

УДК 669.35–539.389.3

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОРОбЛЕНИЯ  
ИЗДЕЛИЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ**

**А. В. ТОЛСТОЙ**, канд. физ.-мат. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

*Предложен метод, позволяющий снизить величину коробления изделий малой жесткости типа мембран анероидных чувствительных элементов. На основании изучения остаточных напряжений в поверхностных слоях мембран, величины их коробления и исследования механических свойств материала выбран температурно-временной интервал старения, обеспечивающий минимальное коробление при сохранении изделием требуемого уровня эксплуатационных свойств.*

**Ключевые слова:** бериллиевая бронза, упругие чувствительные элементы, остаточные напряжения, коробление, старение

**TECHNOLOGICAL METHOD FOR REDUCING WARPING  
OF LOW-RIGIDITY PRODUCTS**

**A.V. TOLSTOJ**, Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences  
Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy  
of Sciences of Belarus

*A method has been proposed to reduce the amount of warping of low-rigidity products such as membranes of aneroid sensitive elements. Based on a study of residual stresses in the surface layers of membranes, the magnitude of their warping and a study of the mechanical properties of the material, a temperature-time aging interval was selected that ensures minimal warping while maintaining the required level of performance properties of the product.*

**Keywords:** beryllium bronze, elastic sensitive elements, residual stresses, warping, aging

**Введение.** Основой многих приборов, применяемых в различных областях современной техники, являются упругие чувствительные элементы (УЧЭ). Они используются в измерительных системах, устройствах контроля и регулирования. Особенно ответственна роль упругих элементов в измерительных приборах, если они применяются в качестве датчиков, воспринимающих измеряемую величину. В этих случаях точность и надежность работы прибора во многом зависит от качества чувствительного упругого элемента. К упругим чувствительным элементам относятся пружины, мембраны, сильфоны, манометрические трубки и др. Эти элементы в основном используются для преобразования давлений, разрежений, усилий, деформаций и моментов в механическое, линейное или угловое перемещение. В авиационных приборах в основном используют датчики мембранного типа. Мембрана представляет собой тонкую круглую пластину, закрепленную по наружному контуру. Под действием разности давлений мембрана прогибается и ее центр получает перемещение, которое через передаточный механизм передается на стрелку или на промежуточный элемент прибора. При этом наибольшее распространение получили гофрированные мембраны. Гофры представляют собой кольцевые волны на поверхности мембраны. Профиль их может быть различным и определяется требуемой зависимостью между ходом мембраны и давлением. Вид профиля, форма и размер упругого элемента, а также толщина материала, из которого он будет изготовлен, выбираются на стадии проектирования упругого элемента [1–6]. В авиационной технике наибольшее распространение получили анероидные чувствительные элементы (АЧЭ), представляющие собой закрытую манометрическую коробку, из внутренней полости которой выкачан воздух, т. е. давление внутри коробки почти отсутствует. Датчики этого типа применяются в высотомерах, самописцах высоты, датчиках высоты и других приборах. Технология изготовления упругих элементов типа мембран предусматривает ряд операций, включающих формирование самого элемента (обычно это штамповка) и термическую (термомеханическую) обработку материала, из которого он изготовлен. Методам получения упругих чувствительных элементов посвящен ряд патентов, в частности [7]. Достаточно подробный аналитический обзор патентов, посвященных этой теме, приведен в работах [8, 9]. При этом предполагается, что упругие элементы по-

сле всех технологических операций их изготовления будут иметь «идеальную» форму, заданную в конструкторской документации.

