

УДК 669.35-157:539.26

А.В. ТОЛСТОЙ, канд. физ.-мат. наук, доц.

заместитель заведующего лабораторией металлургии в машиностроении НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»

E-mail: tolstoy@oim.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05.02.2024.

ВЛИЯНИЕ СУБМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВА «МЕДЬ — БЕРИЛЛИЙ» НА СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследована зависимость свойств упругих чувствительных элементов, изготовленных из бериллиевой бронзы, от режимов их термической обработки. Показано, что продолжительность старения существенно влияет на величину нелинейности упругой характеристики, гистерезиса, усадки элементов и механические свойства материала мембран (твердость, предел упругости). Установлены связи между субмикроскопической структурой и свойствами упругих элементов. Наибольшую нелинейность упругой характеристики, величин гистерезиса и усадки имеют элементы, подвергнутые кратковременному старению при 310–350 °С. С увеличением продолжительности выдержки при старении соответствующие значения указанных параметров уменьшаются. Для температур старения 310–320 °С нелинейность характеристик упругости достигает минимальных значений после 4–5 ч выдержки, а для 340 °С — после 3 ч. При 350 °С минимальные значения нелинейности достигаются после старения продолжительностью 45–60 мин. Из полученных данных следует, что с точки зрения достижения минимального гистерезиса и нелинейности характеристики анероидных чувствительных элементов, изготовленных из бронзы марки БрБНТ-1,9Мг, термообработку мембран следует проводить по режимам 1 ч при 350 °С или 3 ч при 340 °С.

Ключевые слова: бериллиевая бронза, упругие чувствительные элементы, нелинейность, гистерезис, усадка, старение

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-79-87>

Введение. Основой многих приборов, применяемых в различных областях современной техники, являются упругие чувствительные элементы (УЧЭ). Они применяются в измерительных системах, устройствах контроля и регулирования. Особенно ответственна роль упругих элементов в измерительных приборах, если они применяются в качестве датчиков, воспринимающих измеряемую величину [1]. В этих случаях точность и надежность работы прибора во многом зависят от качества упругого чувствительного элемента. Современное состояние приборостроительной техники позволяет осуществлять преобразование измеряемой величины с весьма высокой степенью точности [2–4]. Но если измеряемая величина воспринимается УЧЭ низкого качества, то, как бы ни была высока точность дальнейших преобразований, погрешность упругого элемента будет ограничивать точность прибора в целом. Поэтому основным критерием, определяющим качество упругого элемента, является та точность, с которой производится преобразование измеряемого параметра в перемещение или усилие, а также ста-

бильность свойств УЧЭ во времени. В частности, при одном и том же значении измеряемого параметра показания прибора будут различаться, если упругие свойства УЧЭ изменяются с течением времени. В свою очередь точность УЧЭ зависит от его упругой характеристики, под которой подразумевается зависимость между перемещением определенной точки упругого элемента и величиной нагрузки. Эта характеристика закладывается на стадии проектирования упругого элемента. В зависимости от требуемых параметров выбирается форма и размер упругого элемента, а также толщина материала, из которого он будет изготовлен [5–8]. В частности, для гофрированной мембраны уравнение, описывающее ее характеристику, имеет вид:

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = a \frac{\omega_0}{h} + b \frac{\omega_0^3}{h^3},$$

где ω_0 — прогиб центра мембраны; p — давление; E — модуль упругости; h — толщина материала мембраны; R — рабочий радиус. В этом уравнении коэффициенты a и b вычисляются по формулам:

$$a = \frac{2(3 + \alpha)(1 + \alpha)}{2k_1 \left(1 - \frac{\mu^2}{\alpha^2}\right)}; b = \frac{32k_1}{\alpha^2 - 9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3 - \mu}{(\alpha - \mu)(\alpha + 3)} \right],$$

где μ — коэффициент Пуассона; α — безразмерный параметр, связанный с геометрическими коэффициентами мембраны. Значения модуля нормальной упругости E и коэффициента Пуассона μ берутся из справочных материалов или ГОСТ 1789-2013 [5]. При этом априори предполагается, что модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, из которого изготовлен упругий элемент, будут иметь именно такие значения. Однако их величины зависят от режима термообработки материала. В связи с этим в патенте [7] было предложено при расчетах упругих элементов манипулировать не размерами элементов, а конкретными значениями E и μ , достигаемыми определенным режимом термообработки.

Таким образом, принимается, что рабочие характеристики упругого элемента будут определяться только E и μ , величины которых определяются составом бронзы и выбранным режимом термообработки и в процессе работы элемента не меняются. Вместе с тем в процессе эксплуатации упругих чувствительных элементов на точность их показаний существенное влияние оказывает ряд других факторов. Одним из источников погрешности УЧЭ является несовершенство упругих свойств материала, из которого он изготовлен. Это несовершенство проявляется в нелинейности характеристики УЧЭ, появлении гистерезиса, упругом и пластическом последствии. Нелинейность характеристики УЧЭ выражается в отклонении от линейной зависимости между нагрузкой и перемещением. Гистерезис упругого элемента проявляется в несовпадении величин перемещений при прямом и обратном ходе упругого элемента. Явление гистерезиса не имеет существенного значения для работы большинства деталей, но для упругих чувствительных элементов величина гистерезиса является одной из важнейших характеристик, поскольку она целиком входит в погрешность прибора. Следует отметить, что для упругих элементов имеет значение не абсолютная величина площади петли гистерезиса, а величина относительного гистерезиса γ , которая определяется отношением наибольшей ширины петли гистерезиса к наибольшей деформации упругого элемента при данном цикле нагружения [8].

