

Савченко Е.Г., Стучебников В.М., Устинов А.А.

Savchenko E.G., Stuchebnikov V.M., Ustinov A.A.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС

HYSTERESIS IN PRESSURE TRANSDUCERS BASED ON STRUCTURES SILICON-ON-SAPPHIRE

Аннотация. Рассмотрены некоторые гистерезисные явления в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире», обсуждены методы их уменьшения. Проведено сравнение гистерезисных эффектов от давления и температуры в стандартных преобразователях давления и приборах, в которых чувствительный элемент соединяется с титановой мембраной посредством аморфного припоя на основе титана. Продемонстрированы преимущества данной технологии.

Annotation. Some hysteresis phenomena in pressure transducers based on structures "silicon on sapphire" are considered and methods of their reduction are discussed. The comparison of hysteresis effects from pressure and temperature in standard pressure transducers and devices in which the sensitive element is connected with titanium membrane by amorphous titanium-based solder is carried out. Benefits of this technology are shown.

Ключевые слова: тензопреобразователь давления, структура «кремний на сапфире», гистерезис первого нагружения, гистерезис от давления, температурный гистерезис, аморфный припой, рентгенофлуоресцентный анализ, микротвёрдость.

Keywords: pressure transducer, structure "Silicon-on-Sapphire" (SOS), amorphous solder, pressure hysteresis, temperature hysteresis, X-ray fluorescence analysis, microhardness.

С развитием устройств обработки сигнала, особенно в цифровом виде, ряд погрешностей, присущих полупроводниковым тензопреобразователям (ТП) давления, таких как нелинейность, сильная и нелинейная температурная зависимость начального выходного сигнала и чувствительности, поддаются схемной коррекции и не являются определяющими для точности датчиков давления с полупроводниковыми ТП. Однако, есть ряд составляющих погрешности, которые принципиально невозможно скорректировать аппаратно-программными методами. К таким составляющим относятся нестабильность параметров ТП во времени, а также различные гистерезисные явления при воздействии давления и температуры, присущие ТП. В настоящей работе рассмотрены некоторые гистерезисные явления на примере широко распространенных в нашей стране ТП на основе

гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [1], а также обсуждены некоторые методы их уменьшения.

В российском стандарте на датчики давления с электрическим выходным сигналом [2] нормируется лишь одна из погрешностей, связанных с гистерезисными явлениями, - вариация (разность показаний при одном и том же значении измеряемого давления, полученных при увеличении – прямой ход – и при уменьшении давления – обратный ход). В зарубежной литературе этот параметр называется гистерезисом. Как будет видно из дальнейшего, целесообразно выделить вариацию при начальном (нулевом) значении измеряемого давления: во-первых, начальный выходной сигнал ТП невозможно получить при увеличении давления, а во-вторых, эта величина обладает рядом особенностей. Поэтому в дальнейшем разницу в начальном выходном сигнале ТП между прямым и обратным ходом мы будем называть гистерезисом нагружения (ГН). Не нормирует стандарт и температурный гистерезис, т.е. разность показаний ТП при определенной температуре, полученных при нагреве и охлаждении.

Особый интерес вызывает так называемый гистерезис первого нагружения (ГПН), т.е. разница в начальных сигналах ТП при первом цикле нагружения [3]. ГОСТ предписывает после установки датчика в устройство подачи давления перед снятием нагрузочной характеристики обдавить прибор максимальным измеряемым давлением; в результате ГПН исключается из параметров ТП. Вместе с тем, при реальном использовании датчиков давления они должны работать сразу при первой подаче давления, так что если ГПН имеет заметную величину, то он вносит неучтённый вклад в погрешность измерений.

Для исследований использовались ТП одномембранной конструкции [1] на давление 4 МПа с мембранами из различных титановых сплавов (ВТ9, ВТ14, ВТ22). Пайка чувствительных элементов проводилась по обычной

технологии серебросодержащим припоем ПСр72, а также аморфным припоем на основе титана СТЕМЕТ®[4,5].

Опыт показывает, что гистерезис первого нагружения обычно больше, чем гистерезисы последующих нагружений, которые практически не меняются со временем, если температура датчика остаётся постоянной (Рис.1а). Отсутствие существенных гистерезисов второго и последующего нагружений при фиксированной температуре вероятно связано с микроупрочнением, возникающим в процессе нагружения.