Большинство анероидных чувствительных элементов ответственного назначения изготавливается из сплавов медь-бериллий или, как их называют иначе, бериллиевых бронз. Бериллиевые бронзы представляют собой типичные дисперсионно-твердеющие сплавы, высокие прочностные свойства которых достигаются в процессе их термической обработки [10–13]. В классической схеме термообработка бериллиевых бронз включает в себя закалку и последующее старение. Кроме этого, применяют термомеханическую обработку, в которой закаленный материал перед старением подвергается холодной пластической деформации (прокатке) со степенями обжатия от 11 до 37 %. Старение является одной из важнейших операций, в процессе которой, собственно, и формируются прочностные и упругие свойства бериллиевых бронз. От правильности ее выполнения (точнее, от грамотного выбора соотношения температура – продолжительность выдержки и точности реализации выбранного режима старения) зависит уровень прочностных и упругих характеристик материала. Именно структура материала, сформировавшаяся в процессе его старения, обуславливает основные служебные свойства упругих элементов, стабильность их рабочих характеристик и, как следствие этого, надежность и долговечность изделий в целом.

Важной технологической характеристикой изделий из стареющих сплавов, в частности бериллиевых бронз, является величина их коробления (деформации). Наиболее предрасположены к короблению изделия особо малой жесткости, например такие, как мембраны большого диаметра и малой толщины. В то же время к геометрической форме этих изделий предъявляются очень высокие требования. Известно, что причиной коробления изделий являются внутренние напряжения, обусловленные значительными объемными изменениями, которые развиваются по сечению детали неоднородно. Для уменьшения величины коробления на всех приборостроительных предприятиях старение изделий из бериллиевой бронзы проводят в специальных оправках (зажимах) т. е. в так называемом «заневоленном» состоянии. Однако после такой термообработки геометрическая форма далеко не всех мембран соответствует строгим допускам.

Несмотря на важность проблемы, существует весьма ограниченное число работ, опубликованных в 1980-х годах, в которых предлагаются методы снижения деформаций изделий из бериллиевой бронзы [16, 17]. Следует отметить, что в последующие годы в научной и технической литературе отсутствуют публикации по данной теме, а также сведения о практическом применении указанных в работах [16, 17] способов. Кроме того, как будет показано ниже, предлагаемые в них рекомендации либо не приводят к желаемому результату, либо существенно увеличивают трудоемкость и продолжительность термообработки, что нерационально в условиях массового производства.

**Методика эксперимента.** Объектом исследования являлись мембраны анероидных чувствительных элементов, изготовленных из сплава БрБНТ-1,9Мг. Их старение проводили в расплаве солей следующего состава:  $\text{KNO}_3$  – 50 %,  $\text{NaNO}_2$  – 50 %. Температуру в соляной ванне регулировали с помощью прибора БРМ–2000, позволяющего поддерживать заданную температуру с точностью  $\pm 2$  °С. Величину коробления мембран определяли как разность положений точек профиля мембраны до и после старения. При измерении фиксировали положение вершины и впадины каждого гофра в точках, расположенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За меру коробления принималась высота конуса мембраны. Величину остаточных напряжений в поверхностном слое мембран определяли рентгенографически с использованием метода наклонных съемок ( $\sin^2\Psi$  – метод [18]). Для оценки уровня механических свойств материала изучали его твердость, предел упругости и релаксационную стойкость. С этой целью одновременно с мембранами термообработывали образцы из того же материала размером  $100 \times 5 \times 0,3$  мм.

**Результаты и их обсуждение.** *Анализ существующих методов снижения коробления изделий.* Как указывалось выше, основным методом снижения коробления изделий является их старение в оправках. Этот прием хорошо известен и широко применяется в производстве.

В качестве иллюстрации на рисунке 1 приведено схематическое изображение и общий вид оправки, которая применялась в данной работе при старении гофрированных мембран.

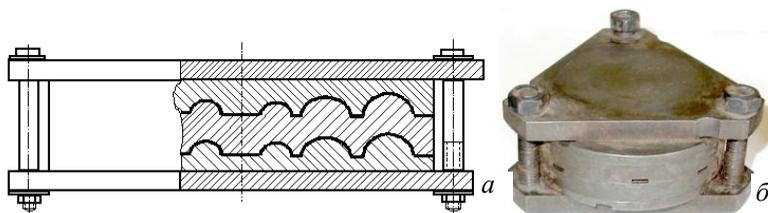


Рисунок 1 – Схематическое изображение (а) и общий вид (б) оправки для старения мембран

Однако, как указывают авторы работы [15], установленный на основании изучения механических свойств сплава БрБНТ-1,9Мг оптимальный режим старения при  $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3\text{ ч}$  не может обеспечить высокой стабильности размеров, а, следовательно, и рабочих характеристик упругих элементов. Это мотивируется тем, что величина остаточных напряжений в поверхностных слоях материала после такой термообработки довольно высока (60 МПа). Ее можно снизить до 50–45 МПа, вдвое увеличив время старения, но при этом произойдет заметное снижение механических свойств сплава.

