

## ГИСТЕРЕЗИС ПЕРВОГО НАГРУЖЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС

## PRESSURE HYSTERESIS OF THE FIRST LOADING IN PRESSURE TRANSDUCERS BASED ON SOS STRUCTURES

**Савченко Евгений Геннадьевич**

*научный сотрудник*

*e-mail: [seg@midaus.com](mailto:seg@midaus.com)*

**Savchenko Evgeniy G.**

*Research officer*

*e-mail: [seg@midaus.com](mailto:seg@midaus.com)*

**Стучебников Владимир Михайлович**

*д-р техн. наук, профессор*

*e-mail: [vms@midaus.com](mailto:vms@midaus.com)*

**Stuchebnikov Vladimir M.**

*D. Sc. (Tech.), Professor*

*e-mail: [vms@midaus.com](mailto:vms@midaus.com)*

**ЗАО МИДАУС, г.Ульяновск**

**JSC MIDAUS, Ulyanovsk**

**Аннотация:** Рассмотрена такая характеристика тензопреобразователей давления на основе структур «Кремний-на-сапфире» (КНС) как гистерезис первого нагружения (ГПН). Показаны различия ГПН у преобразователей, отличающихся материалами упругой мембраны и припоя, а также показаны особенности проявления данного параметра. Продемонстрированы возможности разработки преобразователей давления на основе структур КНС с минимальным гистерезисом первого нагружения.

**Abstract:** Such specific characteristic of pressure transducers based on Silicon-on-Sapphire (SOS) structures as the pressure hysteresis of the first loading (HFL) is considered. Differences in HFL of the transducers with different materials of elastic membrane and soldering alloy and corresponding features of their characteristic are shown. It is shown that pressure transducers based on SOS structures can be designed with minimum HFL.

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

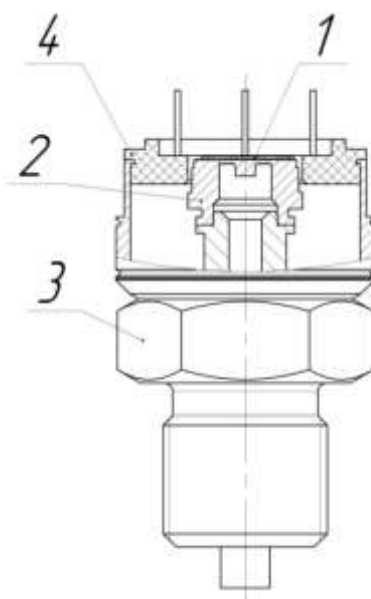
Как было показано в [1], у тензопреобразователей (ТП) и датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» (КНС) после первого нагружения давлением происходит изменение начального выходного сигнала (в отсутствие давления), причем это изменение значительно больше, чем после второго и последующих циклов нагружения (это изменение ГОСТ 22520 определяет как гистерезис). Поэтому в работе [1] было введено специальное обозначение невозврата начального выходного сигнала после первого цикла нагружения – гистерезис первого нагружения (ГПН). Важность этого параметра обусловлена тем, что согласно ГОСТ 22520 перед измерением метрологических характеристик датчиков давления необходимо провести их опрессовку (подать и сбросить номинальное давление) и только потом проводить измерения нагрузочной характеристики. В этом случае измеренный гистерезис значительно уменьшается; однако в реальных условиях эксплуатации опрессовка приборов до включения их в измерительную систему невозможна, так как датчик начинает давать показания непосредственно после монтажа. Опыт показывает, что ГПН возникает каждый раз, когда

изменяется температура окружающей среды, так что этот параметр является характеристикой ТП, а не условий монтажа, и его необходимо учитывать наряду с другими метрологическими характеристиками.

В настоящей статье проведено более подробное исследование условий возникновения ГПН, его зависимости от конструкции ТП и обсуждено, с какими физическими механизмами может быть связано появление ГПН, и соответственно, какими способами можно влиять на его величину.

