

## ЗАЖИМНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С УПРУГИМ СИЛЬФОННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ



<sup>1</sup>Хазем Арслан,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (904)331-2942, E-mail: [hazemarslan92@gmail.com](mailto:hazemarslan92@gmail.com)



<sup>2</sup>Михаил Тимофеевич Коротких,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (951)653-2871, E-mail: [kmt46@mail.ru](mailto:kmt46@mail.ru)

### Аннотация

Статья посвящена определению характеристик электромеханических зажимных устройств с применением материалов с памятью формы (МПФ).

Рассматривается вопрос о разработке упругих элементов, которые выполнены в виде герметичных сильфонов, заполненных газом высокого давления, а торцы сильфона соединены элементами из МПФ.

Приведены расчетные формулы конструктивных параметров зажимных элементов из упругих сильфонов для закрепления и раскрепления объекта по времени нагрева и времени остывания МПФ.

Результаты показали, что такие приводы могут иметь минимальные габариты при высоких силовых усилиях по сравнению с другими приводами, что позволяет использовать их в различных малогабаритных станочных приспособлениях, способных развивать большие усилия.

*Ключевые слова:* сильфонный элемент, зажимное устройство, электромеханическое устройство, станочные приспособления, память формы.

## **Введение**

Целью исследования является разработка конструктивных параметров зажимного устройства, в котором в качестве упругого элемента использован сильфон, заполненный газом под высоким давлением.

Задачи исследования состоят в создании методики проектирования и определении конструктивных параметров электромеханических устройств с упругим сильфонным элементом на основе МПФ.

В данный момент в автоматизации машиностроительных производств на основе использования станков с ЧПУ существует определенная проблема автоматизации закрепления и снятия заготовок на станках.

Силовые приводы, работающие с гидравлическими, пневматическими и механическими системами в станочных приспособлениях, могут быть заменены приводами для закрепления заготовок с приводами из МПФ из-за их небольших размеров и достаточного усилия закрепления. Кроме того, они проще, с меньшим количеством деталей и, как правило, просты в обслуживании и проверке [1-3].

На данный момент существует большая группа силовых устройств, использующих МПФ в качестве электромеханических устройств, различающихся по принципу действия, габаритам устройства и способу крепления элементов из МПФ [4-8].

Ранее были предложены электромеханические зажимные элементы, с применением МПФ, которые могут применяться для автоматизации операций механической обработки в станочных приспособлениях [9, 10].

В таких зажимных элементах упругая энергия накапливается в металлических пружинах, винтовых и тарельчатых. Такие зажимные элементы могут быть весьма эффективны, но следует учесть, что упругая энергия концентрируется только в теле пружины, которая занимает объем иногда значительно превышающий объем самого материала, в котором сконцентрирована энергия [11-13].

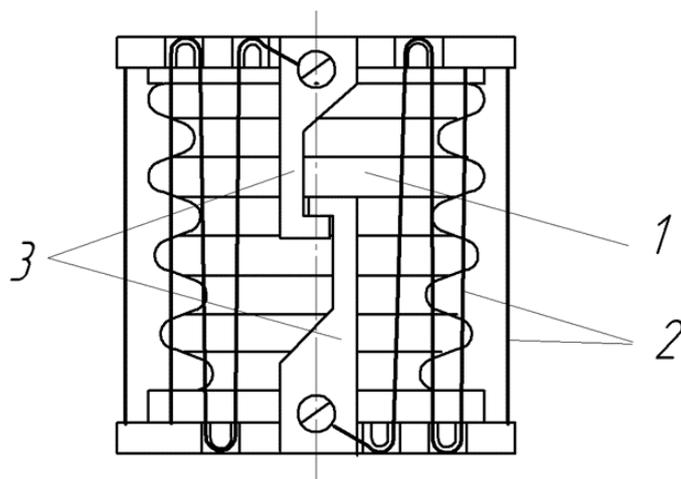
Поэтому при дальнейшей разработке таких зажимных элементов было предложено упругий элемент в виде пружины заменить на пневматический герметичный упругий элемент в виде сильфона (рис. 1) [14].

В данной статье рассматривается конструкция зажимных электромеханических устройств с упругим сильфонным элементом на основе МПФ.