В качестве другого пути снижения коробления предлагается проведение ступенчатого старения [16]. Этот метод заключается в том, что сначала проводится низкотемпературное старение заготовок (при 100–200 °С), затем осуществляется формовка деталей и последующее их старение по режиму, обеспечивающему максимальное упрочнение сплава. При этом, по мнению авторов, коробление изделий будет меньше. Для проверки этого предложения был выполнен следующий эксперимент. В соответствии с рекомендациями [16] заготовки мембран, зажатые в струбцинах, подвергали старению по двум режимам:  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ ч}$  и  $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ ч}$ . Затем мембраны помещали в оправки и дополнительно старили при 320 °С в течение 3 ч. Результаты измерения геометрии мембран после ступенчатого и обычного старения приведены в таблице 1. Видно, что ступенчатое старение не приводит к сколь-нибудь заметному снижению величины коробления по сравнению с обычной термообработкой.

Одной из разновидностей ступенчатого старения является стабилизирующее старение. Его суть заключается в том, что после стандартного старения ( $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3\text{--}4\text{ ч}$ ) проводят дополнительный

нагрев при температуре  $t = 140\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 6–10 ч. В результате уровень остаточных напряжений снижается. Повторенный нами эксперимент показал, что геометрия мембран после такой комбинированной термообработки лучше, чем после стандартной, однако ее реализация почти втрое увеличивает продолжительность термообработки, что крайне нерационально при массовом производстве.

Таблица 1 – Влияние режимов термической обработки на свойства и величину коробления мембран

Режим старения	$\Delta$ , мкм	HV, МПа	$\sigma_{0,002}$ , МПа
340 °С, 3 ч	725	3800	790
340 °С, 6 ч	660	3100	690
100 °С, 2 ч + 320 °С, 2 ч	710	3600	690
200 °С, 2 ч + 320 °С, 2 ч	720	3600	700
340 °С, 1 ч + 340 °С, 2 ч	680	3800	790
360 °С, 2 ч	280	3700	790
360 °С, 3 ч	270	3650	780
370 °С, 2 ч	265	3640	780

Еще один метод, обеспечивающий по мнению автора получение заданной геометрии изделий, предлагается в работе [17]. Используя свойство аддитивности режима термообработки бериллиевой бронзы, т. е. то обстоятельство, что старение, например, при  $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3\text{ ч}$  адекватно старению при  $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1,5\text{ ч} + t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1,5\text{ ч}$ , предлагается проводить термообработку в два этапа. На первом этапе изделие термообрабатывается некоторое время (например, 1 ч при общей продолжительности 3 ч) в свободном состоянии. Затем изделие охлаждается до комнатной температуры, помещается в оправку и старение продолжается в течение оставшихся 2 ч. В результате изделие должно принять форму, повторяющую форму оправки. Для оценки эффективности этого метода было проведено старение мембран по режиму  $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1\text{ ч} + t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ ч}$ , представляющему собой двухступенчатую имитацию стандартного для данного сплава режима термообработки ( $t = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3\text{ ч}$ ). Прежде всего, отметим, что старение в сво-

бодном состоянии, как и следовало ожидать, привело к сильному короблению мембран. Они оказались изогнутыми, скрученными. Последующее старение в оправках существенно изменило форму мембран. Исчезло их скручивание, мембраны по борту вновь стали плоскими. Однако, как показало измерение их геометрии, форма мембран сильно отличалась от заданной техническими условиями. Кроме того, геометрия всех измеренных мембран оказалась различной. Изменение соотношений продолжительностей выдержки на первом и втором этапах старения (10–45 мин на первом и 1 ч 50 мин – 1 ч 15 мин на втором) также не привели к желаемому результату, т. к. геометрия мембран во всех случаях заметно отличалась от требуемой по ТУ. Причем, после каждой из этих термообработок мембраны имели свою индивидуальную геометрию. Наблюдаемое различие в геометрии мембран может быть объяснено тем, что возникающее на первом этапе старения коробление мембран ввиду многообразия вызывающих его факторов является неуправляемым и полностью не устраняется при последующем старении в оправке.