Разность между перемещениями при прямом и обратном ходе зависит также от величины последствия, которое проявляется в изменении деформации во времени при постоянной нагрузке. Являясь причиной отставания по фазе величин деформаций от величин напряжений при нагружении и разгрузке упругого элемента, последствие, складываясь с гистерезисом, увеличивает

разницу в показаниях прибора при прямом и обратном ходе. Если после снятия нагрузки деформации по истечении некоторого времени исчезают полностью, то такое последствие называется упругим. Вследствие упругого последствия стрелка прибора после сброса нагрузки не сразу возвращается на нулевую отметку, т. е. требуется некоторое время, прежде чем прибор покажет истинное значение измеряемой величины. Упругое последствие, складываясь с «чистым» гистерезисом, дает увеличение петли гистерезиса. Так как обычно имеет место одновременное проявление «чистого» гистерезиса и упругого последствия, то на практике, как правило, их не разделяют, а результат их совместного действия называют практическим гистерезисом или простом гистерезисом.

Стабильность рабочих свойств упругого элемента во времени может быть нарушена из-за пластического течения материала, которое проявляется в форме пластического последствия. В отличие от упругого, при пластическом последствии некоторая часть деформации в детали сохраняется при полной ее разгрузке по истечении любого отрезка времени. В результате пластического последствия размеры упругого элемента могут измениться, что приведет к искажению показаний прибора.

Для уменьшения этих погрешностей все УЧЭ подвергаются специальной технологической операции — стабилизации (или «заневоливаниею» [9]), которая заключается в многократном нагружении упругого чувствительного элемента или его выдержке в нагруженном состоянии в течение достаточно длительного времени. Отметим, что если путем стабилизации можно уменьшить непостоянство упругих свойств во времени, то снизить величины гистерезиса и упругого последствия значительно сложнее.

Упругие характеристики УЧЭ зависят от свойств материала, которые он приобретает в процессе термообработки, т. е. эти характеристики относятся к разряду структурно зависимых. Одними из наиболее распространенных сплавов, применяемых для изготовления упругих элементов ответственного назначения, являются бериллиевые бронзы. Это объясняется тем, что наряду с высокими значениями предела упругости и релаксационной стойкости сплавы «медь — бериллий» обладают высокой коррозионной стойкостью и ценными технологическими свойствами, такими как хорошая штампуемость, свариваемость.

В работах [10–15] были проведены исследования субмикроскопической структуры и основных свойств (твердость, сопротивление разрыву, предел упругости, релаксационная стойкость) медно-бериллиевых сплавов, на основании которых установлены взаимосвязи между субмикроскопической структурой и свойствами материала.

Целью настоящей работы является изучение влияния параметров субмикроскопической структуры на основные служебные характеристики упругих элементов (нелинейность, гистерезис, величину усадки).

Методика эксперимента. Объектом исследования служили УЧЭ анероидного типа АЧЭ-286, разработанные МПКБ «Восход». Общий вид и схематическое изображение элемента приведены на рисунке 1.

Старение отштампованных на предприятии мембран из сплава БрБНТ-1,9Мг осуществляли в лабораторных условиях в соляной ванне состава 50 % KNO_2 + 50 % NaNO_3 при температурах 310–350 °С. Из термообработанных мембран изготавливали анероидные чувствительные элементы (АЧЭ) по действующей на предприятии технологии. При старении мембраны помещали в специальные оправки с целью минимизации их коробления.

Определяли величину нелинейности рабочей характеристики, гистерезиса, холостого хода и усадки элементов при статическом и динамическом нагружениях. За величину нелинейности характеристики обычно принимают отношение максимального отклонения действительной характеристики к величине наибольшего перемещения упругого элемента, выраженное в процентах. Это отклонение определяют как разность между действительным перемещением и перемещением,

соответствующим линейной характеристике. В данной работе за величину нелинейности δ_8 (%) принимали значение нелинейности характеристики на высоте 8 км в диапазоне высот от 0 до 15,24 км. Расчеты проводили по формуле

$$\delta_8 = \frac{\Delta W_8}{W_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где ΔW_8 — разность между действительным перемещением на высоте 8 км и его расчетным (линейным по высоте) значением; ΔW_{\max} — перемещение на высоте 15,24 км.

Исследование величины холостого хода мембран от давления, отвечающего изменению высоты от 20 до 0 км, выполняли в соответствии с инструкцией предприятия-изготовителя. Согласно требованиям ТУ предприятия к исследованным элементам нелинейность их рабочей характеристики должна составлять 1,5–2,5 %, а величина холостого хода — находиться в пределах 800–1050 мкм.

Величину гистерезиса γ определяли как наибольшую разность Γ между перемещениями при одинаковой нагрузке при прямом и обратном ходе, отнесенную к наибольшему перемещению (λ_{\max}) упругого элемента:

$$\gamma = \frac{\Gamma}{\lambda_{\max}} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Величину усадки элементов при статическом и динамическом нагружениях определяли по разности значений высоты мембран до и после нагружения. Измерения проводили по вершинам и впадинам гофров в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием одного и того же инструмента. При статическом нагружении элементы выдерживали под нагрузкой $Q = 147$ Н. Динамическое нагружение было проведено на стендах и по методикам, разработанным отделом надежности предприятия-изготовителя.