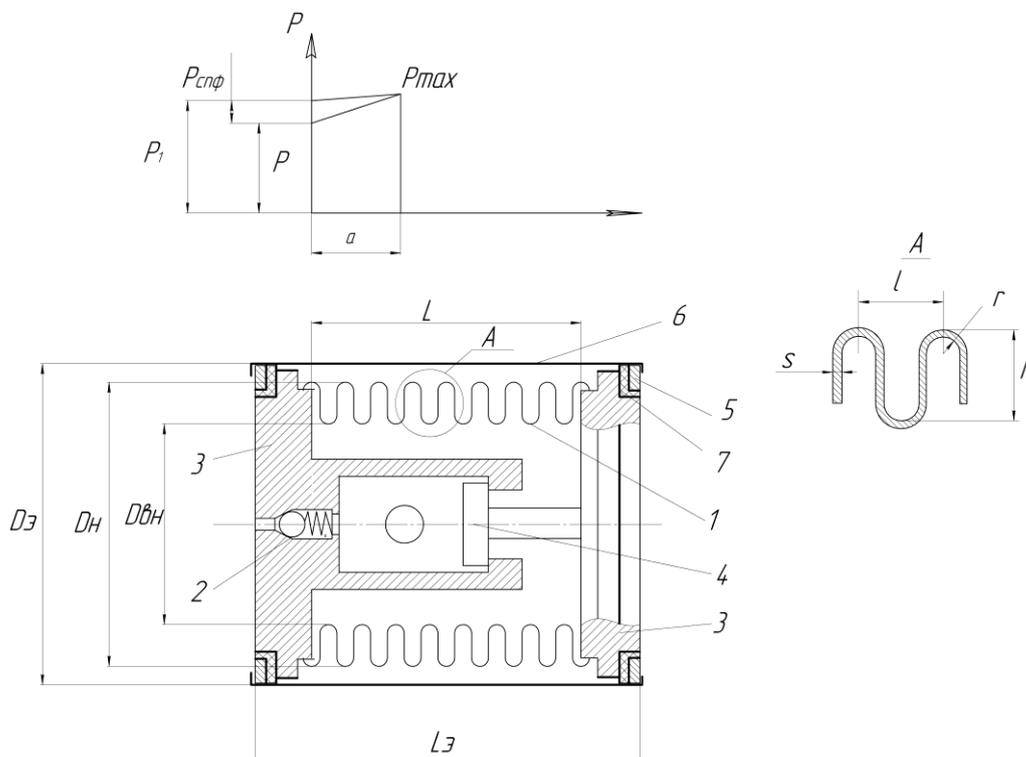
## **Методика исследования**

Представлена конструкция упругого элемента, в котором сильфонный элемент использован. На рис. 1 показана схема зажимного устройства в не сжатом состоянии. На схеме сильфон 1 со сжатым газом имеет торцы,

между которыми находятся элементы из сплава с памятью формы (СПФ) 2 расположенные вдоль оси сиффона и находящиеся в псевдопластическом растянутом вдоль оси сиффона состоянии. Между торцами сиффона находятся ограничители 3, не позволяющие сиффону удлиняться более определенной величины, определяемой допустимой деформацией элементов из СПФ [14].



**Рис. 1.** Схема зажимного устройства с применением сиффона: 1 – сиффонный элемент, 2 – элементы из МПФ выполнены из проволоки, когда вдоль упругого элемента размещается множество витков проволоки (например: нитинол), 3 – ограничитель



**Рис. 2.** Схема электромеханического сиффонного зажимного элемента с применением МПФ

где  $h$  – высота волны упругого сильфона,  $l$  – шаг между волнами упругого сильфона,  $s$  – толщина стенки упругого сильфона,  $r$  – радиус тороидального перехода в верхней и нижней части упругого сильфона,  $D_{\text{Э}}$  – наружный диаметр сильфонного зажимного элемента,  $L_{\text{Э}}$  – общая длина сильфонного зажимного элемента,  $D_{\text{Н}}$  – наружный диаметр сильфона,  $D_{\text{Вн}}$  – внутренний диаметр сильфона.

Работа сильфонного элемента при ограничении элементами из МПФ практически невозможна, т. к. удлинение сильфона приведет к верхкритическому удлинению элементов из МПФ, которое не должно превышать установленного для данного материала (4...5%).

