

Савченко Е.Г., Стучебников В.М., Устинов А.А.
Savchenko E.G., Stuchebnikov V.M., Ustinov A.A.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС

SOME FEATURES OF DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE PRESSURE TRANSDUCERS BASED ON SOS STRUCTURES

Аннотация. Рассмотрены метрологические характеристики тензопреобразователей давления на основе структур «Кремний-на-сапфире» (КНС), отличающихся материалами упругой мембраны и припоя, в области высоких температур, а также показаны особенности технологической стабилизации характеристик тензопреобразователей. Продемонстрированы возможности разработки преобразователей давления на основе структур КНС с точностью не хуже 0.2% при температурах до 350 °С.

Annotation.

Some metrological characteristics of high-temperature pressure transducers based on structures "Silicon-on-Sapphire" (SOS) with different materials of elastic membrane and soldering alloy are considered and the possibilities of technological stabilization transducers are demonstrated. It is shown that pressure transducers based on SOS structures can work with accuracy not worse than 0.2% up to 350 °С.

Ключевые слова: тензопреобразователь давления, структура «кремний на сапфире» (КНС), гистерезис первого нагружения, термомеханическая стабилизация.

Keywords: pressure transducer, structure "Silicon-on-Sapphire" (SOS), pressure hysteresis of the first loading, thermomechanical stabilization.

В последнее время в промышленности растёт потребность в точном измерении давления при высоких температурах (200-400 °С). Ещё в 1980-х годах в НИИТеплоприборе (г.Москва) были проведены исследования, которые показали перспективность для измерения давления высокотемпературных сред тензопреобразователей (ТП) давления на основе гетероэпитаксиальных структур «Кремний на сапфире» (КНС) [1,2], хотя серийное производство высокотемпературных датчиков давления на основе КНС было освоено только в конце 1990-х годов в Промышленной группе МИДА [3].

На современном этапе появилась потребность в высокотемпературных датчиках давления с высокой точностью во всём рабочем температурном диапазоне. Однако поведение ТП давления на основе КНС в значительной степени определяется тем, что измерительная мембрана представляет собой сложный объект, состоящий из слоёв сапфира, припоя и металла. Каждый из этих слоёв имеет свои специфические свойства (модуль Юнга, коэффициент теплового расширения (КТР), предел ползучести и т.д), которые влияют на метрологические характеристики ТП. Так, в частности, большая разница в коэффициентах теплового расширения сапфира и титановых сплавов, традиционно используемых в ТП [4], обуславливает сильную температурную зависимость начального выходного сигнала ТП. Температурные погрешности начального выходного сигнала и чувствительности ТП могут быть эффективно скомпенсированы в датчике цифровой обработкой сигнала [5]. Однако, недостаточно высокие упругие характеристики материалов могут вызывать определённую нестабильность выходных характеристик ТП, которую невозможно скомпенсировать электроникой.

Ранее было показано, что соединительный слой, образованный традиционным серебро-медным припоем ПСр72, при пайке сапфировой подложки к титановому сплаву

разделяется на несколько слоёв с различной твёрдостью и, соответственно, с разными механическими свойствами [6]. Были исследованы также характеристики ТП с разными типами титановых сплавов, которые оказались существенно различными [7]. Кроме того, было показано, что сапфир можно соединять с различными металлами и керамикой с помощью аморфного припоя типа СТЕМЕТ* [8], причём в этом случае соединительный слой остаётся однородным по толщине и имеет высокую твёрдость [6].

Предметом настоящего исследования явилось сравнение поведения в области высоких температур различных типов ТП давления на основе КНС, отличающихся материалами упругой мембраны и припоя, а также выяснение возможности технологической стабилизации характеристик ТП. Термомеханическая стабилизация проводилась длительной выдержкой ТП при температуре выше рабочей с одновременным нагружением ТП давлением. Из титановых сплавов использовались сплавы ВТ6, ВТ9 и ОТ4, хорошо зарекомендовавшие себя в климатической области температур [7]. Для определения влияния слоя припоя на метрологические характеристики ТП использовалась конструкция с керамическим упругим элементом [6], в которой и сапфир, и керамическая мембрана являются практически абсолютно упругими в исследованной области температур и имеют близкие коэффициенты теплового расширения. Наконец, был исследован ТП с металлической мембраной, изготовленной из прецизионного сплава 29НК, коэффициент теплового расширения которого близок к КТР сапфира и слабо зависит от температуры до 300 °С, что значительно уменьшает термические напряжения в ТП. Измерялись стандартные метрологические характеристики ТП: нелинейность, вариация, гистерезис (невозврат нулевого сигнала после сброса давления) и ещё одна важная характеристика – гистерезис первого нагружения [9]. Измерения проводились дважды – непосредственно после изготовления приборов и проведения стандартного термоциклирования, и после термомеханической стабилизации.