Результаты и их обсуждение. Обычно при проектировании упругого элемента стремятся к тому, чтобы его характеристика по измеряемому параметру была линейной, т. к. в этом случае можно получить линейную шкалу прибора при простой конструкции передаточно-множительного механизма. Однако в силу указанных выше причин реальные УЧЭ всегда имеют отклонения от линейной зависимости между нагрузкой и перемещением. Характер зависимости величины δ_8 анероидного чувствительного элемента АЧЭ-286 от режимов старения составляющих его мембран представлен на рисунке 2.

Полученные данные показывают, что температура и продолжительность выдержки при старении оказывают существенное влияние на величину нелинейности характеристики элемента. При температуре старения 310 °С величина δ_8 уменьшается с 4,6 % (после выдержки 10 мин) до 2,6 % (после 2 ч старения). Далее уменьшение δ_8

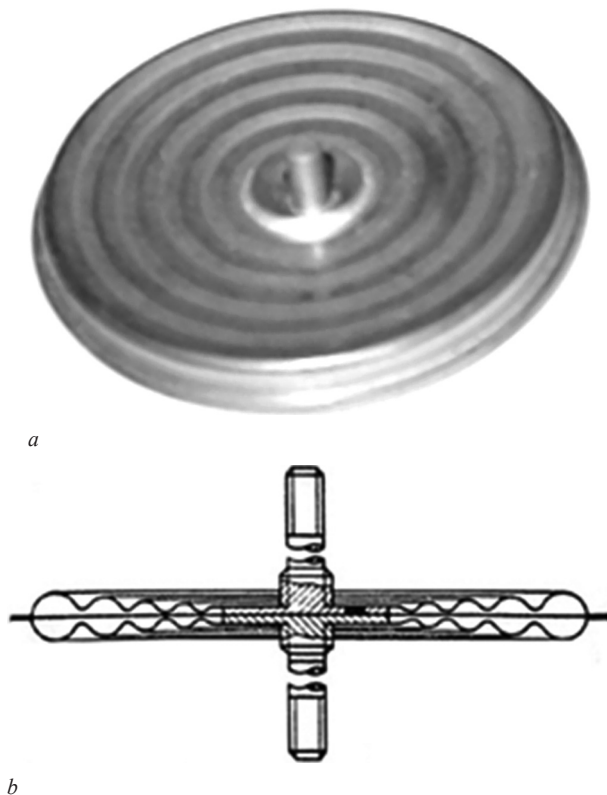


Рисунок 1 — Внешний вид (a) и схематическое изображение (b) конструкции АЧЭ-286

Figure 1 — Appearance (a) and schematic representation (b) of aneroid sensing elements АЧЭ-286 (АChE-286) structure

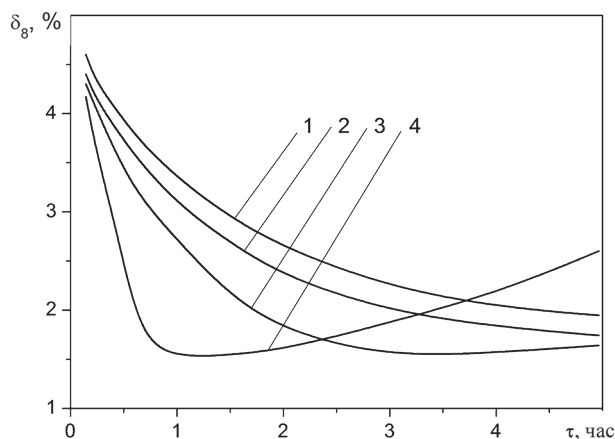


Рисунок 2 — Зависимость величины нелинейности δ_8 АЧЭ от продолжительности выдержки при температурах старения, °С: 1 — 310; 2 — 320; 3 — 340; 4 — 350

Figure 2 — Dependence of aneroid sensing elements nonlinearity value δ_8 on aging duration at aging temperatures, °С: 1 — 310; 2 — 320; 3 — 340; 4 — 350

идет заметно медленнее и к 5 ч выдержки ее величина достигает 1,9 %. Подобный вид имеет и кривая изменения величины δ_8 для температуры старения 320 °С.

При 340 °С в начальный период старения δ_8 уменьшается заметно быстрее, достигая минимального значения, равного 1,5 % после 3 ч старения. Затем некоторое время величина δ_8 сохраняет значение, близкое к минимальному, после чего начинает увеличиваться. Аналогичный ход кривой изменения величины нелинейности характеристики наблюдается и при температуре старения 350 °С.

Вначале δ_8 интенсивно уменьшается, достигая минимальной величины 1,5 % после 1 ч старения, после чего начинает вновь возрастать. При этом прослеживается вполне определенная тенденция: чем выше температура старения, тем быстрее величина δ_8 достигает минимального значения и тем раньше и интенсивнее происходит последующее ее увеличение. Так, при 350 °С δ_8 достигает минимума после 1 ч выдержки, а ее заметное увеличение наблюдается уже после 2 ч старения, в то время как для температур старения 310 и 320 °С увеличение δ_8 начинает наблюдаться лишь после выдержек свыше 15 и 10 ч соответственно.

Другой характеристикой, во многом определяющей точность работы прибора, является величина гистерезиса чувствительного элемента. На рисунке 3 представлены результаты исследования влияния продолжительности выдержки при температурах старения 310–350 °С на величину гистерезиса АЧЭ.