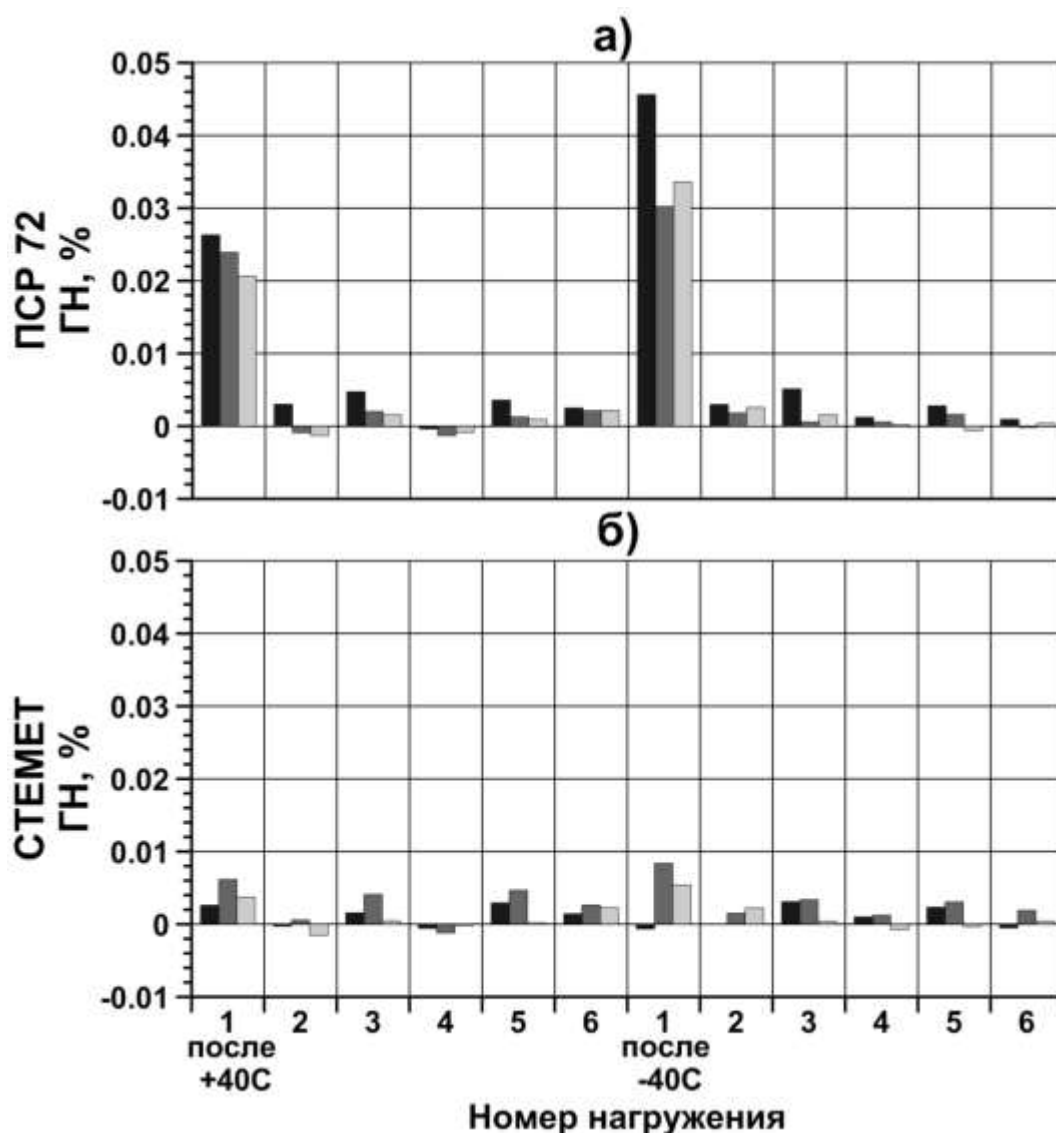


Рис. 1. Гистерезисы шести нагружений ТП номинальным давлением при 80⁰С после возврата с различных температур.



Величина ГПН зависит от температуры, и для ТП, изготовленных по стандартной технологии (пайкой чувствительного элемента к мембране из титанового сплава припоем ПСр72), величина ГПН при отрицательной температуре может быть значительной (Рис.2а). При этом в области температур $-40...+80^{\circ}\text{C}$ величина ГПН слабо зависит от марки титанового сплава (рис.2).