Типичные результаты испытаний представлены на последующих рисунках.

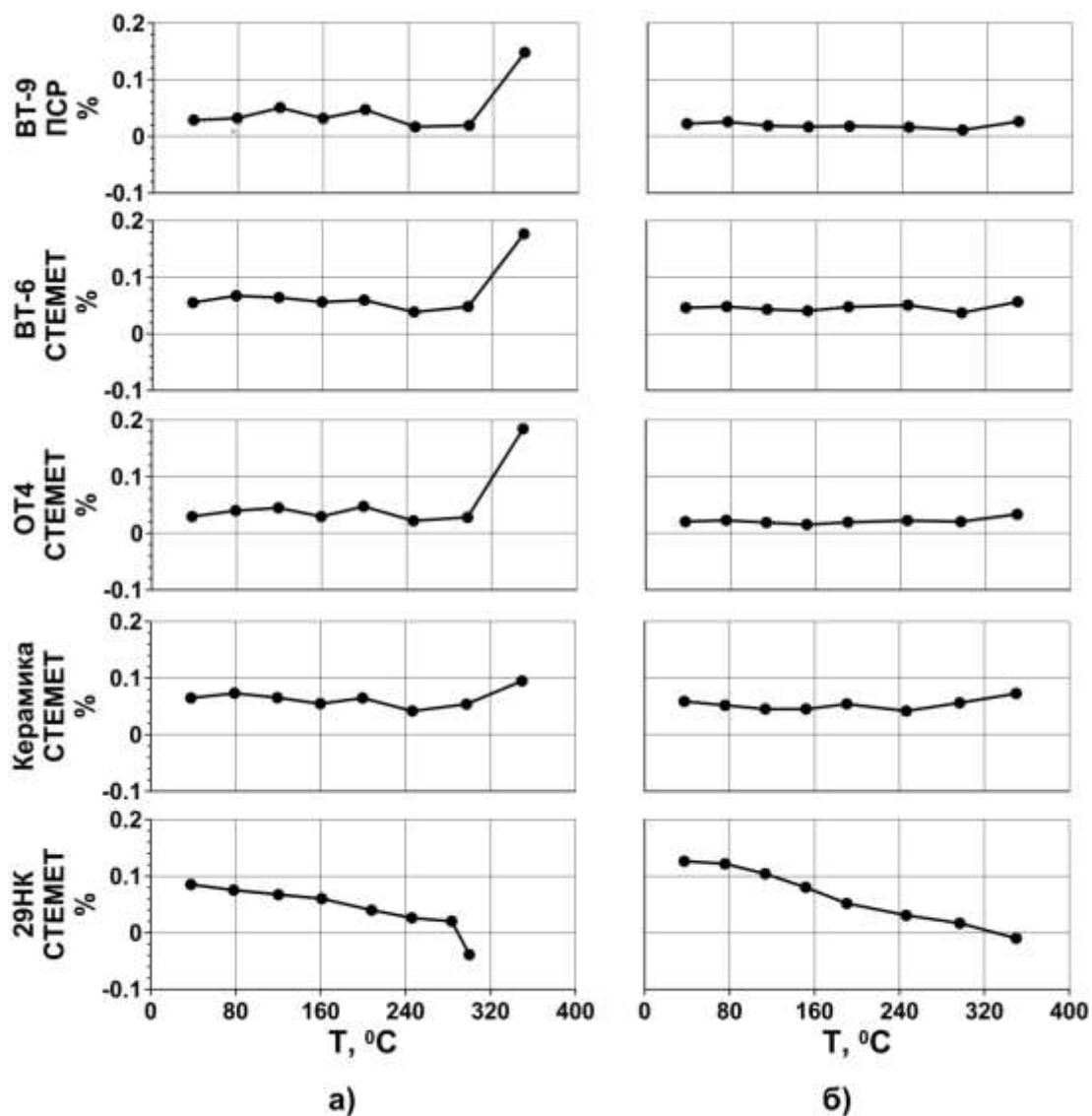


Рис.1. Температурная зависимость нелинейности ТП давления с различными материалами упругой мембраны и припоя до (а) и после (б) термомеханической стабилизации.