Из сопоставления полученных данных с кривыми, приведенными на рисунке 1, видно, что ход изменения величин нелинейности и гистерезиса мембран практически идентичен. Величина γ в начальный период старения при всех исследованных температурах также убывает, затем (для температур старения 340–350 °С) после достижения мини-

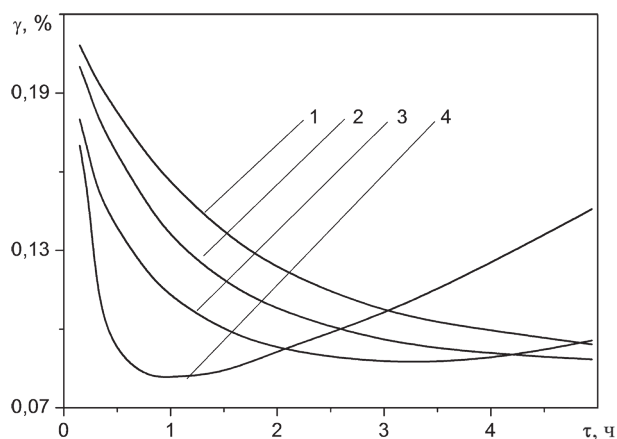


Рисунок 3 — Зависимость величины гистерезиса γ АЧЭ от продолжительности выдержки при температурах старения, °С: 1 — 310; 2 — 320; 3 — 340; 4 — 350

Figure 3 — Dependence of aneroid sensing elements hysteresis value γ on aging duration at aging temperatures, °С: 1 — 310; 2 — 320; 3 — 340; 4 — 350

мум (0,08 %) начинает увеличиваться. При этом соответствующие изменения в ходе кривых нелинейности и гистерезиса происходят на одних и тех же стадиях старения, т. е. различие заключается лишь в абсолютных значениях величин δ_8 и γ .

Как указывалось выше, стабильность рабочих свойств упругого элемента во времени может быть нарушена вследствие пластического течения материала, которое возникает при нормальной температуре и сравнительно небольших напряжениях (меньше предела упругости). Возникновение пластического течения при напряжениях, меньше предела упругости, связано как с неоднородностью структуры материала, так и с появлением в его микрообъемах остаточных напряжений при изготовлении. Поэтому при нагружении детали напряжения в отдельных местах могут превзойти предел упругости сплава (хотя среднее значение напряжений остается меньше предела упругости), в результате чего в этих местах могут возникнуть пластические деформации. Пластическое течение материала во времени проявляется в форме пластического последствия и релаксации.

Релаксация напряжений представляет собой по существу ползучесть в области малых остаточных деформаций. Основные факторы, определяющие скорость релаксации, это движение и генерация дислокаций [16–17]. При напряжении ниже предела упругости релаксация быстро затухает практически до нуля. Это происходит за счет истощения легкоподвижных дислокаций, которые либо блокируются, либо выходят на поверхность. При напряжениях выше предела упругости (но ниже предела текучести материала) величина релаксации напряжений постепенно уменьшается, но не до нуля, поскольку на этой стадии появляются новые дислокации в результате процессов генерации. Наконец, при напряжениях выше предела текучести релаксация напряжений также посте-

ленно уменьшается [16]. Тот факт, что в процессе релаксации происходит постепенное замедление скорости накопления остаточной деформации, используется в технологических процессах для стабилизации характеристик упругих чувствительных элементов.

Результаты изучения усадки элементов после статического нагружения («заневоливания») показали, что между величиной усадки и режимами термообработки также прослеживается четкая взаимосвязь (рисунок 4).

Наибольшую усадку имели элементы, прошедшие кратковременное старение при всех исследованных температурах. С увеличением продолжительности выдержки величина усадки элементов уменьшается. Причем наиболее интенсивно это изменение происходит на начальных этапах старения. Так, при температуре старения 320 °С величина усадки уменьшается с 13,7 мкм (для элементов, состаренных в течение 10 мин) до 7,2 мкм после 30 мин старения. Затем, при более длительных выдержках, изменение величины усадки происходит менее интенсивно и после 5 ч старения величина усадки составляет 4,2 мкм. Аналогичным образом выглядит зависимость величины усадки элементов от продолжительности выдержки при 340 °С с той лишь разницей, что на начальных этапах старения это изменение происходит более интенсивно. Элементы, состаренные в течение 3 ч, имели наименьшую величину усадки, равную 3,9 мкм. Увеличение продолжительности старения до 5 ч практически не сказывается на величине усадки элементов, и она остается на уровне 3,9–4,1 мкм. При температуре старения 350 °С наибольшую усадку также имели элементы, прошедшие кратковременное старение (11,8 мкм после 10 мин выдержки). У элементов, состаренных в течение 1 ч, усадка оказалась минимальной (2,6 мкм), затем, с увеличением продолжительности старения, величина усадки элементов начала возрастать.

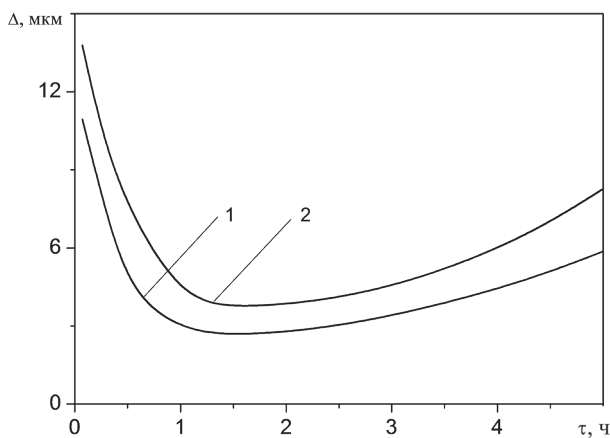


Рисунок 4 — Влияние продолжительности старения при 350 °С на величину усадки элементов при динамическом (1) и статическом (2) нагружениях
Figure 4 — Effect of aging time at 350 °С on shrinkage of elements under dynamic (1) and static (2) loadings

После 5 ч старения при 350 °С величина усадки элементов увеличилась до 5,8 мкм.