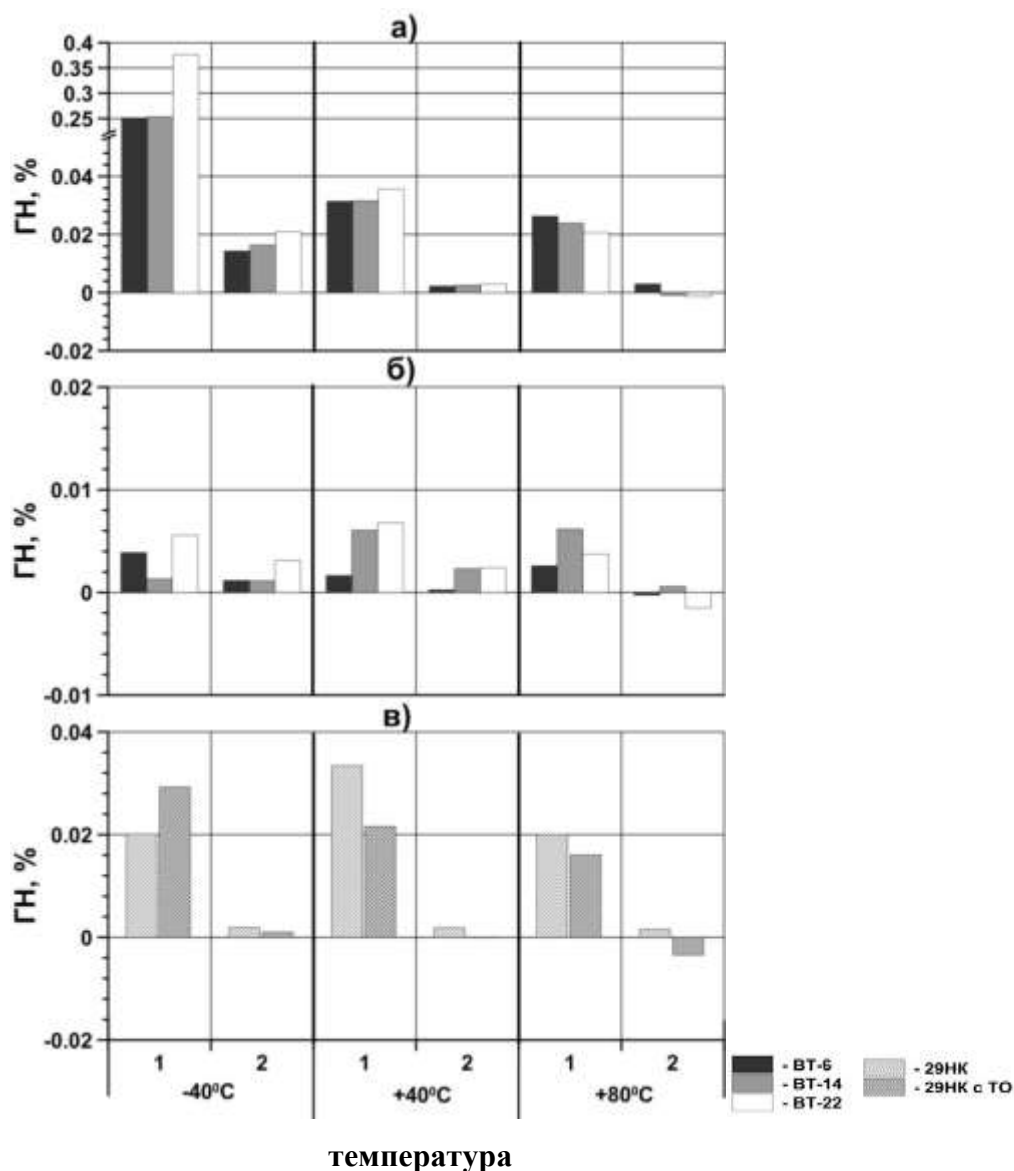
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку очевидно, что ГПН связан с механическими свойствами металлов и сплавов, участвующих в передаче деформации на полупроводниковый чувствительный элемент (ПЧЭ) из КНС, было проведено сравнение ГПН у тензопреобразователей с мембранами из различных сплавов, а также с использованием различных припоев для соединения ПЧЭ с металлической мембраной. Для исследований были изготовлены ТП с мембранами из титановых сплавов ВТ6, ВТ14 и ВТ22 и из сплава 29НК; часть последних подвергалась упрочняющей термообработке согласно [2]. На мембраны были напаяны ЧЭ на основе структур КНС толщиной 100 мкм. Пайка происходила в вакууме припоем на основе серебра ПСр72, а также одним из аморфных припоев на основе титана марки СТЕМЕТ® [3]. После пайки были собраны ТП давления, общий вид которых представлен на рис.1.