Как видно из рис.1, нелинейность ТП с металлическими мембранами без термомеханической стабилизации практически не меняется (или слабо падает в случае ковара) вплоть до температуры $\sim 280-300$ °С, после которой начинает резко изменяться, что связано с возникающей нестабильностью выходного сигнала. После стабилизации нелинейность остаётся постоянной вплоть до температуры 350 °С (а в случае ковара сохраняет слабо падающий характер). Как и следовало ожидать, нелинейность ТП с керамической мембраной практически не меняется во всём температурном интервале и на неё термомеханическая стабилизация влияния не оказывает. Это указывает на то, что резкое изменение нелинейности нестабилизированных ТП связано со свойствами металла, а не припоя.

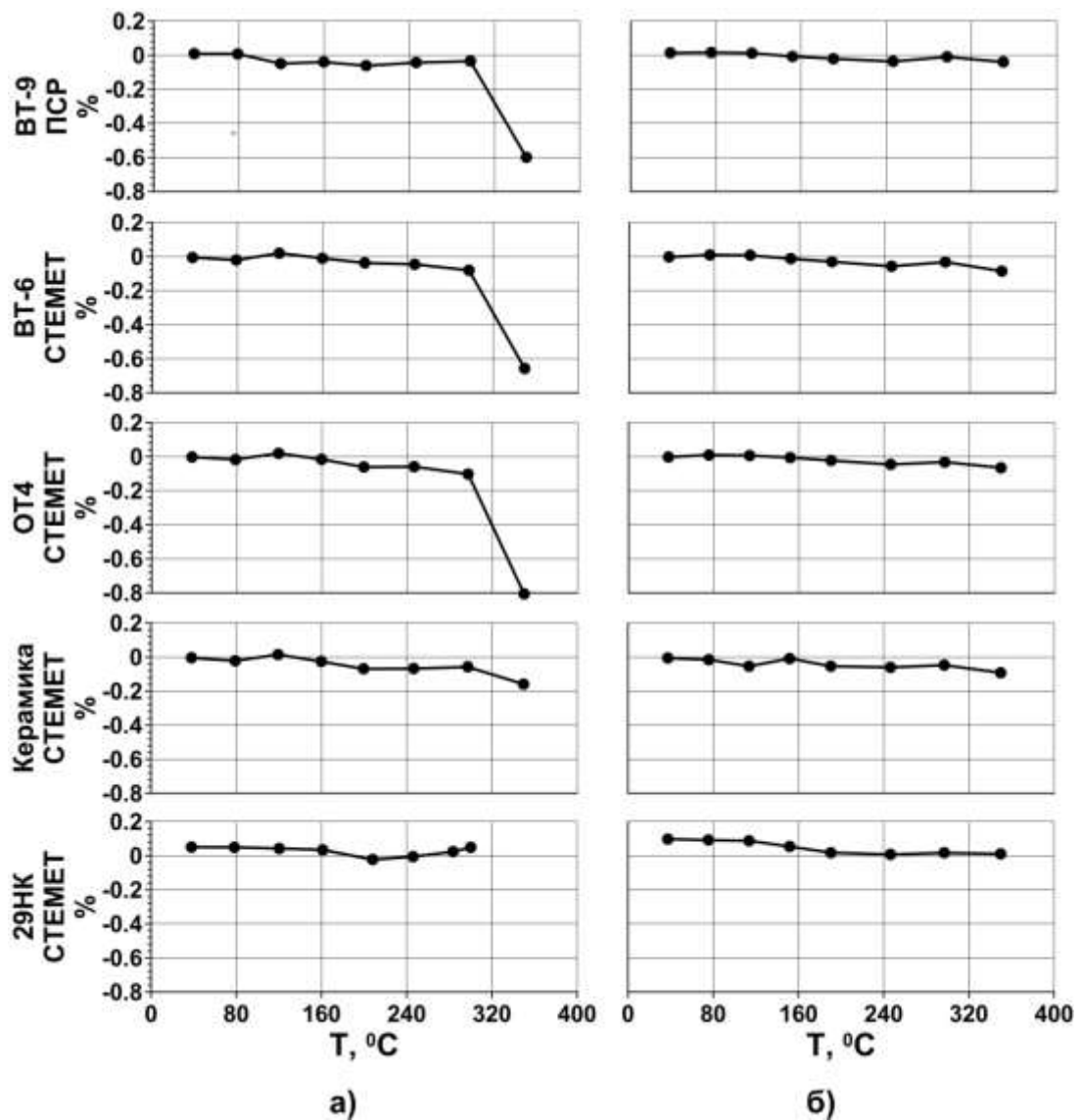


Рис.2 Температурная зависимость вариации выходного сигнала ТП с различными материалами мембраны и припоя до (а) и после (б) стабилизации.