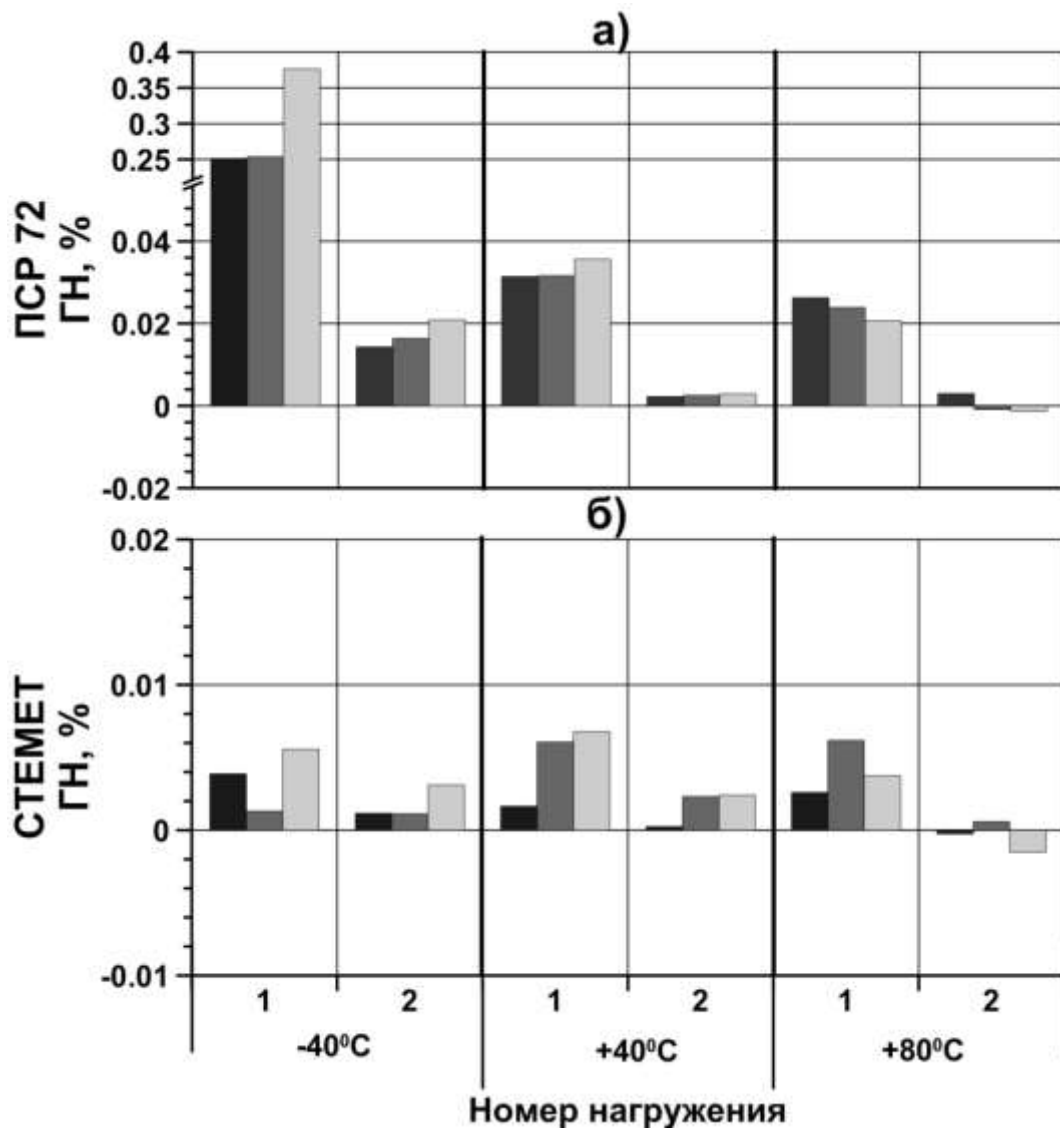


Рис. 2. Гистерезисы первого и второго нагружений ТП давления при

различных температурах.

- - BT-9
- - BT-14
- - BT-22

ГПН возникает при изменении температуры ТП, причем, чем больше изменение температуры, тем больше величина ГПН (рис.2,3). Возникновение ГПН после смены температур можно объяснить термическим разупрочнением при изменении температуры.