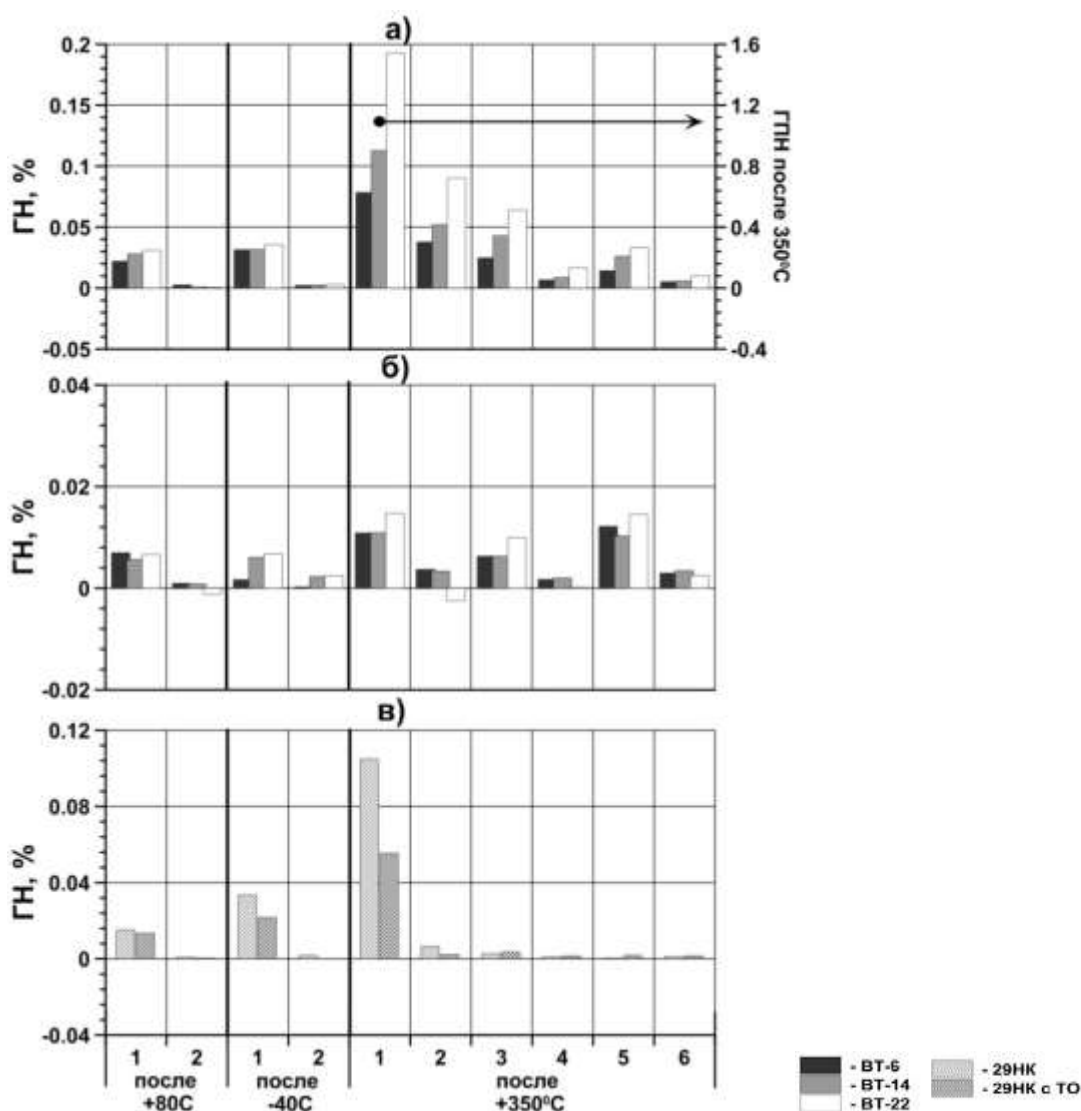
*Рис. 1. Общий вид ТП давления: 1 – ПЧЭ на основе КНС; 2 – металлическая мембрана чашечного типа; 3 – штуцер; 4 – коллектор.*

В процессе исследований выяснилось, что величина ГПН существенно зависит от выбора материала мембраны и типа припоя для соединения ПЧЭ с металлической мембраной; особенно велика разница при отрицательной температуре (рис. 2). Видно, что использование пайки СТЕМЕТом существенно уменьшает ГПН преобразователей, работающих при отрицательных температурах, что также подтверждается в работе [4]. Видно также, как это показано и в [1], что при повторном нагружении величина гистерезиса существенно уменьшается.



**Рис. 2.** Гистерезисы первого и второго нагружений ТП давления (относительно диапазона измерения) при различных температурах. ГН – гистерезис нагружения; 1, 2 – номера нагружения. Используемые припои: а) ПСр72; б), в) СТЕМЕТ.