Аналогичным образом ведёт себя и вариация выходного сигнала ТП. Без термомеханической стабилизации вариация ТП с металлическими мембранами сохраняется малой (до 0,1%) вплоть до температур ~280-300 °С. После стабилизации вариация в высокотемпературной области уменьшается; следует отметить, что для всех исследованных сочетаний материалов вариация при температуре выше 150 °С становится отрицательной (обратная ветка нагрузочной характеристики проходит ниже прямой ветки). В увеличенном масштабе это показано на рис.3.

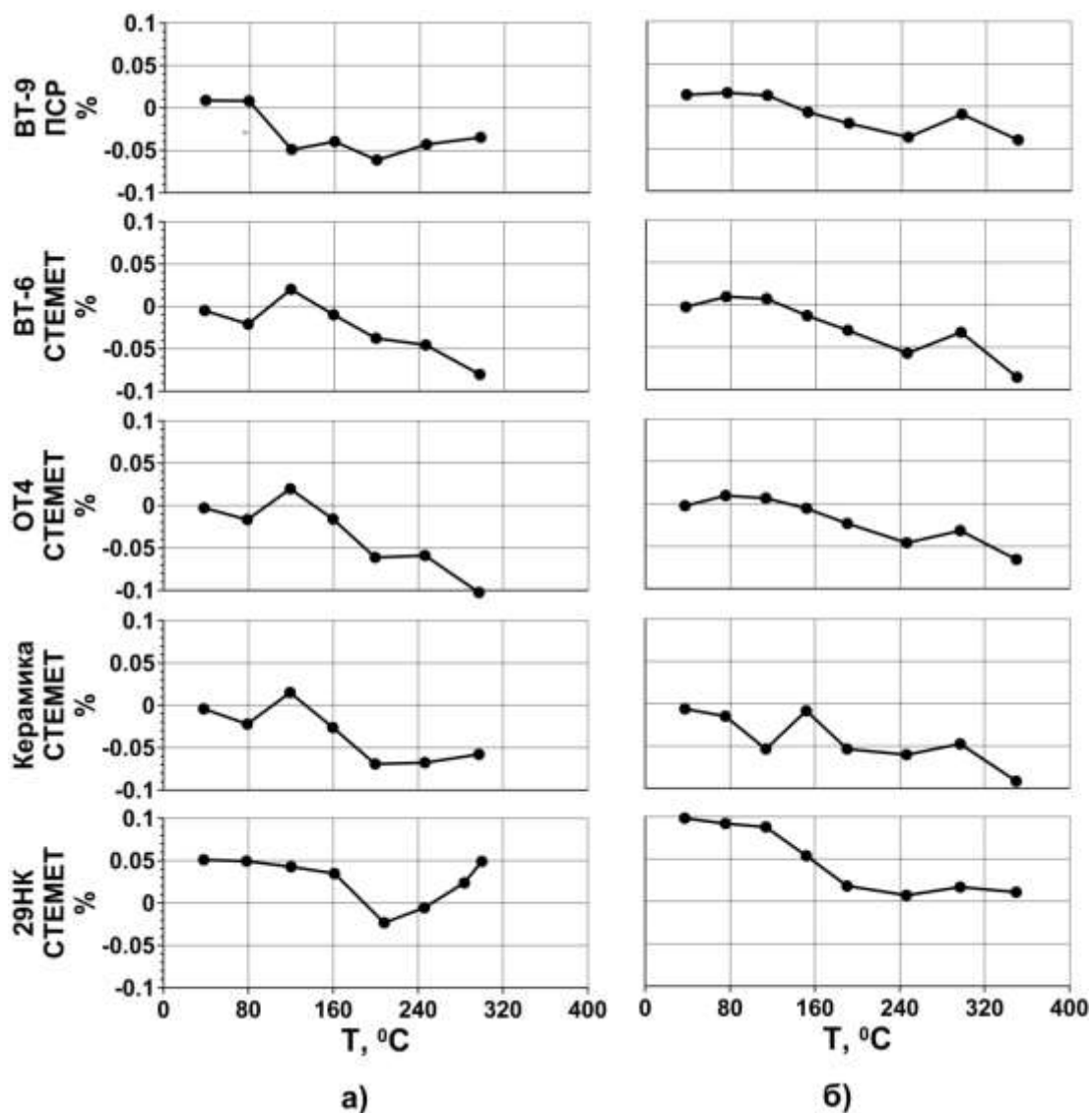


Рис.3. Температурная зависимость вариации выходного сигнала ТП до (а) и после (б) стабилизации.

Важной для потребителя характеристикой датчика давления является гистерезис первого нагружения (ГПН) [9,10]. Ранее было показано, что величина ГПН зависит от материала металлической мембраны и от используемого припоя. В стандартных ТП давления с использованием серебро-медного припоя величина ГПН достигает нескольких десятых процента, особенно при низких температурах; применение аморфного припоя СТЕМЕТ радикально снижает ГПН при низких температурах [7]. Как видно из рис.4, при высоких температурах зависимости величины ГПН от используемого припоя практически нет, а её изменение при температурах выше 300 °С (для ковара выше 200 °С) целиком определяется используемым металлом. И в этом случае термомеханическая обработка позволяет практически устранить гистерезис первого нагружения по крайней мере до 350 °С.