Аналогичные результаты были получены и при изучении величины усадки элементов, подвергнутых динамическому (циклическому) нагружению. Зависимость величины суммарной (по завершении цикла нагружений) усадки элементов Δ_s от режима термообработки имеет такой же вид, как и в случае статического нагружения (см. рисунок 3). Различие заключается лишь в абсолютных значениях величины Δ_s . Для одних и тех же режимов старения величина усадки мембран, подвергнутых циклическому нагружению, была несколько выше. В частности, мембраны, состаренные в течение 10 мин при 350 °С, имели усадку 13,7 мкм, а после 1 ч выдержки — 3,8 мкм. Более длительные выдержки также приводят к возрастанию величины Δ_s , которая после 5 ч старения имеет значение 7,8 мкм. Следует отметить, что, как показали проведенные измерения, величина усадки мембран зависит от числа циклов нагружения. Наибольшая усадка регистрируется после первого цикла нагружения. Далее величина усадки элементов уменьшается и после 3–5 циклов практически не меняется. Это свидетельствует о том, что после ~5 циклов нагружения нарастание пластических деформаций в материале заканчивается и дальнейшая работа элемента сопровождается только упругими деформациями, т. е. происходит стабилизация упругих свойств элемента.

Обратимся теперь к результатам исследования величины холостого хода мембран, подвергнутых старению по различным режимам. Зависимость величины холостого хода мембран от продолжительности их старения при 350 °С приведена на рисунке 5.

Видно, что время выдержки оказывает существенное влияние на эту характеристику элементов, в особенности на начальных этапах старения. После старения по режиму 10 мин при 350 °С холостой ход мембран составляет 1590 мкм. Увеличение продолжительности выдержки до 30 мин приводит к уменьшению величины холостого

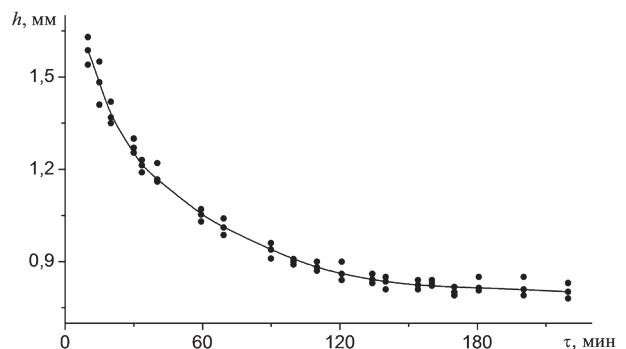


Рисунок 5 — Зависимость величины холостого хода мембран от продолжительности выдержки при температуре старения 350 °С
Figure 5 — Dependence of membrane idle speed value on aging time at aging temperature 350 °С

хода до 1210 мкм. После выдержек в течение 60–75 мин величина холостого хода составляет 1050–930 мкм, т. е. находится в пределах, установленных ГУ предприятия-изготовителя. Дальнейшее увеличение продолжительности старения мало сказывается на величине холостого хода мембран. В интервале времени выдержек 1,5–4 ч величина холостого хода изменяется незначительно (с 900 до 800 мкм).

Таким образом, выполненные исследования показали, что продолжительность старения качественно адекватно влияет на такие характеристики АЧЭ, как гистерезис, нелинейность, усадку при статическом и динамическом нагружении. Наибольшую нелинейность, величину гистерезиса и усадки имеют элементы, подвергнутые кратковременному старению. С увеличением продолжительности выдержки соответствующие значения указанных параметров уменьшаются. При этом прослеживается четкая тенденция — чем выше температура старения, тем быстрее величина указанных параметров достигает минимальных значений. Для температур старения 310–320 °С это происходит после 4–5 ч выдержки, 340 °С — после 3 ч. При 350 °С минимальные значения соответствуют выдержкам в течение 45–60 мин.

Величина различных неупругих эффектов (гистерезис, последствие, релаксация напряжений) определяется уровнем развития процессов микропластической деформации. Чем выше сопротивление материала микропластическим деформациям, тем меньше при данном приложенном напряжении неупругие и остаточные деформации, а, следовательно, ниже и все неупругие эффекты, определяющие свойства упругих элементов. Закономерности сопротивления сплава «медь — бериллий» микропластической деформации были рассмотрены ранее в работах [18–20]. В них на основании изучения изменения предела упругости и релаксационной стойкости сплава БрБНТ-1,9Мг (свойств, характеризующих сопротивление материала микропластической деформации) в процессе изотермической выдержки при старении и исследовании его субмикроскопической структуры была выяснена роль структурных параметров в сопротивлении сплава микропластической деформации. Составляя данные по нелинейности, гистерезису и величине усадки АЧЭ с результатами изучения предела упругости и релаксационной стойкости сплава БрБНТ-1,9Мг, приведенными в [18–20], можно видеть, что между этими характеристиками существует определенная корреляция. Ход кривых предела упругости и релаксационной стойкости при соответствующих температурах старения в основном повторяет ход кривых изменения величины нелинейности, гистерезиса и усадки мембран. Причем все характерные изменения величин параметров происходят на одних и тех же стадиях старения и протекают с одина-