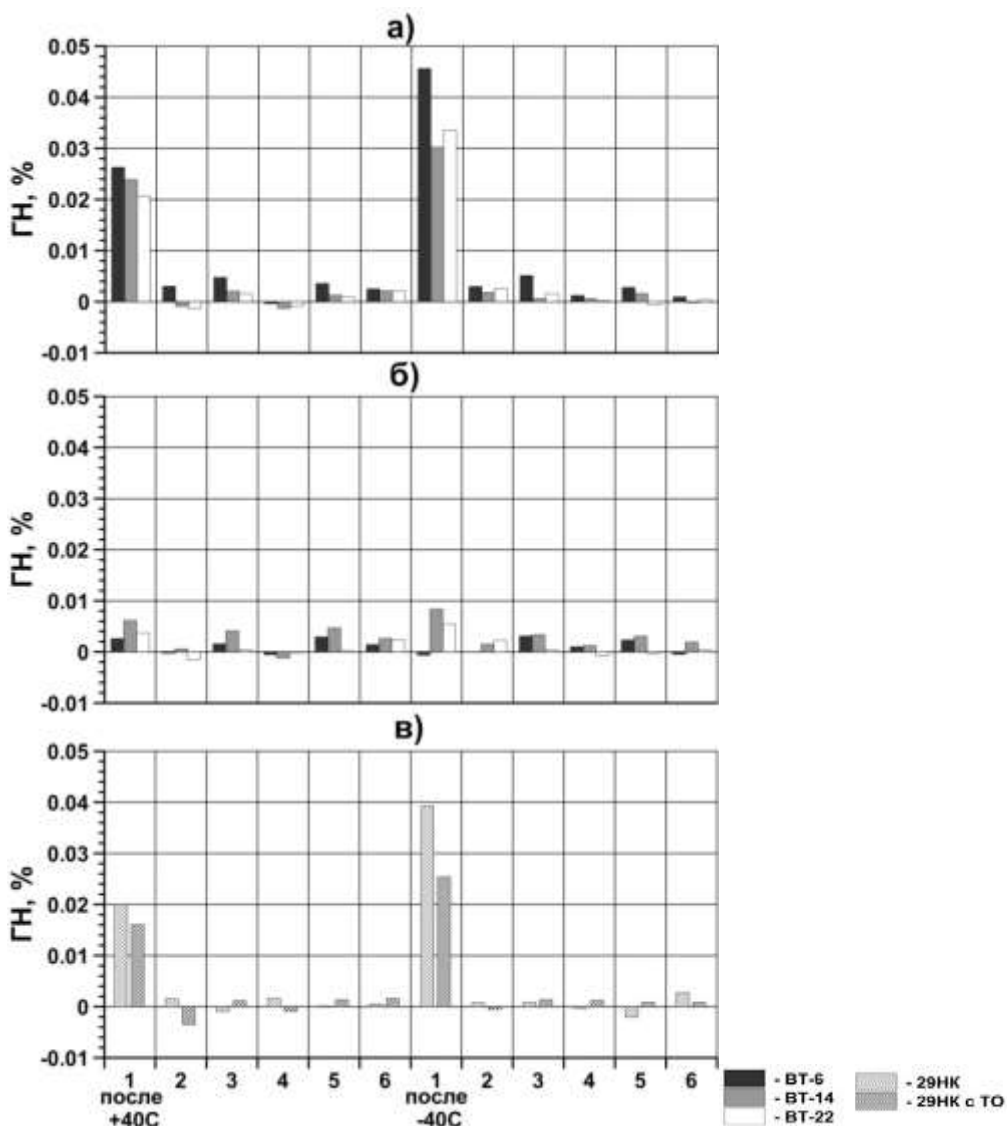
На рис. 3 представлены гистерезисы нагружений при температуре 40 °С после возврата с различных температур. Как видно, ГПН после смены температуры возникает вновь, причем чем больше интервал температур возврата, тем больше значение ГПН.



*Рис. 3. Гистерезисы нагружений ТП при 40 °С после возврата с различных температур. 1,2...6 – номера нагружения. Используемые припои: а) ПСр72; б), в) СТЕМЕТ.*

ГПН имеет значительную величину в ТП с припоем ПСр72. У ТП с мембранами из титановых сплавов и с припоем СТЕМЕТ ГПН практически отсутствует; у ТП с мембранами из сплава 29НК гистерезис хотя и значительно уменьшен, но несколько больше, чем у ТП с мембранами из титановых сплавов (рис. 2). Это можно объяснить тем, что в промежуточном слое между мембраной и сапфиром припой ПСр72 оказывается неоднородным по составу: у сапфира образуется слой с повышенным содержанием серебра, а у титанового сплава – с повышенным содержанием меди. В результате у