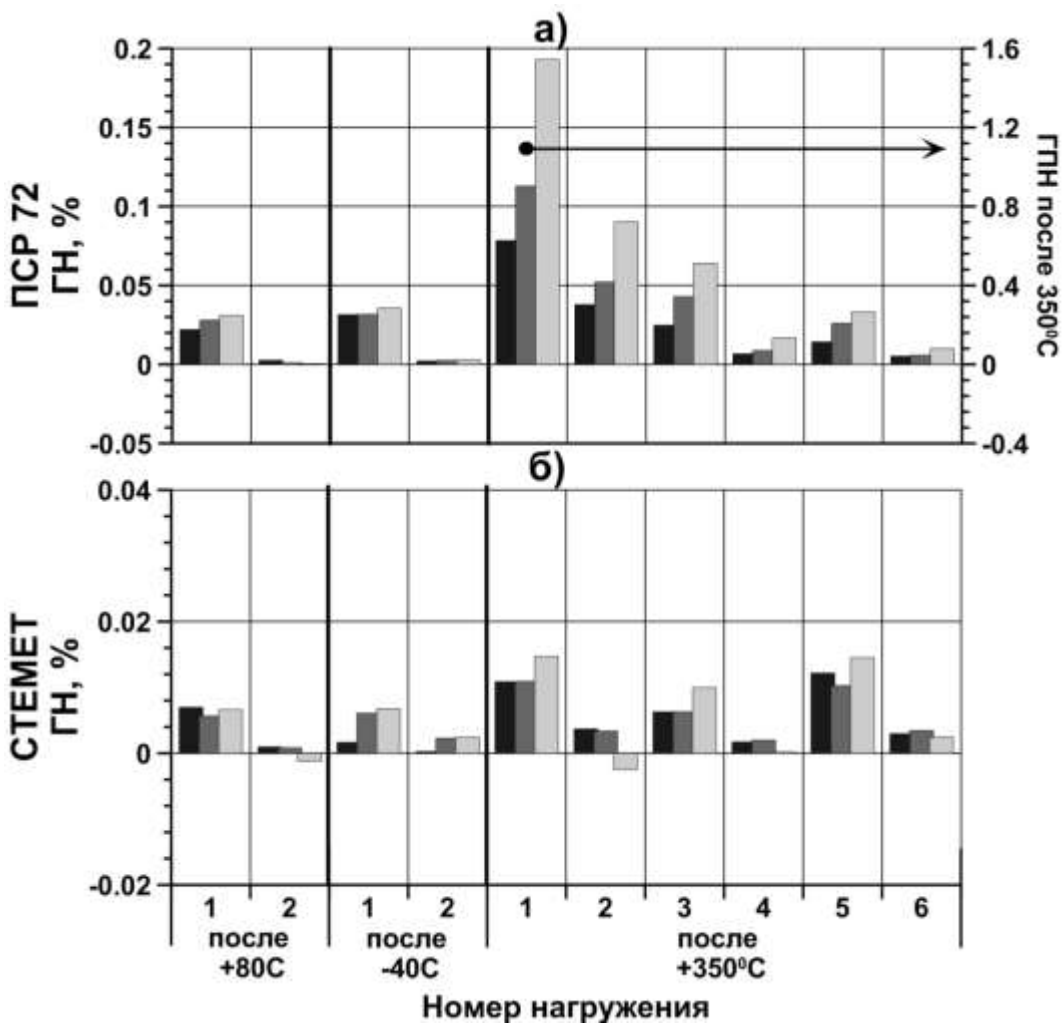


Рис. 3. Гистерезисы последовательных нагружений ТП при 40 °С после возврата с различных температур (для ГПН после возврата с высокой температуры шкала находится справа).

■ - BT-9
 ■ - BT-14
 ■ - BT-22

Гистерезис первого нагружения можно значительно уменьшить, если использовать для соединения лейкосапфира с титановым сплавом аморфный припой STEMET [5] (рис.1б, рис.2б, рис.3б). Особенно разительное уменьшение ГПН наблюдается при отрицательной температуре (рис.2б), а

также после возврата с высокой температуры (рис.3б). Одновременно снижается и величина вариации (рис.4).

