? (Нет).

Поздравляет соискателя с успешной защитой. Благодарит членов совета и всех участников за внимание.

**Заседание объявляется закрытым.**

Председатель Совета Д212.277.04

д.т.н., профессор



Н.Г. Ярушкина

Ученый секретарь Совета Д212.277.04

д.т.н., доцент



А.М. Наместников

21.01.2022