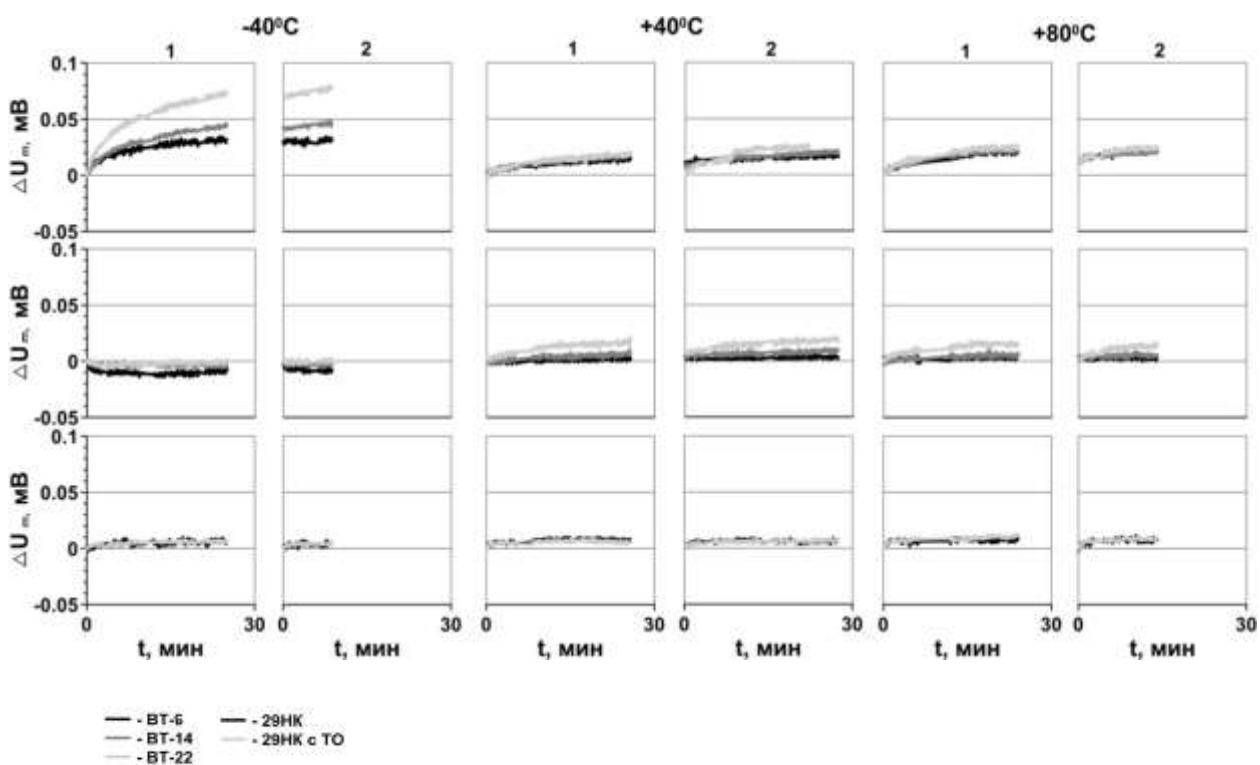
сапфира образуется слой с пониженной твёрдостью. Слой СТЕМЕТа после пайки остаётся однородным по составу и поэтому образует более жёсткое соединение [5]. Таким образом, сопротивление ползучести при данных нагрузках и температурах (особенно при низкой) у припоя СТЕМЕТ существенно выше. Проявление ГПН у приборов с мембранами из 29НК, паяных СТЕМЕТОм, свидетельствует о том, что данные нагрузки и температуры приводят к ползучести самого сплава 29НК. На это указывает и тот факт, что у ТП с мембранами из термообработанного сплава 29НК ГПН уменьшается, т.к. данный вид обработки повышает сопротивление ползучести сплава 29НК [6].



*Рис. 4. Гистерезисы нагрузжений ТП при 80 °С после возврата с различных температур. 1-6 – номера нагрузжения. Используемые припои: а) ПСр72; б), в) СТЕМЕТ.*

Из рис. 2-4 видно, что существенный невозврат сигнала имеет место именно при первом нагружении, последующие нагружения к невозврату сигнала практически не приводят. Также видно, что после изменения температуры и последующего возврата на исходную температуру ГПН возникает вновь.

На рис. 5. представлено изменение во времени выходного сигнала ГП ( $\Delta U_m$ ) при максимальном фиксированном давлении 4 МПа (т.е. давление поддерживается постоянное, а выходной сигнал преобразователя при этом изменяется) при различных температурах. Данные наглядно демонстрируют проявление низкотемпературной ползучести [7, 8] мягкого припоя ПСр72. Видно, что при повторной подаче давления кривая изменения сигнала практически продолжает предыдущую.



**Рис. 5.** Относительное изменение во времени максимального выходного сигнала ГП при давлении 4 МПа при различных температурах.  $t$  – время; 1,2 – номера нагружения.

Используемые припои: первый ряд – ПСр72; второй и третий ряды – СТЕМЕТ.

Как следует из сравнения данных рис. 2 и рис. 5, чем сильнее меняется выходной сигнал ГП при фиксированном давлении, тем больше невозврат сигнала после сброса давления, т.е. ГПН непосредственно связан с ползучестью материалов ГП. Аналогично ситуация обстоит и с вариацией: у приборов, паяных СТЕМЕТом, вариация меньше; особенно это заметно в области отрицательных температур [6].

## МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГПН

Согласно [7], ползучесть является неустановившейся, поскольку ее скорость непрерывно уменьшается со временем, что объясняют моделью «истощения» дислокаций. Если в образце имеется какое-то число дислокационных отрезков, и каждый из них может переместиться один раз до остановки у какого-либо препятствия, то после приложения нагрузки и упругой деформации образца наиболее благоприятно ориентированные дислокации перемещаются, и происходит пластическая деформация. В условиях постоянства приложенного напряжения оставшиеся дислокации удерживаются препятствиями, но с течением времени термические флуктуации вызывают движение большинства этих дислокационных отрезков (за счет поперечного скольжения) и соответствующий прирост деформации. Постепенно термически активируемое скольжение затухает (истощается) из-за уменьшения числа дислокационных отрезков, способных перемещаться и вызывать деформацию. В результате скорость прироста относительной деформации снижается. Считается, что в условиях ползучести термический возврат протекает лишь частично [8].