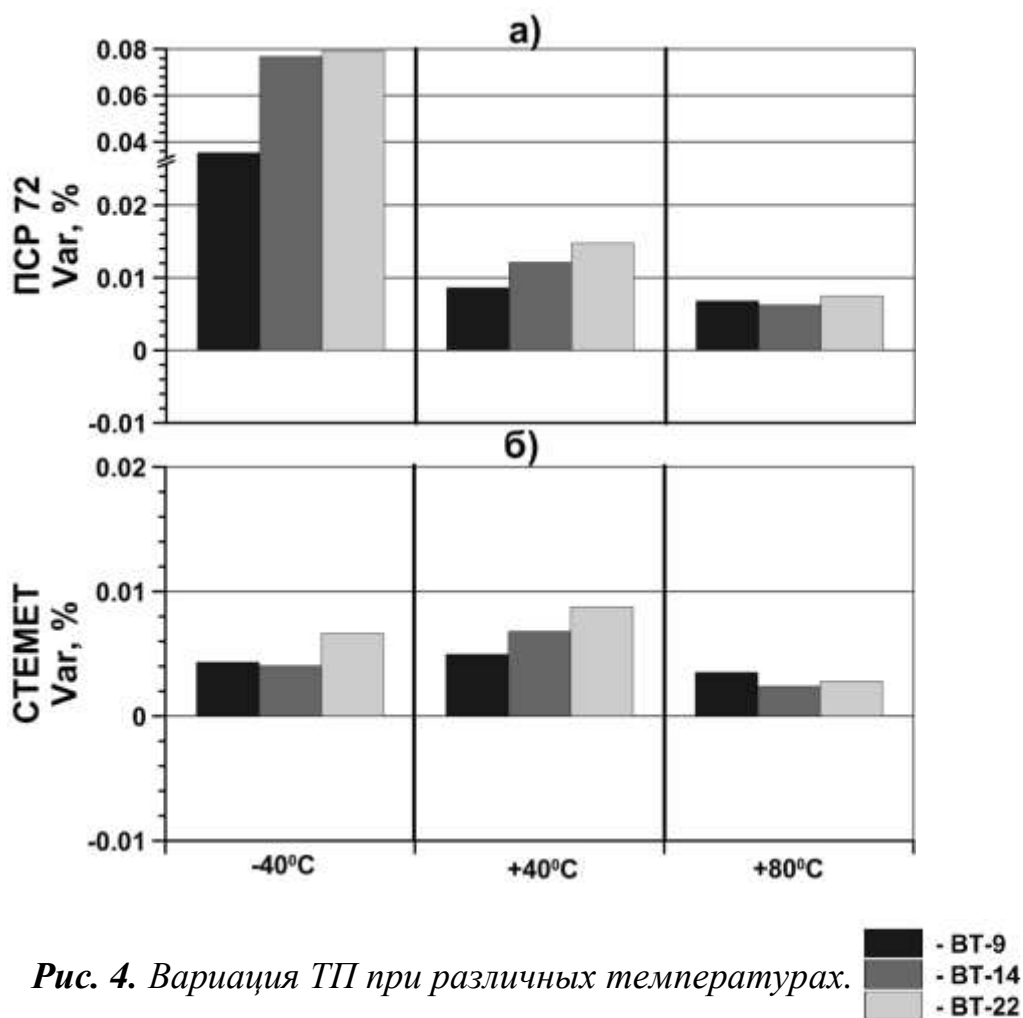


Рис. 4. Вариация ТП при различных температурах.

Как видно из рис.4а, вариация у приборов с припоем ПСр72 при отрицательной температуре также существенно больше, чем у ТП с припоем СТЕМЕТ. Этот факт свидетельствует о том, что физическая природа вариации, гистерезиса и гистерезиса первого нагружения схожая и, вероятнее всего, связана с явлениями вязкоупругости и ползучести [6].

Полученные данные показывают, что величина гистерезиса первого нагружения в ТП на основе КНС с титановой мембраной в области

умеренных температур связана со свойствами соединительного слоя металл-сапфир. Действительно, при пайке припоем ПСр72 соединительный слой оказывается резко неоднородным: серебро скапливается у границы с сапфиром, а медь концентрируется вблизи титановой мембраны; соответственно изменяется и микротвёрдость по толщине соединительного слоя (рис.5 [7]). В области преобладания серебра микротвёрдость минимальна; вероятно, именно эта часть соединительного слоя и ответственна за возникновение ГПН.