Схема электромеханического сильфонного зажимного элемента с применением МПФ представлена на рис. 2. Такой зажимной элемент может состоять из сильфона 1, заполненного газом под давлением через обратный клапан 2, фланцев 3, герметично соединенных с сильфоном, упора 4, ограничивающего удлинение сильфона, фланцев 5, соединенных с элементами из МПФ 6. Причем фланцы 5 электрически изолированы от фланцев 3 диэлектрическими прокладками 7.

Параметры конструктивных элементов такого зажимного устройства будут определяться как технологическими требованиями к его работе, так и условиями его прочности и методикой его сборки. При проектировании зажимного элемента технологическими требованиями к его функционированию обычно являются развиваемое усилие  $P_{\text{закр}}$  и рабочий ход  $a_{\text{закр}}$ .

1. Минимальное усилие зажимного элемента:

$$P_{\text{закр}} = P_{\text{max}} - 0,05P_{\text{max}} - P_{\text{МПФ}} \quad (1)$$

2. Задавшись предварительно требуемым теоретическим развиваемым усилием элемента  $P_{\text{max}}$  и его размерами  $D_{\text{Н}}$  и  $D_{\text{Вн}}$  (см. рис. 2), силу сильфона можно задать, пренебрегая жесткостью его рубашки:

$$P_{\text{max}} = p \frac{\pi D_{\text{С}}^2}{4} \quad (2)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная сила, развиваемая сильфоном при сжатии его на величину рабочего хода, при котором элементы из МПФ находятся в недеформированном состоянии,  $p$  – требуемое давление газа для заполнения сильфона, учитывая, что действующая площадь, рассчитываемая по среднему диаметру сильфона по формуле:

$$D_{\text{С}} = \frac{(D_{\text{Н}} + D_{\text{Вн}})}{2} \quad (3)$$

3. Сила, возникающая при сжатии сильфона при мартенситном превращении (при нагреве элементов из МПФ выше критической температуры):

$$P_{\text{МПФ}1} = S_{\text{МПФ}} \times \sigma \quad (4)$$

где  $\sigma$  – напряжения сжатия, возникающие в предварительно растянутых элементах из МПФ при нагреве выше критической температуры (для сплава нитинол  $\sigma = 800$  МПа [15]),  $S_{МПФ}$  – суммарная площадь поперечного сечения элементов из МПФ.

4. Для сжатия сальфона должно выполняться условие  $P_{МПФ1} \geq P_{\max}$ , исходя из этого условия можно определить необходимую площадь элементов из МПФ:

$$S_{МПФ} = \frac{P_{МПФ1}}{\sigma} \quad (5)$$

5. Учитывая, что элементы из МПФ будут удлиняться под действием сальфона со сжатым газом до предела, ограниченного упором при этом:

$$P_{МПФ} = S_{МПФ} \times \sigma_T \quad (6)$$

где  $\sigma_T$  – напряжение квазипластической деформации МПФ (для нитинола  $\sigma_T = 200$  МПа [15]).

6. Из условия работы материала с памятью формы предполагается, что его квазипластическая деформация ограничена, например 5%. Тогда исходя из заданной величины рабочего хода  $a_{закр}$  можно определить требуемую длину элементов из МПФ:

$$L_{МПФ} = \frac{a_{закр}}{0,05} \quad (7)$$

7. Следовательно, длина сальфона:

$$L = L_{МПФ} - 2b \quad (8)$$

где  $b$  – длина фланцев.

8. Конструктивные параметры сальфона:  $h$ ,  $l$ ,  $r$  можно выбирать в соответствии со средними значениями, рекомендуемыми ГОСТ 30780-2002:

$$3 < \frac{D_c}{h} < 100 \quad (9)$$

$$0,1 < \frac{r}{h} < 0,5 \quad (10)$$

А толщина стенки сальфона, выбираемая в интервале (см. формулу 11) рассчитывается из условия обеспечения циклической прочности сальфона в соответствии с ГОСТ 30780-2002.

$$0,018 < \frac{s}{h} < 0,1 \quad (11)$$

При заполнении сальфона газом он будет удлиняться до величины, определяемой ограничителем, при этом будет растягивать элементы из сплава с памятью формы. Для того, чтобы при нагреве этих элементов выше критической температуры произошло сжатие сальфона до первоначальной длины усилие ими развиваемое должно превышать теоретическое усилие, развиваемое сальфоном  $P_{\max}$ .