При проектировании металлоконструкций практическое значение ползучести мало, поскольку величина деформации при реальных для конструкций напряжениях обычно незначительна, быстро стабилизируется во времени и не может существенно вырасти даже при очень длительных выдержках, в отличие от высокотемпературной ползучести [8]. Но как видно, для точных датчиков давления с многослойной структурой мембрана – припой – ПЧЭ из КНС данный вид ползучести оказывается существенным, особенно с учетом того, что в таких приборах помимо напряжений, вызванных непосредственно давлением, присутствуют температурные напряжения, вызванные пайкой ПЧЭ и связанные с различием температурных коэффициентов расширения материалов мембран, припоя и сапфира. Особенно велики эти напряжения при отрицательных температурах.

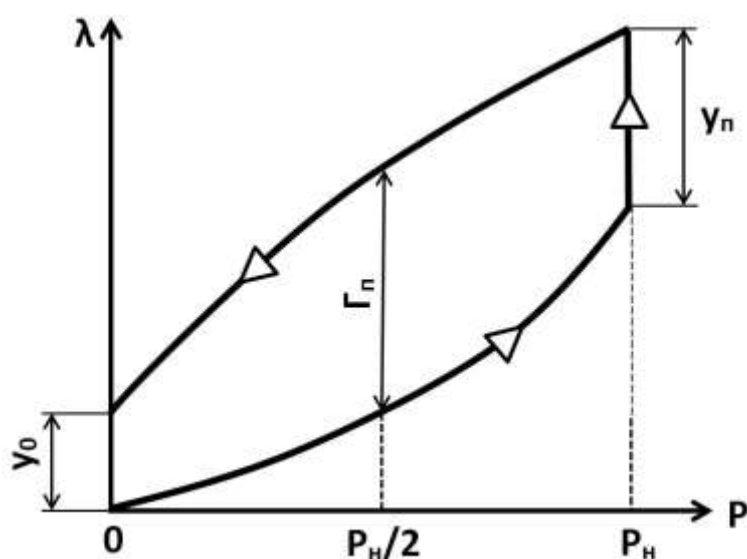
Возникновение ползучести при напряжениях, меньших предела упругости, связано с неоднородностью структуры материала и появлением в его микрообъемах остаточных напряжений при изготовлении. Поэтому при подаче давления напряжения в отдельных местах конструкции могут превзойти предел ползучести и даже упругости материала (хотя среднее значение напряжений остается меньшим предела ползучести/упругости), в результате чего в этих местах могут возникнуть пластические деформации.

Отсутствие гистерезисов второго и последующего нагружений при фиксированной температуре можно связать с возникающим микроупрочнением в процессе ползучести,

что согласуется с известными данными [6, 7, 9, 10]. Возникновение же ГПН после смены температур объясняется термическим возвратом части дислокаций, а также появлением новых дислокаций, связанных с термическими напряжениями в процессе изменения температуры.

Наблюдаемое явление ГПН качественно хорошо согласуется с теорией упругости твердых тел. Все технические расчеты на упругую деформацию материалов основываются на законе Гука, но при определении точных значений деформаций при приложении нагрузок обнаруживаются отклонения от этого закона, которые объясняются несовершенствами упругости материалов [6].

Явления несовершенной упругости обнаруживаются при нагружении и разгрузке кристаллических тел нагрузками, не превышающими предел упругости материала [6, 8]. К указанным явлениям относятся прямое и обратное упругое последствие, упругий гистерезис, релаксация напряжений и внутреннее трение (рис.6, 7).

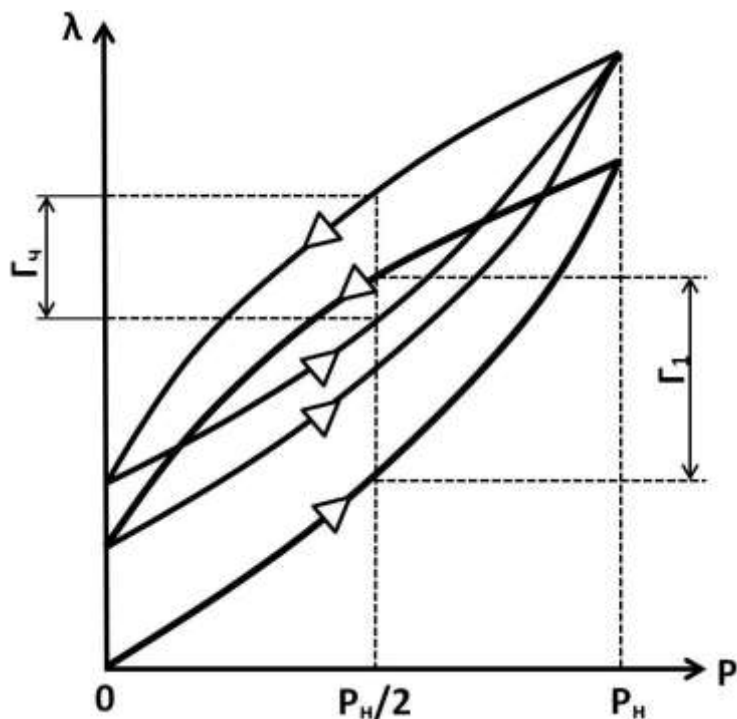


**Рис. 6.** *Несовершенства упругости:  $y_n$  – прямое упругое последствие;  $y_o$  – обратное упругое последствие;  $\Gamma_n$  – гистерезис практический;  $P_n$  – номинальная нагрузка;  $\lambda$  – удлинение [11].*