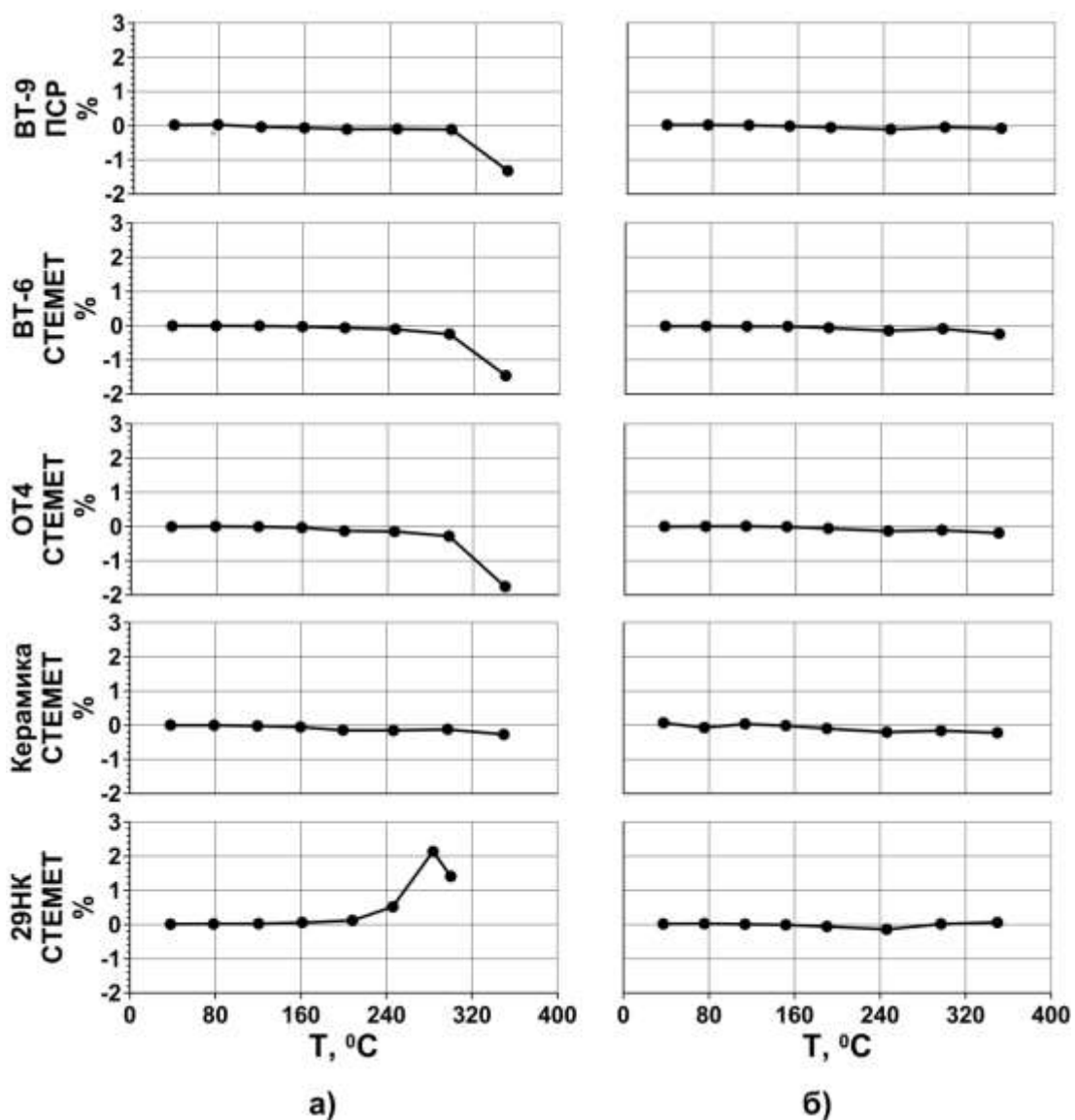


Рис.4. Температурная зависимость гистерезиса первого нагружения до(а) и после (б) стабилизации.

Аналогичным образом ведёт себя и стандартный гистерезис ТП (невозврат начального выходного сигнала при втором и последующих нагружениях [11]) – рис.5. Для сравнения на этом рисунке (в большем масштабе) приведены значения ГПН, которые, как видно, растут по абсолютной величине с температурой, оставаясь отрицательными.