Таким образом, полученные данные показывают, что данный метод не может быть рекомендован для снижения коробления изделий сложной формы. Возможно, он применим для изделий более простой формы (типа витых и плоских пружин [4]), но для мембран малой жесткости этот метод оказывается неэффективным.

*Разработка технологического режима снижения коробления изделий.* Как следует из сказанного выше, выполненные нами в соответствии с рекомендациями авторов [16, 17] эксперименты не выявили каких-либо преимуществ предлагаемых ими комбинированных приемов термообработки перед обычным старением в оправках. Поэтому дальнейшие исследования по изысканию метода снижения коробления мембран были направлены на определение режима их старения в оправках, обеспечивающего минимальное коробление изделий при сохранении максимально высоких значений механических свойств материала. Известно, что величину коробления изделий можно уменьшить, увеличивая продолжительность старения. Однако это приводит к существенному разупрочнению материала. Существует и другой путь – изменение температуры старения. В этом случае представляется возможным путем соответствующего подбора температуры и продолжительности

сти выдержки не только снизить величину коробления, но и сохранить требуемый уровень основных механических свойств материала.

Одной из причин, вызывающих коробление изделий из бериллиевых бронз, являются остаточные напряжения, возникающие в материале в процессе его термообработки. Однако эта проблема практически не отражена в научной литературе.

Результаты изучения остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в поверхностных слоях мембран приведены на рисунке 2. В закаленном состоянии остаточные напряжения на поверхности мембран оказались сжимающими, равными  $-12$  МПа. После 15 мин выдержки при всех исследованных температурах старения их знак изменился на положительный, т. е. сжимающие напряжения изменились на растягивающие. Дальнейшее старение при температурах 320 и 340 °С приводит к резкому возрастанию  $\sigma_{ост}$ , затем, после достижения пика, они начинают уменьшаться. Причем чем выше температура старения, тем меньше максимальный уровень остаточных напряжений и тем быстрее он достигается.

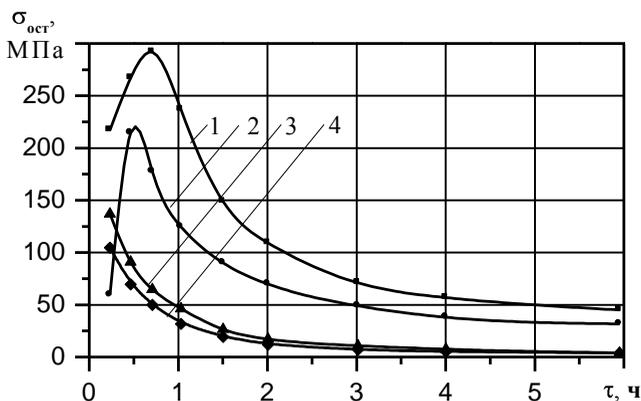


Рисунок 2 – Изменение остаточных напряжений в поверхностных слоях мембран в процессе старения при (°С):  
1 – 320; 2 – 340; 3 – 360; 4 – 370

Так, при  $t = 320$  °С максимальное значение (290 МПа) достигается после 45 мин старения, а при  $t = 340$  °С – после 30 мин выдержки (220 МПа). Наиболее интенсивно остаточные напряжения уменьшаются в интервале выдержки 0,5–2 ч, затем скорость их изменения

резко замедляется. После 3 ч выдержки при  $t = 340$  °С величина остаточных напряжений равна 50 МПа и после 6 ч уменьшается до 30 МПа. Для температур 360 и 370 °С на графике наблюдается только нисходящая часть кривой. По истечении 3 ч старения при  $t = 360$  °С остаточные напряжения в поверхностных слоях мембран уменьшаются до 10 МПа и далее практически не изменяются.

