

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Ульяновского филиала
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова Российской
академии наук, д-р техн. наук, профессор



В.А. Сергеев
В.А. Сергеев
«03» 12 2021 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу Савченко Евгения Геннадьевича «Улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире»», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Актуальность темы

Датчики давления широко используются в современных системах управления технологическими процессами, и требования к их метрологическим характеристикам постоянно повышаются.

Диссертационная работа Савченко Е.Г. посвящена улучшению метрологических характеристик тензорезисторных преобразователей (ТП) и датчиков давления мембранного типа на их основе, которые в настоящее время являются одним из наиболее распространённых типов датчиков давления. Предметом исследований явились ТП и датчики давления, чувствительные элементы которых изготовлены на структуре «кремний на сапфире» (КНС) и которые в течение более полувека зарекомендовали себя надёжными и точными средствами измерения давления.

В связи с повышающимися требованиями и расширением областей применения ТП и датчиков давления на основе структур КНС на совершенствование их характеристик направлены значительные усилия исследователей. К настоящему времени проведены исследования по распределению деформаций в ТП мембранного типа и выбору оптимального расположения тензорезисторов на поверхности мембран, по температурной компенсации датчиков давления на структурах КНС, цифровой коррекции погрешностей и т. д. Вместе с тем, практически не было исследовано совместное влияние металлических конструктивных элементов ТП (упругие мембраны, соединительный слой сапфира с мембраной) на метрологические и эксплуатационные характеристики ТП и датчиков давления. В связи с этим, тема диссертационной работы Савченко Е.Г., направленной на исследование влияния материалов упругих конструктивных элементов ТП и контактного соединения с

сапфиром на метрологические характеристики ТП и датчиков давления на основе структур КНС, является актуальной.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложения с актом внедрения результатов диссертационной работы. Основной текст диссертации состоит из 147 машинописных страниц, 93 рисунков и 3 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и задачи научного исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена рассмотрению общих особенностей структур КНС и ТП давления на их основе. Рассмотрены особенности расчёта метрологических характеристик указанных ТП давления, определены составляющие их погрешности, не поддающиеся схемотехнической и программной коррекции, но существенно зависящие от выбора материалов металлических частей преобразователя давления.

Во второй главе представлены экспериментальные результаты исследования особенностей материалов и технологии изготовления упругих элементов ТП. Приведены результаты механических испытаний различных сплавов, применимых для изготовления упругих элементов ТП на основе структур КНС, и установлено существенное улучшение характеристик ТП давления на основе структур КНС при применении в качестве материала контактного соединения сплава ВТ9. Показано, что механические свойства сплава ВТ6 можно улучшать путём различных термообработок, и обоснована необходимость термомеханической стабилизации ТП.

Впервые было детально исследовано стандартное паяное соединение титанового сплава с сапфиром (припой ПСр72), широко используемое в настоящее время в датчиках и ТП на основе структур КНС, и выявлено, что соединительный слой является неоднородным по химическому составу и механическим свойствам, что является причиной нежелательных пластических деформаций, приводит к смещению выходного сигнала ТП давления и оказывает существенное влияние на точность и стабильность преобразования давления в электрический сигнал. Разработан и описан процесс пайки сапфира с титановым сплавом с помощью аморфного припоя на основе титана, показаны преимущества данного соединения.

В третьей главе рассмотрено влияние механических свойств и структуры материалов упругого элемента и слоя соединения на метрологические и эксплуатационные характеристики ТП на основе структур КНС. Показано, что использование жёсткого аморфного припоя на основе титана при пайке чувствительного элемента приводит к снижению вариации выходного сигнала ТП в 4–7 раз и существенно улучшает метрологические и эксплуатационные характеристики ТП датчиков давления на основе структур КНС. Представлен процесс термомеханической обработки, который позволил расширить температурный диапазон высокоточных

датчиков давления на основе структур КНС до 350 °С. Экспериментально доказано, что структура металла упругой мембраны имеет определяющее влияние на метрологические характеристики ТП и датчиков давления на основе структур КНС; показано, что оптимальной микроструктурой для упругих элементов таких датчиков является мелкозернистая структура 1-3 балла глобулярного типа.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Научной новизной обладают, на наш взгляд, следующие основные положения диссертационной работы:

1. Впервые экспериментально показано влияние структуры и механических свойств соединительного слоя и материала мембраны на метрологические характеристики ТП и датчиков давления на основе структур КНС;

2. Впервые экспериментально детально исследована структура и механические свойства соединительного слоя лейкосапфира с титановым сплавом ВТ6 в ТП давления на основе структур КНС, и предложены способы улучшения механических свойств этого сплава путём различных термообработок;

3. Разработан и экспериментально подтверждён режим термомеханической обработки, позволяющий значительно улучшить эксплуатационные характеристики исследуемых ТП давления, расширив диапазон рабочих температур преобразователей до 350 °С, обеспечив при этом высокие метрологические характеристики.