ковой интенсивностью. Фактически кривые изменения величины гистерезиса, нелинейности и усадки мембран являются зеркальным отражением кривых предела упругости и релаксационной стойкости материала. Минимальные значения δ_s , γ и Δ_s соответствуют максимальным значениям предела упругости и релаксационной стойкости, а уменьшение и последующее увеличение значений δ_s , γ и Δ_s происходит на стадиях старения, соответствующих возрастанию и последующему (после достижения максимума) уменьшению предела упругости и релаксационной стойкости. Наличие связи между указанными параметрами показывает, что имеется определенная физическая общность между структурными процессами, ответственными за изменение свойств материала в области микропластических деформаций, и служебными характеристиками АЧЭ. Поэтому вполне естественно заключить, что наблюдаемое поведение рассматриваемых характеристик упругих чувствительных элементов обусловлено теми же причинами, которые были рассмотрены ранее при исследовании сопротивления медно-бериллиевого сплава микропластической деформации. В частности, в [10–12] было показано, что на начальных этапах старения повышение предела упругости $\Delta\sigma_{0,002}$ по отношению к закаленному состоянию обусловлено полями упругих межфазовых деформаций, возникающих вокруг зародышей фазы, поскольку сами зародыши фазы, имеющие монокристаллическую толщину, практически не оказывают сопротивления движению дислокаций. Дальнейший рост предела упругости при изотермической выдержке связан с увеличением мощности этих полей, вызванным возрастанием объемной доли и размеров частиц выделения. Причем это возрастание прямо пропорционально объемной доле p фазы выделения. При выдержках, обеспечивающих выделение фазы свыше 12 %, происходит отклонение от пропорциональности между $\Delta\sigma_{0,002}$ и p . Это объясняется тем, что в сплаве начинают протекать процессы релаксации упругих межфазовых деформаций. Поэтому изменение предела упругости на этих стадиях старения следует рассматривать с точки зрения одновременного протекания двух процессов — выделения, приводящего к повышению предела упругости, и релаксации упругих межфазовых напряжений, ведущей к его снижению. При 350 °С в интервале времени старения 15 мин – 1 ч процессы выделения превалируют над процессами релаксации упругих деформаций. Поэтому в целом наблюдается увеличение предела упругости и релаксационной стойкости. Когда распад сплава полностью завершается, преобладающую роль начинают играть процессы релаксации упругих напряжений и предел упругости начинает уменьшаться.

Основываясь на результатах этих работ, можно дать следующую трактовку наблюдаемому из-

менению величины гистерезиса, нелинейности и усадки мембран: для уменьшения этих неупругих эффектов необходимо создать в материале препятствия прохождению актов микропластической деформации, т. е. обратимому и необратимому движению дислокаций. Такими препятствиями в сплаве «медь — бериллий» являются частицы дисперсной фазы, выделяющиеся в процессе его старения, и поля упругих межфазовых деформаций, образующиеся в окружении частиц выделения. Отметим, что развитие процессов микропластической деформации в сплаве «медь — бериллий» имеет трехступенчатый характер [16]. Первая стадия соответствует легкому скольжению, когда дислокации двигаются через зоны, свободные от выделений. Вторая стадия связана с перемещением сегментов дислокаций, которые при своем движении встречают сопротивление со стороны частиц выделения и полей упругих напряжений вокруг них. Наконец, третья стадия соответствует макроскопической области развития пластической деформации, где дислокации вынуждены двигаться через частицы выделения.

Как следует из приведенных данных, наибольшие величины гистерезиса, нелинейности и усадки имеют мембраны после кратковременного старения. Это обусловлено возможностью движения имеющихся в сплаве незакрепленных дислокаций через зоны, свободные от выделений, т. е. реализуется первая стадия микропластической деформации, поскольку сами зародыши фазы, имеющие моноатомную толщину, практически не оказывают сопротивления движению дислокаций, а мощность полей упругих атомных смещений еще невелика. Увеличение продолжительности выдержки сопровождается увеличением мощности этих полей, вызванным возрастанием объемной доли и размеров частиц выделения. Это приводит к снижению величины гистерезиса, нелинейности и усадки мембран, поскольку дислокациям при своем движении необходимо преодолевать препятствия в виде частиц выделения и мощных полей упругих межфазовых деформаций вокруг них. При выдержках, обеспечивающих выделение фазы 12 %, величины гистерезиса, нелинейности и усадки мембран имеют минимальное значение. Затем в некотором интервале времени старения (45–70 мин при 350 °С, 2–3,5 ч при 340 °С) эти величины сохраняют постоянное значение, что, как говорилось выше, связано с процессами релаксации упругих межфазовых деформаций. В связи с тем, что на этих стадиях старения процессы выделения, приводящие к торможению движения дислокаций (т. е. уменьшению гистерезиса), практически полностью компенсируют процессы релаксации упругих межфазовых деформаций, увеличивающих гистерезис, его величина остается неизменной. Когда распад сплава полностью

завершается, преобладающую роль начинают играть процессы релаксации упругих напряжений, поэтому гистерезис, нелинейность и усадка мембран начинает возрастать. Как известно, скорость распада твердого раствора существенно зависит от температуры старения, причем с повышением последней она возрастает. Поэтому выделение при 350 °С происходит заметно быстрее, чем при более низких температурах, что и объясняет более высокие скорости изменения гистерезиса, нелинейности и усадки мембран при этой температуре старения.

Из приведенных в настоящей работе данных следует, что с точки зрения получения минимального гистерезиса и нелинейности характеристики анероидных чувствительных элементов, изготовленных из бронзы марки БрБНТ-1,9Мг, термообработку мембран следует проводить по режимам 1 ч при 350 °С или 3 ч при 340 °С.