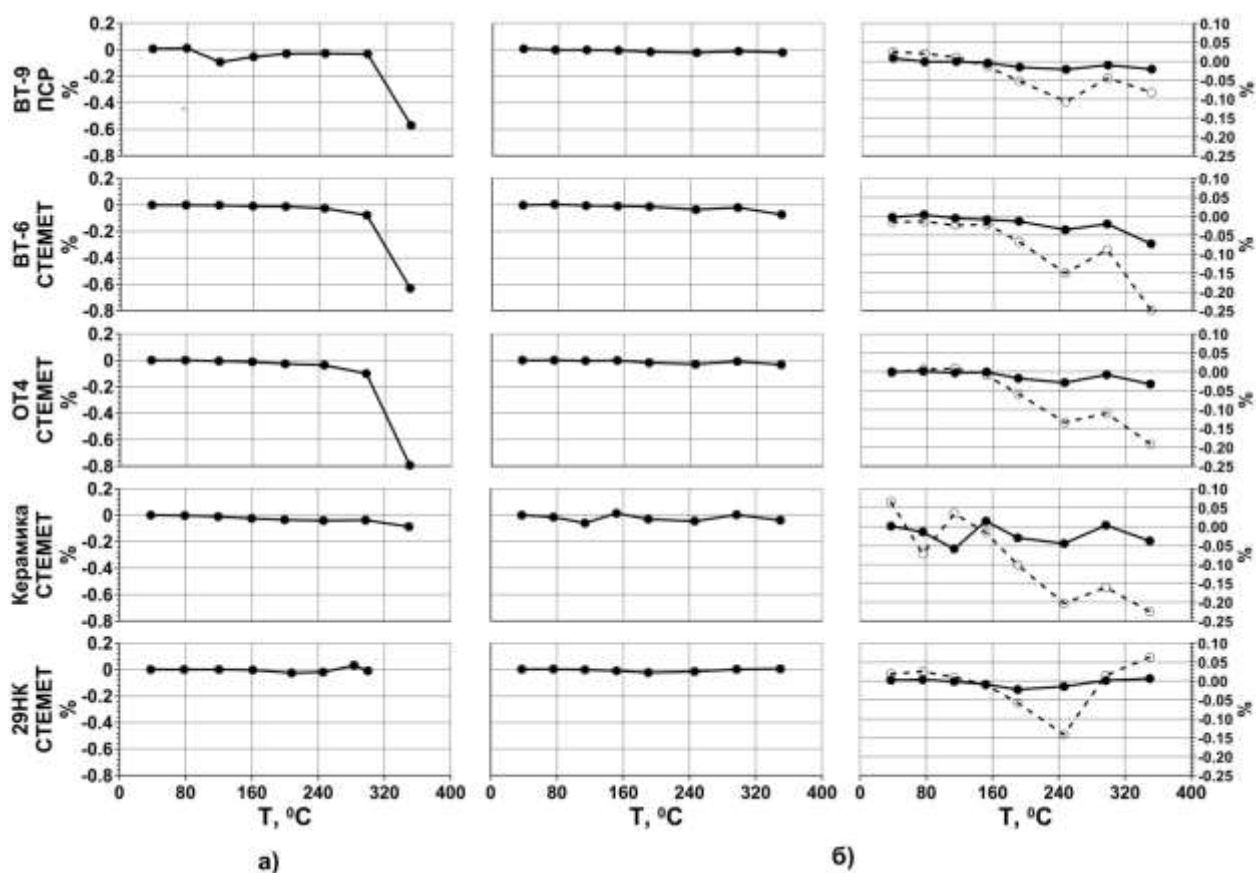


Рис.5. Гистерезис ТП до (а) и после (б) стабилизации (правые графики – в увеличенном масштабе; штриховой линией показаны значения ГПН).

Таким образом, стандартная технология изготовления тензопреобразователей давления на основе структур КНС позволяет получать серийные приборы с точностью не хуже 0,2% в диапазоне температур измеряемой среды от 20 до 300 °С (от -50 до +300 °С при пайке чувствительного элемента припоем СТЕМЕТ). Термомеханическая стабилизация позволяет расширить температурный диапазон работы высокоточных ТП давления до 350 °С. При более высоких температурах существенную роль начинают играть явления неустойчивости (ползучести) в металлических упругих элементах ТП; в этом случае для получения высокоточных ТП на основе КНС требуется использование керамических упругих элементов и дополнительных методов повышения механических характеристик металлических упругих элементов тензопреобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иордан Г.Г. Измерение давления при высоких и сверхнизких температурах с помощью тензорезисторных преобразователей на основе структур КНС // Г.Г.Иордан, Г.И.Лурье, В.М.Стучебников, В.И.Суханов, В.В.Хасиков – Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на основе микроэлектроники, Материалы конференции, М.,1980, МДНТП, с.84-88.
2. Стучебников В.М. Оптимизация характеристик высокотемпературных тензопреобразователей на основе структур КНС // В.М.Стучебников, В.И.Суханов

- Датчики на основе технологии микроэлектроники, Материалы семинара, М., 1983, МДНТП, с.47-51.
3. Бушев Е.Е. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА // Е.Е.Бушев, О.Л.Николайчук, В.М.Стучебников – Датчики и системы, 2000, №1, с.21-27.
 4. Стучебников В.М. Структуры «Кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №6, с.678-696.