При определении размеров элементов из МПФ рассчитывается размер элементов в следующем образом:

1. Длина элемента из МПФ  $L_{МПФ}$  определялась по формуле (7).
2. Площадь поперечного сечения элементов из МПФ определялась по предыдущей формуле (5).

3. Из этой формуле определяется  $d_{МПФ}$  диаметр проволоки МПФ:

$$S_{МПФ} = \frac{\pi d_{МПФ}^2}{4} \times n_{МПФ} \quad (12)$$

где  $n_{МПФ}$  – число ветвей проволоки из МПФ.

Конструктивно задают количество ветвей проволоки, обеспечивающей упругий элемент. Для более равномерного распределения усилия это количество  $n_{МПФ}$  следует принимать более 4.

Если представить, что элемент в виде тонкой пленки (фольги), окружающей упругий элемент, то толщина этого элемента  $T_{\Phi}$ :

$$T_{\Phi} = \frac{S_{МПФ}}{\pi \cdot D_{\Phi}} \quad (13)$$

где  $D_{\Phi}$  – наружный диаметр сильфонного зажимного элемента.

Время нагрева и охлаждения можно регулировать за счет перегрева элемента из МПФ выше критической температуры.

При нагреве электрическим током элемента, имеющего относительно малое сопротивление возникающая сила тока имеет высокое значение и требует мощного источника питания, то может использоваться импульсный источник питания использующий разряд конденсатора, который накаливает заряд в период работы оснастки с закрепленным объектом.

1. Требуемое количество энергии для нагрева до заданной температуры рассчитывается по формуле:

$$E = C_t M (T_p - T_H) \quad (14)$$

где  $C_t$  – массовая теплоемкость МПФ  $C_t = 469$  Дж/кг. К [16],  $M$  – суммарная масса элемента МПФ,  $T_p$  – температура мартенситного (фазового) перехода материала  $T_p = 100$  °C [17],  $T_H$  – исходная температура элемента из МПФ  $T_H = 20$  °C.

2. Определяется масса элемента МПФ:

$$M = \rho V \quad (15)$$

где  $\rho$  – плотность элементов из МПФ  $\rho = 6,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [16],  $V$  – суммарный объем элементов из МПФ.

И тогда объем элементов:

$$V = L_{МПФ} \times S_{МПФ} \times K_1 \quad (16)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий участки МПФ, огибающей фланцы на 10%.

3. А энергия, накопленная конденсатором:

$$E = C \frac{U^2}{2} \quad (17)$$

4. Тогда энергия, накапливаемая конденсатором, должна соответствовать энергии для нагрева элемента из МПФ:

$$C \frac{U^2}{2} = C_t M (T_p - T_n) \quad (18)$$

где  $U$  – напряжение,  $U = 36$  В,  $C$  – требуемая емкость конденсатора, ф.

5. Время разряда конденсатора через сопротивление на 95% энергии составляет  $t = 3\tau$ .

где  $\tau$  – постоянная времени цепи  $\tau = rC$ .

Необходимо считать сопротивление МПФ  $R_{МПФ}$  по формуле:

$$R_{МПФ} = J \cdot \frac{L_{МПФ} \times n_{МПФ}^2 \times K_1}{S_{МПФ}} \quad (19)$$

где  $J$  – удельное сопротивление МПФ  $J = 800 \times 10^{-6}$  Ом-мм [16],  $n_{МПФ}$  – при фольге, то равно 1.

Поэтому время нагрева будет определяться временем разряда конденсатора через сопротивление  $R_{МПФ}$ , которое надо учитывать в сумме с сопротивлением подводящих проводов. Сопротивление элемента из МПФ считать, учитывая, что все ветви соединены последовательно. Сопротивление проводов можно зять не более 5% от  $R_{МПФ}$ .

Общее сопротивление:

$$r = 1,05 R_{МПФ} \quad (20)$$

Время же последующего закрепления объекта будет определяться остыванием МПФ ниже температуры фазового превращения.