Заключение. На основании исследований зависимости свойств УЧЭ, изготовленных из бериллиевой бронзы, от режимов их термической обработки установлены связи между субмикроскопической структурой материала и свойствами элементов. Показано, что наибольшую нелинейность, величину гистерезиса и усадки имеют элементы, подвергнутые кратковременному старению. С увеличением продолжительности выдержки соответствующие значения указанных параметров уменьшаются. При этом прослеживается четкая тенденция: чем выше температура старения, тем быстрее величина указанных параметров достигает минимальных значений. Из полученных данных следует, что с точки зрения получения минимального гистерезиса и нелинейности характеристики анероидных чувствительных элементов, изготовленных из бронзы марки БрБНТ-1,9Мг, термообработку мембран следует проводить по режимам 1 ч при 350 °С или 3 ч при 340 °С.

Список литературы

1. Ереско, С.П. Исследование и разработка датчика измерения давления мембранного типа с использованием платформы Arduino и программного комплекса Labview / С.П. Ереско, В.А. Зябликов, Е.В. Кукушкин // Системы. Методы. Технологии. — 2019. — № 1(41). — С. 41–46. — DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-1-41-46>.
2. Самакалёв, С.С. Упругие чувствительные элементы с улучшенными метрологическими характеристиками / С.С. Самакалёв // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 10. — С. 86–91.
3. Самакалёв, С.С. Мембранный узел датчика давления: пат. RU 2 733 509 C2 / С.С. Самакалёв. — Оpubл. 02.10.2020.
4. Бериллиевая бронза и изделие, выполненное из нее: пат. RU 2 569 286 C1 / Е.Н. Каблов, В.С. Каськов, А.В. Тебякин, А.Н. Фоканов, В.Ф. Подуражная. — Оpubл. 20.11.2015.
5. Андреева, Л.Е. Упругие элементы приборов / Л.Е. Андреева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1981. — 456 с.
6. Пономарев, С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева. — М.: Машиностроение, 1980. — 376 с.
7. Андреев, А.И. Разработка методики в области проектирования мембранных датчиков давления / А.И. Андреев, А.В. Жуков, А.С. Яковичин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение,

- материаловедение. — 2022. — Т. 24, № 1. — С. 28–34. — DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.1.04>.
8. 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 Всерос. науч.-практич. конф., Ростов-на-Дону, 25 нояб. 2019 г. / Южный университет (ИУБиП). — Ростов-на-Дону, 2019. — С. 74–76.
 9. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия: ГОСТ 1452-86. — Введ. 01.01.88. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 9 с.
 10. Толстой, А.В. Закономерности упрочнения сплава медь-бериллий / А.В. Толстой // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2000. — № 4. — С. 8–13.
 11. Толстой, А.В. Сопrotивление сплава медь-бериллий микропластической деформации / А.В. Толстой // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2001. — № 4. — С. 12–17.
 12. Толстой, А.В. Влияние холодной пластической деформации на структуру и свойства сплава медь-бериллий. II. Физико-механические свойства деформированных бериллиевых бронз / А.В. Толстой // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2006. — Т. 11, № 1. — С. 18–24.
 13. Влияние старения на микротвердость и электропроводность сплава Cu–2 вес.% Be / Л.И. Зайнуллина [и др.] // Frontier Materials&Technologies. — 2022. — № 3-1. — С. 69–75. — DOI: <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-3-1-69-75>.
 14. Осинская, Ю.В. Рентгенографическое исследование тонкой структуры бериллиевой бронзы БрБ-2, состаренной в постоянном магнитном поле / Ю.В. Осинская, А.В. Покоев, И.В. Емелин // Фазовые превращения и прочность кристаллов: тез. XII междунар. конф. (памяти академика Г.В. Курдюмова), Черноголовка, 24–27 окт. 2022 г. / под ред. Б.Б. Страумала. — Черноголовка, 2022. — С. 95.
 15. Ильичев, В.Ю. Экспериментальное исследование свойств металлических упругих элементов / В.Ю. Ильичев, Е.А. Юрик // Современные наукоемкие технологии. — 2018. — № 12-1. — С. 62–66.
 16. Борздыка, А.М. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А.М. Борздыка. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
 17. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Испытания на релаксацию напряжений металлов и сплавов при осадке. Общие требования: ГОСТ Р 57173-2016. — Введ. 01.01.2018. — М.: Стандартинформ, 2016.

TOLSTOY Aliaksandr V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Deputy Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”

E-mail: tolstoy@oim.by

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 05 February 2024.

INFLUENCE OF SUBMICROSCOPIC STRUCTURE OF “COPPER — BERYLLIUM” ALLOY ON SERVICE CHARACTERISTICS OF ELASTIC SENSING ELEMENTS

The dependence of the properties of elastic sensitive elements made of beryllium bronze on the modes of their heat treatment is studied. It is shown that the duration of aging significantly affects the value of nonlinearity of elastic characteristic, hysteresis, shrinkage of elements and mechanical properties of membrane material (hardness, elastic limit). The relations between submicroscopic structure and properties of elastic elements are established. The greatest nonlinearity of the elastic characteristic, hysteresis and shrinkage belong to elements subjected to short-term aging at 310–350 °C. With increasing duration of aging, the corresponding values of the above parameters decrease. For aging temperatures 310–320 °C, the nonlinearity of elasticity characteristics reaches the minimum values after 4–5 h of aging, and for 340 °C — after 3 h. At 350 °C minimum values of nonlinearity are reached after aging duration of 45–60 min. From the obtained data it follows that from the point of view of obtaining the minimum hysteresis and nonlinearity characteristics of aneroid sensing elements made of bronze of БрБНТ-1,9Мг (BrBNT-1.9Mg) grade, heat treatment of membranes should be carried out according to the regimes of 1 h at 350 °C or 3 h at 340 °C.