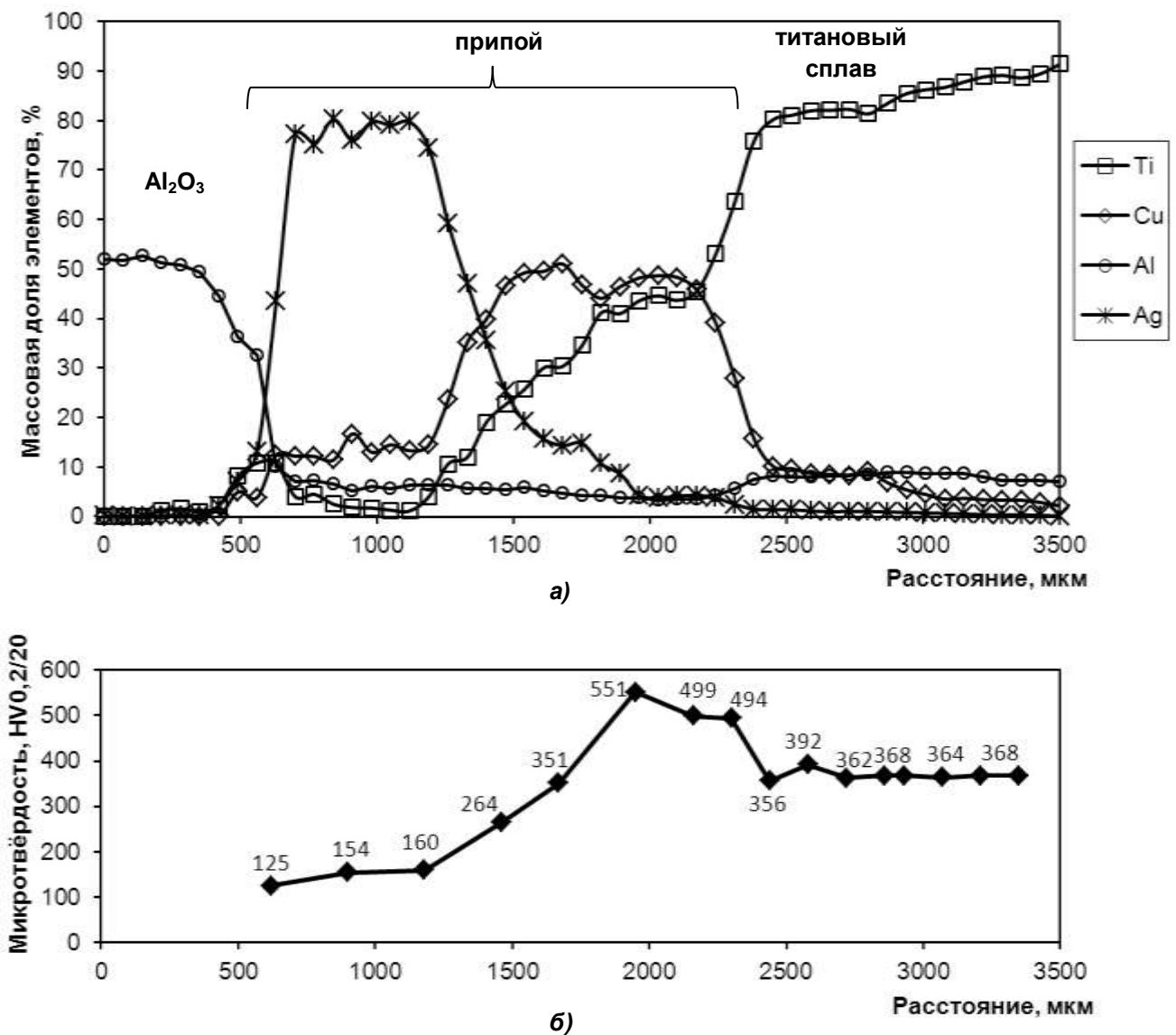


Рис. 5. Распределение элементов (а) и микротвёрдости (б) в паяном слое.[7]

Напротив, в соединительном слое, полученном пайкой припоем СТЕМЕТ, распределение как составляющих сплав элементов, так и микротвёрдости равномерное, а величина микротвёрдости оказывается больше, чем микротвёрдость титанового сплава (рис.6). Такая повышенная прочность соединительного слоя препятствует возникновению в нём явлений ползучести при механическом нагружении.