1. При отключении тока будет происходить за счет естественной конвекции воздуха вокруг МПФ:

$$t_{закр} = \frac{C_t \times M (T_k - T_{кр})}{\alpha \times F_{МПФ} \times (T_{ср} - T_{ос})} \quad (21)$$

где  $T_k$  – температура перегрева проволоки выше температуры фазового перехода  $T_k \approx 105$  с° [18],  $T_n$  – критической температурой фазового перехода МПФ  $T_{кр} \approx 70$  с° [18], обеспечивающая надежность срабатывания привода,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $F_{МПФ}$  – площадь поверхности элемента МПФ,  $T_{ср}$  – средняя температура нагретой элемента МПФ,  $T_{ос}$  – температура окружающей среды  $T_{ос} = 20$  с°.

2. Площадь поверхности элементов из МПФ:

$$F_{МПФ} = \pi d_{МПФ} \times L_{МПФ} \times n_{МПФ} \times K_1 \quad (22)$$

А при элементе в виде тонкой пленки (фольги), площадь поверхности элементов из МПФ:

$$F_{МПФ} = \pi D_{\Phi} \times L_{МПФ} \times K_1 \quad (23)$$

В данном случае площадь охлаждаемой поверхности фольговой оболочки принимается только за площадь ее наружной поверхности, так как условия охлаждения внутри оболочки могут существенно отличаться.

## Результаты

В соответствии с представленной методикой были рассчитаны примеры конструктивных параметров зажимных элементов из упругих сильфонов при рабочем ходе раскрепления  $a_{\text{закр}} = 2$  мм, 4 мм для усилий закрепления  $P_{\text{закр}} = 5000$  Н, 10000 Н, как для элементов, при ограничении деформации механическим устройством. В таблице 1 расчеты показывают, что такие зажимные элементы могут быть весьма компактными.

**Таблица 1.** Расчетные данные для описания параметров упругих сильфонов и конструктивные параметры из МПФ

№ Вар.	$P_{\text{закр}}$ , Н	$a$ , мм	$p$ , МПа	$D_c$ , мм	$P_{\text{max}}$ , Н	$L_{\text{МПФ}}$ , мм	$S_{\text{МПФ}}$ , мм <sup>2</sup>	$R_{\text{МПФ}}$ , Н	$D_{\sim}$ , мм	$L_{\sim}$ , мм	$n_{\text{МПФ}}$	$d_{\text{МПФ}}$ , мм	$T_{\text{ф}}$ , мм
1	5000	2	30	14,6	7140	40	8,9	1780	20	50	10	1,07	0,14
2	5000	4	30	14,6	7140	80	8,9	1780	20	90	16	0,84	0,14
3	10000	2	30	20,6	14280	40	17,85	3570	27	50	10	1,51	0,21
4	10000	4	30	20,6	14280	80	17,85	3570	27	90	16	1,19	0,21

По времени  $3\tau$  можно определить  $t$  время импульсного нагрева элемента из МПФ. В таблице 2 показаны расчеты времени раскрепления объекта при применении источника питания с безопасным уровнем напряжения 36В.

**Таблица 2.** Расчетное время освобождения объекта

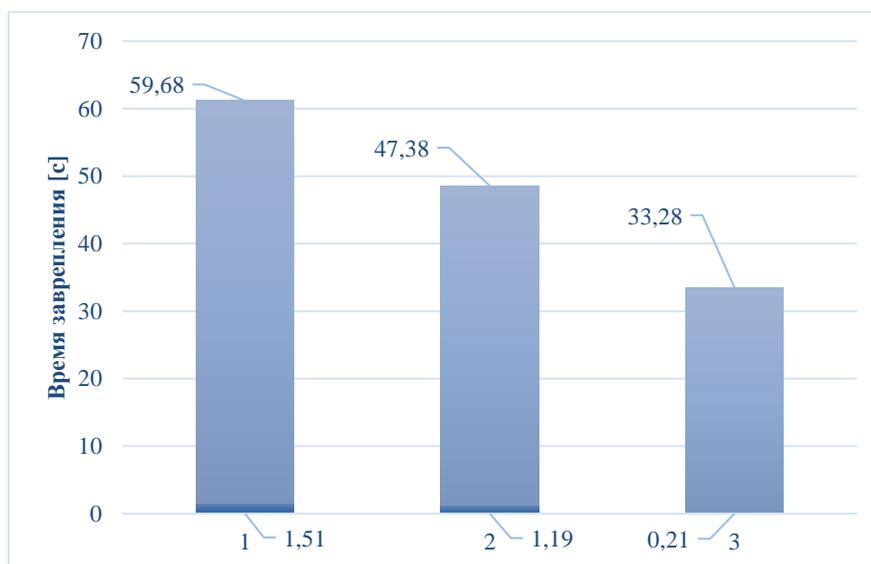
№ вариантов	$P_{\text{закр}}$ , Н	$S_{\text{МПФ}}$ , мм <sup>2</sup>	$L_{\text{МПФ}}$ , мм	$n_{\text{МПФ}}$ (1-фольга)	Температура перегрева $T_K - T_H$ , °C	$C$ , ф	Время Нагрева $t$ , с
1	5000	0,89	40	10	100-20	0,147	0,18
2	5000	0,56	80	16	100-20	0,297	1,88
3	10000	1,79	40	10	100-20	0,296	0,18
4	10000	1,12	80	16	100-20	0,594	1,88
№ вар.	При использовании фольги						
1	5000	8,9	40	1	100-20	0,143	0,002
2	5000	8,9	80	1	100-20	0,295	0,007
3	10000	17,85	40	1	100-20	0,150	0,002
4	10000	17,85	80	1	100-20	0,299	0,007