Keywords: beryllium bronze, elastic sensing elements, nonlinearity, hysteresis, shrinkage, aging

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-79-87>

References

1. Eresko S.P., Zyblikov V.A., Kukushkin E.V. Issledovanie i razrabotka datchika izmereniya davleniya membrannogo tipa s ispolzovaniem platformy Arduino i programmnogo kompleksa Labview [Research and development of a pressure measurement sensor of the membrane type using the Arduino platform and the Labview software package]. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 1(41), pp. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-1-41-46> (in Russ.).

2. Samakalev S.S. Uprugie chuvstvitelnyye elementy s uluchshennymi metrologicheskimi kharakteristikami [Elastic sensing elements with improved metrological characteristics]. *Innovacii i investicii*, 2021, no. 10, pp. 86–91 (in Russ.).
3. Samakalev S.S. *Membrannyi uzel datchika davleniya* [Pressure sensor diaphragm assembly]. Patent RU, no. 2 733 509 C2, 2020 (in Russ.).
4. Kablov E.N., Kaskov V.S., Tebyakin A.V., Fokanov A.N., Podurazhnaya V.F. *Berillievaya bronza i izdelie, vypolnennoe iz nee* [Beryllium bronze and the product made of it]. Patent RU, no. 2 569 286 C1, 2015 (in Russ.).
5. Andreeva L.E. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of the devices]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 456 p. (in Russ.).
6. Ponomarev S.D., Andreeva L.E. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 376 p. (in Russ.).
7. Andreev A.I., Zhukov A.V., Yakovishin A.S. *Razrabotka metodiki v oblasti proektirovaniya membrannykh datchikov davleniya* [Development of a methodology for the design of membrane pressure sensors]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.1.04> (in Russ.).
8. Andreev A.I., Jankin I.N. *Povyshenie nadezhnosti datchika davleniya na osnove vybora optimalnoy formy chuvstvitelnogo elementa* [Improving the reliability of the pressure sensor based on the choice of the optimal shape of the sensor element]. *Materialy 22 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya i razrabotki poslednego desyatiletia: vzaimodeystvie proshlogo i sovremennogo"* [Proc. 22nd All-Russian scientific and practical conference "Scientific research and development of the last decade: the interaction of the past and the modern"]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 74–76 (in Russ.).
9. State Standard 1452–86. *Pruzhini tsilindricheskie vintovye telezhek i udarno-tyagovykh priborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya* [Screw cylindrical springs for trucks and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2002. 9 p. (in Russ.).
10. Tolstoy A.V. *Zakonomernosti uprochneniya splava med-berilliy* [Patterns of hardening of the copper-beryllium alloy]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2000, no. 4, pp. 8–13 (in Russ.).
11. Tolstoy A.V. *Soprotivlenie splava med-berilliy mikroplasticheskoy deformatsii* [Resistance of copper-beryllium alloy to microplastic deformation]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2001, no. 4, pp. 12–17 (in Russ.).
12. Tolstoy A. V. *Vliyanie kholodnoy plasticheskoy deformatsii na strukturu i svoystva splava med-berilliy*. 2. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva deformirovannykh berillievyykh bronz* [The effect of cold plastic deformation on the structure and properties of the copper-beryllium alloy. 2. Physical and mechanical properties of deformed beryllium bronzes]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty*, 2006, vol. 11, no. 1, pp. 18–24 (in Russ.).
13. Zaynullina L.I., Sarkeeva E.A., Alexandrov I.V., Valiev R.Z. *Vliyanie stareniya na mikroverdst i elektroprovodnost splava Cu–2 ves.% Be* [The influence of aging on microhardness and electrical conductivity of Cu–2 wt.% Be alloy]. *Frontier materials & technologies*, 2022, no. 3-1, pp. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-3-1-69-75> (in Russ.).
14. Osinskaya Yu.V., Pokoev A.V., Emelin I.V. *Rentgenograficheskoe issledovanie tonkoy struktury berillievoy bronzy BrB-2, sostarennoy v postoyannom magnitnom pole* [X-ray examination of the fine structure of beryllium bronze BrB-2 aged in a constant magnetic field]. *Tezisy 12 Mezhdunarodnoy konferentsii "Fazovye prevrashcheniya i prochnost kristallov"* (pamyati akademika G.V. Kurdyumova) [Abstracts 12th International conference "Phase transformations and crystal strength" (in memory of Academician G.V. Kurdyumov)]. Chernogolovka, 2022, p. 95 (in Russ.).
15. Ilichev V.Yu., Yurik E.A. *Eksperimentalnoe issledovanie svoystv metallicheskiy uprugikh elementov* [Pilot study of properties of metal elastic elements]. *Modern high technologies*, 2018, no. 12-1, pp. 62–66 (in Russ.).
16. Borzdyka A.M. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh* [Stress relaxation in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 256 p. (in Russ.).
17. State Standard R 57173–2016. *Raschet i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Ispytaniya na relaksatsiyu napryazheniy metallov i splavov pri osadke. Obshchie trebovaniya* [Calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Tests for stress relaxation of metals and alloys at a compression. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.