Для изучения влияния температуры старения на величину коробления мембран была проведена их термообработка в интервале температур 320–370 °С. Продолжительность выдержки для каждой из температур составляла 3 ч. Результаты измерения величины коробления мембран в зависимости от температуры старения приведены на рисунке 3.

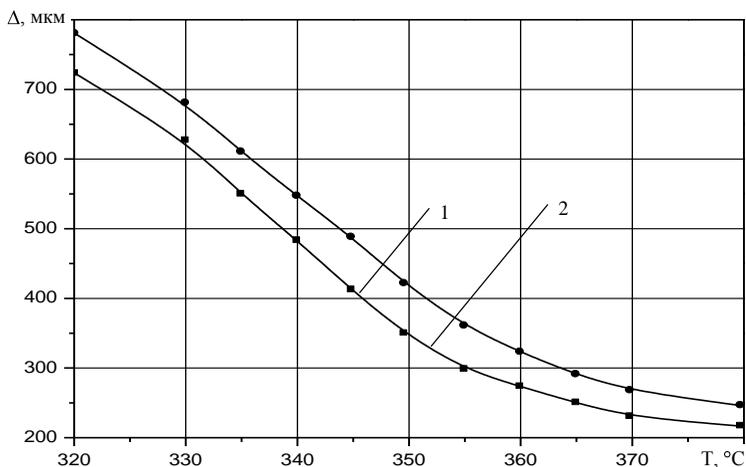


Рисунок 3 – Зависимость величины коробления ( $\Delta$ ) мембран толщиной 0,117–0,120 мкм (1) и 0,135–0,140 мкм (2) от температуры старения. Продолжительность выдержки – 3 ч

Очевидно, что коробление мембран существенно уменьшается с ростом температуры старения. Так, для мембран толщиной 0,136–0,140 мм величина коробления уменьшается от 725 мкм после старения при  $t = 320$  °С, в течение  $\tau = 3$  ч до 230 мкм после обработки при  $t = 370$  °С,  $\tau = 3$  ч. Аналогичная картина наблюдается и для более тонких мембран (0,117–0,120 мм) – коробление уменьша-

ется в том же интервале температур от 780 мкм до 270 мкм. Дальнейшее повышение температуры старения не оказывает заметного влияния на коробление. Оно оказывается практически одинаковым у мембран, состаренных при температурах 360 и 370 °С. Эти данные показывают, что удовлетворительные результаты по величине коробления мембран можно получить, проводя их термообработку при температуре 360–370 °С.

В дальнейшем выполнено исследование механических свойств материала, результаты которых представлены в таблице 1. Видно, что значения твердости и предела упругости материала после старения при температурах 360–370 °С длительностью 2–3 ч близки к тем, которые соответствуют старению по стандартному режиму (при  $t = 340$  °С,  $\tau = 3$  ч).

Кривые релаксации напряжений в сплаве медь–бериллий, состаренном по режимам при  $t = 360$  °С,  $\tau = 3$  ч,  $t = 370$  °С,  $\tau = 2$  ч и  $t = 340$  °С,  $\tau = 3$  ч, приведены на рисунке 4. Видно, что после старения при температурах 360–370 °С для всех исследованных уровней начального напряжения релаксационная стойкость сплава не хуже, чем после стандартной термообработки (340 °С, 3 ч).

Таким образом, после старения при температурах 360–370 °С продолжительностью 3 ч изделия имеют минимальное коробление и уровень остаточных напряжений. При этом основные механические свойства материала близки к тем, которыми он обладает после стандартной термообработки. Следовательно, с целью минимизации величины коробления изделий малой жесткости, изготовленных из бериллиевой бронзы, можно рекомендовать проводить их термообработку в стандартных оправках по режиму 360 °С, 3 ч или 370 °С, 2 ч.