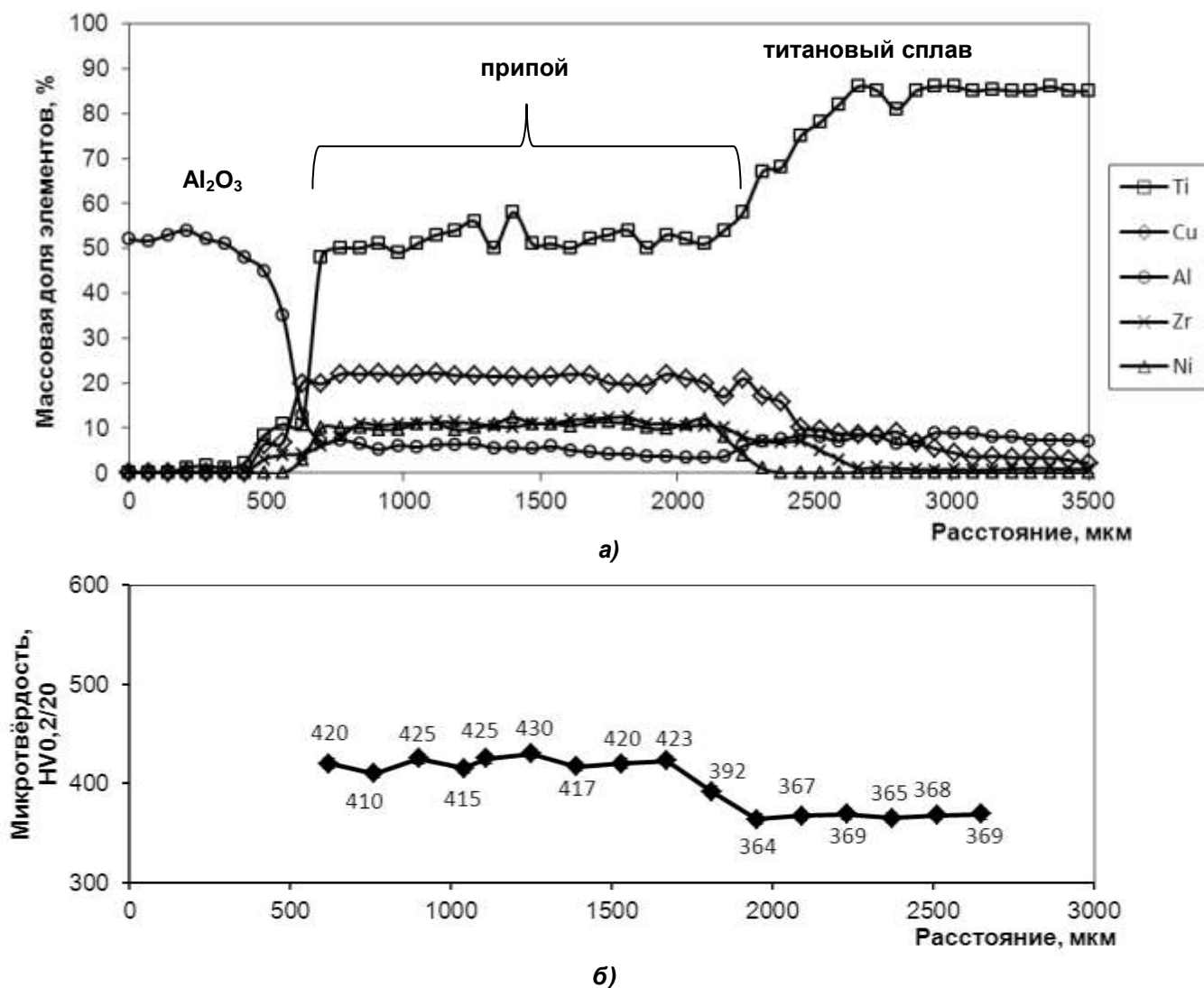


Рис. 6. Распределение элементов (а) и микротвёрдости (б) в соединительном слое при пайке сплавом СТЕМЕТ.

Если измерять значение начального выходного сигнала при определённой температуре, то окажется, что величина выходного сигнала зависит от того, достигаем ли мы этой температуры нагревом или

охлаждением (рис.7), т.е. при циклическом изменении температуры значение начального выходного сигнала неоднозначно. Как результат возникает температурный гистерезис (ТГ) [3], который может также проявляться в невозврате начального выходного сигнала после нагрева (или охлаждения).