 5. Бушуев Н.А. Высокоточные датчики давления высокотемпературных сред // Н.А.Бушуев, Д.Б.Мартынов, О.Л.Николайчук, В.М.Стучебников – Сборник докладов Международной научно-технической конференции Датчики и Системы – 2005 «ДИС – 2005», Пенза, 2005, с.52-55.
 6. Савченко Е.Г. Керамические упругие элементы в тензопреобразователях давления на основе структур КНС // Е.Г.Савченко, В.В.Светухин, В.М.Стучебников, А.А.Устинов – Датчики и системы, 2014, №10, с.58-62.
 7. Савченко Е.Г. Управление характеристиками преобразователей давления на основе структур «Кремний на сапфире» // Е.Г.Савченко, В.М.Стучебников, А.А.Устинов – Materialy IX Miedzynarodowej naukowy-praktycnej konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2013», v.40, Techniczne nauki. Fyzika.: Przemysl, Nauka i studia, s.25-29.
 8. 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.
 9. Стучебников В.М. О стабильности преобразователей давления на основе структур КНС // В.М.Стучебников, А.А.Устинов – Материалы XV Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2013», Димитровград, 2013, с.119-122.
 10. Стучебников В.М. Некоторые свойства тензопреобразователей давления на основе структур КНС. // В.М.Стучебников, А.А.Устинов – Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2013, с.64-68.
 11. Савченко Е.Г. Гистерезисные явления в преобразователях давления на основе структур КНС. // Е.Г.Савченко, В.М.Стучебников, А.А.Устинов - Приборы, 2015, №2, с.30-35.

Савченко Евгений Геннадьевич – аспирант, научный сотрудник ЗАО «МИДАУС»

+79378779668

seg@midaus.com

Стучебников Владимир Михайлович – д-р технич. наук, генеральный директор ЗАО «МИДАУС»

+7(8422)360460

vms@midaus.com

Устинов Алексей Андреевич – мл. научный сотрудник ЗАО «МИДАУС»

+79648568590

ahsel@bk.ru