Как известно из [11, 12], гистерезис первого цикла нагружения и разгрузки упругого тела всегда больше гистерезиса последующих циклов (рис. 7). После нескольких последовательных циклов нагружения и разгрузки устанавливается некоторое постоянное значение гистерезиса, именуемое «чистым гистерезисом», величина которого зависит от физико-механических свойств испытываемого тела и уровня создаваемых в нем



напряжений. Гистерезис первых циклов нагружения тела большей частью связан с так называемым последствием. Это хорошо согласуется с наблюдаемыми явлениями в ТП давления (рис. 3, 4); в случае ТП величины гистерезисов, показанные на рисунках, соответствуют вариации выходного сигнала.

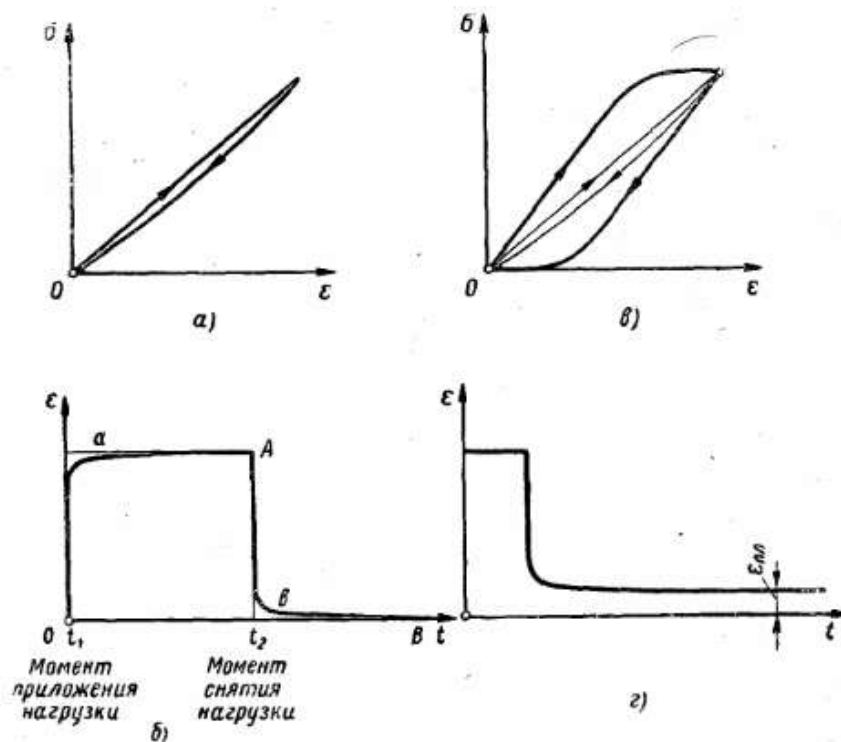


*Рис. 7.  $\Gamma_1$  – гистерезис первого цикла при нагружении и разгрузении;  $\Gamma_{ч}$  – гистерезис  $i$ -го цикла – чистый гистерезис. [11]*

Последствие – частный случай ползучести. Эффекты прямого и обратного упругого последствия могут иметь место при нагружении в пределах упругой области, то есть ниже предела макроскопической упругости.

Упругое последствие свойственно неоднородным по структуре материалам. У монокристаллов его величина очень мала. Исследования [6, 7] показывают, что последствие прямо пропорционально логарифму времени, в течение которого действует нагрузка, и возрастает с ростом напряжений в материале упругого элемента. Именно поэтому для измерительных упругих элементов рекомендуется применять малые рабочие напряжения – порядка до 20% от предела упругости материала [11, 12].

Обратное последствие исчезает медленно после освобождения образца от нагрузки, что особенно проявляется при пониженных температурах (рис.8).



**Рис. 8.** *Несовершенство упругих свойств материала: а – петля гистерезиса; б – изменение деформаций во времени  $t$ ; в – гистерезис и упругое последствие; г – пластическое последствие.  $\sigma$  – напряжение;  $\epsilon$  – деформация. [12]*

У каждого материала можно установить область напряжений и температур, при которых ползучесть практически несущественна. Верхней границей этой области при заданной температуре является характеристика, называемая пределом ползучести.