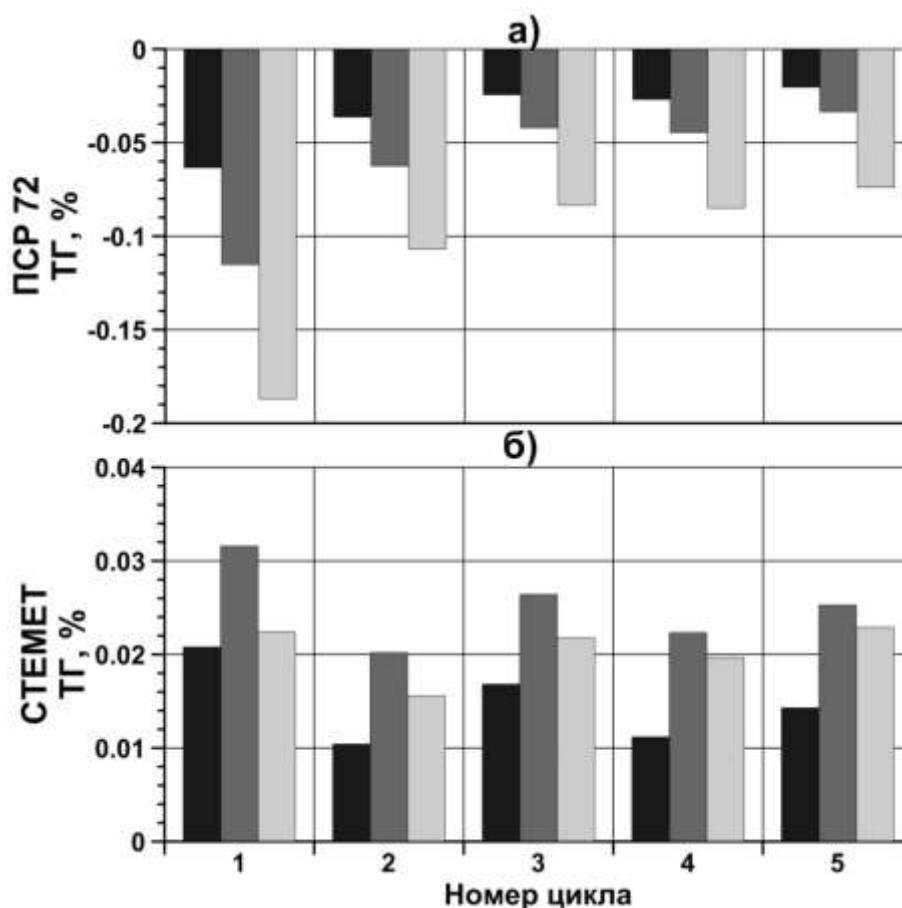


Рис 7. Температурный гистерезис ТП давления с мембранами из различных титановых сплавов с разными припоями при 40 °С при изменении температуры в диапазоне -40...+80 °С.

Как видно из рис.7, температурный гистерезис у приборов с припоем ПСр72 больше и имеет отрицательный знак (т.е. сигнал после -40 °С больше сигнала после +80 °С), что связано с большим ГПН приборов с ПСр 72 при низких температурах.

Величина ТГ начального выходного сигнала для ТП, изготовленных по стандартной технологии, зависит от марки сплава; хотя она относительно

невелика ($< 0,1\%$, не считая ТГ первого цикла), но и в этом случае использование в качестве припоя сплава СТЕМЕТ существенно снижает величину ТГ.

Таким образом, использование аморфного припоя СТЕМЕТ для соединения чувствительного элемента с титановой мембраной позволяет изготавливать ТП давления на основе структур КНС с гистерезисными явлениями, связанными с нагружением (вариация и ГПН) до величины менее $0,01\%$ и с температурным гистерезисом не более $0,02\%$. Дальнейшее снижение ТГ требует перехода к новым материалам для воспринимающей давление мембраны; так использование в качестве материала мембраны керамики уменьшает ТГ до величины менее $0,01\%$ [7].

Литература.

1. Стучебников В.М. Структуры КНС как материал для тензопреобразователей механических величин.: Радиотехника и электроника, 2005 г., т.50, №6-с.с.678-696.
2. ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими выходными сигналами ГСП. Общие технические условия.
3. Стучебников В.М., Устинов А.А. О стабильности преобразователей давления на основе структур КНС.: XV Международная научно-практическая конференция «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2013». Димитровград, 2013 г.-с.с.119-122
4. <http://stemet.ru/rd.htm> СТЕМЕТ® – зарегистрированный товарный знак предприятия МИФИ-АМЕТО
5. Савченко Е.Г., Стучебников В.М. Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур «Кремний на сапфире».: Сварочное производство, 2013 г., №1-с.с.23-25.

6. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. 3-е изд. М.: МИСИ, 1998. 400 с.
7. Савченко Е.Г., Светухин В.В., Стучебников В.М., Устинов А.А. Керамические упругие элементы в тензопреобразователях давления на основе структур КНС.: Датчики и системы, 2014 г., №10-с.с.58-62.

Савченко Евгений Геннадьевич – аспирант, инженер-исследователь 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 – инженер-исследователь ЗАО «МИДАУС»

+79648568590

ahsel@bk.ru