**Заключение.** Предложен метод снижения коробления изделий малой жесткости, заключающийся в том, что старение мембран, помещенных в специальные оправки, проводят при повышенных температурах (360–370 °С). На основании изучения механических свойств сплава медь–бериллий, величины остаточных напряжений и коробления мембран, изготовленных из этого материала, установлено, что старение изделий малой жесткости (типа мембран большого диаметра и малой толщины) при 360–370 °С длительностью

2–3 ч обеспечивает минимальное их коробление при сохранении изделием требуемого уровня эксплуатационных свойств.

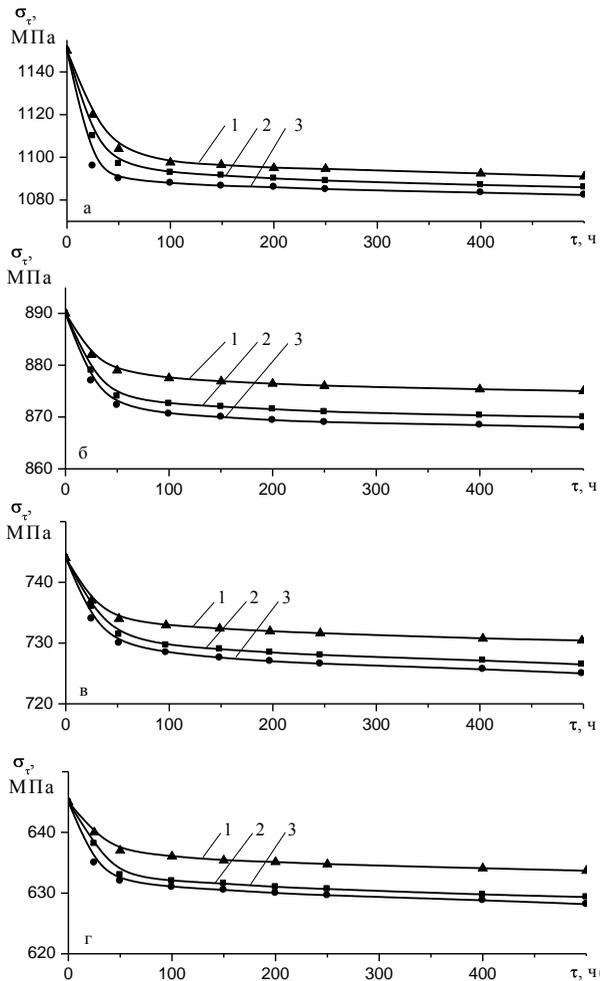


Рисунок 4 – Релаксация напряжений в сплаве БрБНТ–1,9Мг при комнатной температуре и уровнях начального напряжения (МПа)

1150 (а), 890 (б), 744 (в), 645 (г), состаренном по режимам:

1 –  $t = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3 \text{ ч}$ ; 2 –  $t = 370 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 2 \text{ ч}$ ; 3 –  $t = 340 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3 \text{ ч}$

## Список литературы

1. **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – М.: Металлургия, 1981. – 456 с.

2. **Пономарев, С. Д.** Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.

3. **Андреев, А. И.** Разработка методики в области проектирования мембранных датчиков давления / А. И. Андреев, А. В. Жуков, А. С. Яковичин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 28–34.

4. **Андреев, А. И.** Повышение надежности датчика давления на основе выбора оптимальной формы чувствительного элемента / А. И. Андреев, И. Н. Янкин // Научные исследования и разработки последнего десятилетия: взаимодействие прошлого и современного: Материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25 ноября 2019 г. Ростов-на-Дону: Южный университет, 2019. – С. 74–76.

5. **Основные** принципы конструирования и расчёта компенсирующих полужестких мембранных металлических муфт / С. А. Граков [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета – 2019. – Т. 1, № 4 (40). – С. 37–45.

6. **Проектирование** мембранных чувствительных элементов круглой формы / А. И. Андреев [и др.]. // Universum: технические науки. – 2022. – № 11(104).