Применительно к мембранным приборам давления можно провести следующее сопоставление: нагрузка – есть подаваемое на прибор давление; деформация – выходной сигнал, получаемый с чувствительного элемента прибора [9]. Т.е. рис. 8. а), в) можно воспринимать в координатах: давление (ось  $\sigma$ ) – выходной сигнал прибора (ось  $\epsilon$ ). Величина гистерезиса в этом случае соответствует вариации. Из рис. 8 следует, что чем выше сопротивление ползучести материала, тем меньше будет вариация и механический не возврат (гистерезис) ТП, что наглядно демонстрирует изменение ГПН тензопреобразователей с мембранами из сплава 29НК после упрочняющей термообработки (рис 4, в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Продемонстрировано влияние металла упругой мембраны и припоя в преобразователях давления на основе структур КНС на такой параметр как гистерезис первого нагружения.
- Показана связь гистерезиса первого нагружения с сопротивлением ползучести многослойной структуры мембрана – припой – КНС, где, как оказалось, в случае титановых мембран самым «слабым местом» является припой.
- Выявлена возможность повышать сопротивление ползучести данной многослойной структуры, что можно сделать заменой припоя на более жёсткий.

При высоких температурах (более 300<sup>0</sup>С) наблюдается ползучесть самих материалов мембраны, с которой можно бороться посредством упрочняющей термообработки, упрочнением наклепом, использованием керамики. Однако, это является предметом отдельного обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стучебников В.М., Устинов А.А.* Некоторые свойства тензопреобразователей давления на основе структур КНС / Радиоэлектронная техника. Межвузовский сборник научных трудов, 2013, УлГТУ. – С.64-68. [*V.M. Stuchebnikov, A.A. Ustinov.* Some properties of pressure transducers based on SOS structures / Radio electronic technics. Interuniversity digest of scientific works, UIGTU, Ulyanovsk, 2013. – P.64-68. (In Russian)].
2. Прецизионные сплавы. Справочник. Под ред. Б.В. Молотилова. М.: «Металлургия», 1974, 448 с. [Precision alloys. Hand book. Edited by B.V. Molotilov. – Moscow: Metallurgia, 1974, - 448 pp. (In Russian)].
3. <http://stemet.ru/rd.htm> СТЕМЕТ<sup>®</sup> – зарегистрированный товарный знак предприятия МИФИ-АМЕТО [STEMET<sup>®</sup> is a registered trade mark of MIFI-AMETO company].
4. *Савченко Е. Г., Стучебников В. М., Устинов А. А.* Управление характеристиками преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» // Materiały IX Międzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2013» Volume 40. Techniczne nauki. Fizyka.: Przemysł. Nauka I

- studia - Str. 25-29. [E.G. Savchenko, V.M. Stuchebnikov, A.A.Ustinov. Control of characteristics of pressure transducers based on Silicon-on-Sapphire structures. (In Russian)]
5. Савченко Е.Г., Стучебников В.М. Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур "кремний на сапфире" // Сварочное производство, 2013 – №1. – С.23-25. [E.G. Savchenko, V.M. Stuchebnikov. Brazing of sensitive elements for pressure transducers with the "silicon on sapphire" structure. / Welding International. – 2014. – No1. – P.62-64].
  6. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с. [V.S. Zolotarevsky. Mechanical properties of metals: High school textbook. 2d edition/ – Moscow: Metallurgia, 1983. – 352 pp. (in Russian)]
  7. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: Справочник. Екатеринбург: УрО РАН, 1996 [D.A.Gokhfeld, L.B.Gešov, K.M.Kononov et al. Mechanical properties of steels and alloys under nonsteady loading: Handbook. – Ekaterinburg, UrORAN, 1966 (In Russian)].
  8. Физическое материаловедение: Учебник для вузов./Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование/ Е.Г. Григорьев, Ю.А. Перлович, Г.И. Соловьев и др. – М.: МИФИ, 2008. – 696 с. [Materials science: High school textbook/ Edited by B.A.Kalin. – Moscow: MIFI, 2008. / V.4. Strength physics. Radiation physics of solids. Computer simulation. / E.G.Grigorjev, Ju.A.Perlovich, G.I.Solovjev et al. – Moscow: MIFI, 2008. – 696 pp. (In Russian)].
  9. Савченко Е.Г., Стучебников В.М., Устинов А.А. Гистерезисные явления в преобразователях давления на основе структур КНС //Приборы, 2015 – № 2. – С.30-35. [E.G. Savchenko, V.M.Stuchebnikov, A.A.Ustinov. Hysteresis phenomena in pressure transducers based on SOS structures. // Devices. – 2015. – No2. – p.30-35. (In Russian)].
  10. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отделение), 1977. – 248 с. [B.B. Chechulin, S.S. Ushkov, I.N. Rasuvaeva, V.N. Goldfine. Titanium alloys in mechanical engineering. – Leningrad: Mechanical Engineering, 1977. – 248 pp. (In Russian)].
  11. Антонец И.В. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с. [I.V.Antonez. Calculation and simulation of resilient members: Tutorial. – Ulyanovsk: UIGTU, 2013. – 121pp. (In Russian)].
  12. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов М., Машгиз, 1962. – 456 с. [L.E.Andreeva. Resilient members of devices. – Moscow: Mashgis, 1962. – 456 pp. (In Russian)].