

## Отзыв

Научного руководителя о диссертационной работе Савченко Е.Г.  
«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 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем  
управления».

Тема диссертации Е.Г. Савченко, несомненно, актуальна, поскольку давление – это важнейший контролируемый параметр в практически всех 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 – тензопреобразователи (ТП) давления на основе структур «кремний на сапфире» (КНС) также является оправданным по нескольким 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 мембраны. Во-вторых, ТП 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 ТП 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, расчётам 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 диссертантом, 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 мембраны 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 пластических деформаций и ползучести при механическом нагружении, что существенно улучшает метрологические характеристики ТП: вариация снижается в 4-7 раз, ГПН при отрицательных температурах уменьшается в 10-15 раз.
  - Разработан и внедрён в серийное производство в ПГ МИДА техпроцесс 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 открывают путь к построению высокоточных систем управления для ответственных технологических процессов.
  - Показано, что использование аморфных припоев позволяет соединять 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 термомеханической стабилизации тензопреобразователей, с помощью которого удалось расширить температурный диапазон работы высокоточных ТП давления до 350 °С.
5. Экспериментально показано, что структурное состояние металла упругой мембраны играет важную роль при изготовлении высокоточных ТП давления на основе КНС. Оптимальной микроструктурой для титановых упругих элементов ТП давления является мелкозернистая структура 1-3 балла глобулярного типа.
6. Все результаты диссертации внедрены в серийное производство ТП и датчиков давления Промышленной группы МИДА

В целом диссертация представляет законченное исследование, являющееся решением важной научно-технической задачи совершенствования приборов измерения давления. Хотя исследования проводились на ТП давления на основе КНС, полученные результаты могут быть использованы при разработке датчиков давления других типов. Результаты работы 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 исследователь, 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 исследовать ТП и датчики давления с основной погрешностью не хуже 0,05%, а также отлажен 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 законченным научным исследованием, в котором решается актуальная задача улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик тензорезисторных 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».

Генеральный директор ЗАО МНС  
Промышленной Группы МИДА  
доктор технических наук, профессор,  
действительный член Российской метрологической академии

  
Стучебников В.М.

Подпись Стучебникова В.М. заверяю:

*Специалист отдела кадров Фокина Е.В.*



*07.09.2021*