Практическая значимость и достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными результатами и их практическим применением. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях различных уровней.

Ценность для науки и практики результатов диссертационной работы

Научную ценность представляют: экспериментально полученные результаты металлографического исследования соединительного слоя сапфира и титанового сплава, а также характеристики сплавов при различных температурах, что позволило установить связь между характеристиками металлических составляющих ТП и его метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Это позволило произвести улучшение точностных характеристик ТП давления.

Практическое использование результатов диссертационной работы возможно при разработке математических моделей и проектировании ТП давления, при проведении прочностных расчётов. Результаты, полученные на ТП давления с чувствительными элементами на основе структур КНС, и предложенный в диссертации подход к решению задачи метрологических и эксплуатационных характеристик может быть полезен и при исследовании других типов ТП давления с упругими элементами чашечного и иного типа.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати; соответствие автореферата основным положениям диссертации

Диссертация написана ясным, технически грамотным языком. Оформление диссертации в целом соответствует предъявляемым требованиям. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 18 опубликованных работах, в том числе в 9 работах из перечня изданий, рекомендованных ВАК.

Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертационной работы. Тематика и результаты исследований соответствуют специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Рекомендации по использованию полученных в работе результатов

Разработанные технологические процессы и рекомендации могут быть использованы в работе ОАО «НИИФИ» (г. Пенза), ОАО «НИИТеплоприбор» (г. Москва), ООО «Мидаус» (г. Ульяновск), ЗАО «Научно-производственный комплекс «ВИП» (г. Екатеринбург), ООО «Микротензор» (г. Орёл), ООО НПП «Элемер» (г. Москва), в других организациях и НИИ, занимающихся разработкой и производством датчиков и преобразователей давления.

Оценка содержания диссертации, её завершенность в целом, замечания по диссертации

Диссертационная работа выполнена на достаточно высоком научном уровне, в ней получены значимые экспериментальные и практические результаты. Вместе с тем к работе имеется ряд замечаний:

1. В списке литературы очень мало работ (особенно зарубежных) по проблематике диссертации за последние пять лет;

2. Некорректно употреблены некоторые термины, в частности, «точность измерений» – величина, отражающая меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой физической величины и количественно определяемая значением обратным модулю относительной погрешности. Например, на стр.123 диссертации указана точность 0,2%, на стр.134 – точность 0,1%. Вероятно, речь идет не о точности, а о погрешности измерений;

3. 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 КНС и объясняющие полученное улучшение указанных характеристик;

4. В работе нет убедительного обоснования, что выбор титанового сплава ВТ6 в качестве материала паяного соединения структуры КНС с титановой мембраной, обеспечивающего улучшение метрологических характеристик ТП давления на основе структур КНС, является оптимальным;

5. Четвертое положение, выносимое на защиту, сформулировано неконкретно, в слишком общем виде;

6. В работе имеются грамматические ошибки и стилистические неточности. Так, цель работы сформулирована в двух местах: на стр. 7 и на стр. 37; небрежно оформлены некоторые рисунки и подрисуточные подписи, в частности, рис. 1.3, 3.15.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основных научных результатов, полученных в работе.

Заключение

В целом диссертационная работа Савченко Е.Г. является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная задача улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик тензорезисторных преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире». По объёму и научному уровню полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Савченко Евгений Геннадьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании секции учёного совета УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 24 ноября 2021 г. (протокол №12).

Отзыв подготовили:

Старший научный сотрудник,
канд. физ.-мат. наук

А.М. Ходаков

Старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

И.В. Фролов

Ученый секретарь, канд. техн. наук,
доцент

А.А. Черторийский

Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук (УФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

тел. (8422) 44-29-96, e-mail ufire@mv.ru,

web-сайт <https://ulireran.ru/>