7. **Способ** изготовления мембраны для термочувствительных элементов: Патент РФ RU 2 292 532С1 / Босов Б. П., Полькин В. С., Фигуровский Д. К. Оpubл.: 2007.01.27.

8. **Исследование** методов обработки тонкостенных деталей из цветных материалов методом холодного выдавливания на основе анализа патентных источников. Часть 1 / А. В. Платонов [и др.] // Новый взгляд: междунар. научный вестник. – 2017. – Вып. 16. – С. 56–66.

9. **Исследование** методов обработки тонкостенных деталей из цветных материалов методом холодного выдавливания на основе анализа патентных источников. Часть 2. / А. В. Платонов [и др.] //

Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 3. – С. 20–27.

**10. Влияние** старения на микротвердость и электропроводность сплава Cu–2 вес. % Be / Л. И. Зайнуллина [и др.] // *Frontier Materials & Technologies*. – 2022. – С. 69–75.

**11. Толстой, А. В.** Влияние технологических методов термической обработки мембран на свойства анероидных чувствительных элементов / А. В. Толстой // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 126–132.

**12. Толстой, А. В.** Закономерности упрочнения сплава медь-бериллий / А. В. Толстой // *Весті НАН Беларусі, сер. фіз.-тех. наук*. – 2000. – № 4. – С. 8–13.

**13. Толстой, А. В.** Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства сплава медь-бериллий. II. Субмикроскопическая структура и свойства деформированных бериллиевых бронз / А. В. Толстой // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2006. – Т. 11, № 1. – С. 18–24.

**14. Ступенчатое** старение медно-бериллиевых сплавов / Ж. П. Пастухова [и др.] // *Металлы*. – 1977. – № 5. – С. 155–162.

**15. Пастухова, Ж. П.** Пружинные сплавы меди / Ж. П. Пастухова, А. Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.

**16. Способ** циклического старения бериллиевой бронзы: Авторское свид-во SU 1 412 356 A1 / Еремин А. И. [и др.]. Оpubл. 2005.07.10.

**17. Комяк, Н. И.** Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Г. Мясников. – М.: Машиностроение, 1972. – 88 с.

**18. Толстой, А. В.** Сопротивление сплава медь-бериллий микропластической деформации / А. В. Толстой // *Весті НАН Беларусі, сер. фіз.-тех. наук*. – 2001. – № 4. – С. 13–17.

## References

**1. Andreeva, L. N.** *Uprugie element priborov* [Elastic elements of devices] / L. A. Andreeva. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. – 456 p.

**2. Ponomarev, S. D.** *Pascet uprugih elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and devices] //

S. D. Ponomarev, L. N. Andreeva. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. – 376 p.

**3. Andreev, A. I.** *Razrabotka metodiki v oblasti proektirovaniya membrannyh datchikov davleniya* [Development of a methodology in the field of designing membrane pressure sensors] / A. I. Andreev, A. V. ZHukov. A. S. YAkovichin // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science.* – 2022. – Vol. 24, No.1. – P. 28–34.

**4. Andreev, A. I.** *Povyshenie nadezhnosti datchika davleniya na osnove vybora optimal'noj formy chuvstvitel'nogo elementa* [Increasing the reliability of a pressure sensor based on choosing the optimal shape of the sensing element] / A. I. Andreev, I. N. YAnkin // Research and development of the last ten years: interaction between the past and the modern: Materialy XXII Vseros. nauch.-pract. konf. Rostov-na-Dony, 25 November 2019. – P. 74–76.

**5. Osnovnye princip konstruirovaniya i rascheta kompensiruyushchih poluzhestkih membrannyh metallicheskih muft** [Basic principles of design and calculation of compensating semi-rigid membrane metal couplings] / S. A. Grakov [et al.] // *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University.* – 2019. – Vol. 1, No. 4 (40). – P. 37–45.

**6. Proektirovanie membrannyh chuvstvitel'nyh elementov krugloj formy** [Design of circular membrane sensing elements] / A. I. Andreev [et al.] // *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: technical sciences.* – 2022. – No. 11 (104).

**7. Sposob izgotovleniya membrany dlya termochuvstvitel'nyh elementov** [Method for manufacturing a membrane for temperature sensitive elements] / Bosov V. P., Pol'kin V.S., Figurovskij D. K.: Patent RF RU 2 292 532C1. Publ. 2007.01.27.

**8. Issledovanie metodov obrabotki tonkostennyh detalej iz cvetnyh materialov metodom holodnogo vydavlivaniya na osnove analiza patentnyh istochnikov. CHast' I** [Study of methods for processing thin-walled parts made of non-ferrous materials using the cold extrusion method based on an analysis of patent sources. Part 1] / A. V. Platonov [et al.] //

*Novyj vzglyad: mezhdunarodnyj nauchnyj vestnik = New look: international scientific bulletin.* – 2017. – Vyp. 16. – P. 56–66.

**9. Issledovanie metodov obrabotki tonkostennykh detalej iz cvetnykh materialov metodom holodnogo vydavlivaniya na osnove analiza patentnykh istochnikov.** *CHast' 2* [Study of methods for processing thin-walled parts made of non-ferrous materials using the cold extrusion method based on an analysis of patent sources. Part 2] / A. V. Platonov [et al.] // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research.* – 2017. – No. 3. – P. 20–27.

**10. Vliyanie stareniya na mikrotverdest' i elektroprovodnost' splava Cu -2 ves.% Be** [Effect of aging on microhardness and electrical conductivity of Cu-2 wt.% Be alloy] / L. I. Zajnullina [et al.] // *Frontier Materials & Technologies.* – 2022. – P. 69–75.

**11. Tolstoj, A. V.** *Vliyanie tekhnologicheskikh metodov termicheskoy obrabotki membran na svoystva aneroidnykh chuvstvitel'nyh elementov* [The influence of technological methods of thermal treatment of membranes on the properties of aneroid sensitive elements] / A. V. Tolstoj // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2019. – No. 3. – P. 126–132.

**12. Tolstoj, A. V.** *Zakonomernosti uprochneniya splava med'-berillij* [Patterns of hardening of copper-beryllium alloy] / A. V. Tolstoj // *Vesci National'noj akademii nauk Belarusi, seriya fis.-techn. Nauk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical and Technical Sciences Series.* – 2000. – No. 4. – P. 8–13.

**13. Tolstoj, A. V.** *Vliyanie holodnoj plasticheskoy deformacii na strukturu i svoystva splava med'-berillij* [The influence of cold plastic deformation on the structure and properties of a copper-beryllium alloy] / A. V. Tolstoj // *Materials, .tehnologii, instrument = Materials, technologies, tools.* – 2006. Vol.11, No. 1. – P. 18–24.

**14. Stupenchatoe starenie medko-berillievyyh splavov** [Stepped aging of copper-beryllium alloys] / ZH. P. Pastuhova [et al.] // *Metally = Metals.* – 1977. – No. 5. – P. 155–162.

**15. Pastuhova, ZH. P.** *Pruzhinnye splavy medi* [Spring alloys of copper] / ZH. P. Pastuhova, A. G. Rahshtadt. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. – 496 p.

**16. Sposob ciklicheskogo stareniya berillievoj bronzy** [ Method of cyclic aging of beryllium bronze] / Eremin A. I. [et al.]. Copyright certificate SU 1 412 356 A1. Publ. 2005.07.10.

**17. Komyak, N. I. Rentgenovskie metody i apparatura dlya opredeleniya napryazhenij** [X-ray methods and equipment for determining stresses] / N. I. Komyak, YU. G. Myasnikov. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. – 88 p.

**18. Tolstoj, A. V. Soprotivlenie splava m ed'-berillij mikroplasticheskoj deformacii** [Resistance of copper-beryllium alloy to microplastic deformation] / A. V. Tolstoj // *Vesci National'noj akademii nauk Belarusi, seriya fis.-techn. Nauk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical and Technical Sciences Series.* – 2001. – No. 4. – P. 13–17.

*Поступила 10.10.2024*

*Received 10.10.2024*