В таблицах 3 указано расчетное время закрепления объекта при различных условиях охлаждения элементов из нитинола.

**Таблица 3.** Расчетное время закрепления объекта

№ варианты в	$P_{закр}, Н$	$S_{МПФ}, мм^2$	$L_{МПФ}, мм$	$n_{МПФ}$ (1- фольга)	Температура перегрева $T_K, °C$	$F_{МПФ}, мм^2$	Время закрепления $t_{закр}, с$
1	5000	0,89	40	10	105	1478,31	41,87
2	5000	0,56	80	16	105	3713,74	33,56
3	10000	1,79	40	10	105	2086,22	59,68
3	10000	1,12	80	16	105	5261,13	47,38
№ вар.	При использовании фольги						
1	5000	8,9	40	1	105	2763,2	22,40
2	5000	8,9	80	1	105	5526,4	22,40
3	10000	17,85	40	1	105	3730,32	33,28
3	10000	17,85	80	1	105	7460,64	33,28

На рис. 3 ниже показана разница во времени охлаждения при использовании нескольких диаметров проволок из МПФ и при использовании фольги из МПФ.



**Рис. 3.** Разница во времени охлаждения: 1) при диаметре проволоки из МПФ  $d=1,51$ мм, получается время остывания  $t=59,68$ с, 2) при диаметре проволоки из МПФ  $d=1,19$ мм, получается время остывания  $t=47,38$ с, 3) при толщине фольги из МПФ  $S_{ф}=0,21$ мм, получается время остывания  $t=33$ с

Анализируя диаграмму, можно сказать, что использование фольги из МПФ позволяет сократить время охлаждения, но при этом может быть

увеличен внешний диаметр  $D_э$ , что приводит к увеличению площади и большему сокращению времени охлаждения.

### **Обсуждение**

Как показано в приведенных выше расчетах, размеры зажимных устройств с элементом из упругого сильфона меньше, чем размеры устройств с винтовыми и тарельчатыми пружинами [10, 13].

Поэтому применение предлагаемых зажимных устройств позволяет существенно уменьшить их габариты. Уменьшение же габаритов зажимных элементов существенно расширяет их область применения в станочных приспособлениях.

### **Заключение**

В статье предложена методика определения конструктивных параметров электромеханических зажимных устройств, в которых в качестве упругого элемента используется сильфон, заполненный газом под высоким давлением, а сжатие сильфона при освобождении заготовки осуществляется нагревом предварительно деформированных элементов из материала с памятью формы.

Эти элементы из МПФ могут быть выполнены из проволоки или из фольги, представляющей концентрическую оболочку вокруг сильфона.

Преимуществами таких зажимных устройств при применении их в станочных приспособлениях являются:

1. малые габариты при значительных развиваемых усилиях;
2. возможность регулировать усилие закрепления за счет изменения давления, заполняющего сильфон газа;
3. применение большего количества ветвей элемента из МПФ или выполнение его из фольги позволяет существенно сократить время на срабатывания элемента при закреплении объекта.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Ma, J., Karaman, I., Noebe, R.D. High temperature shape memory alloys. *International Materials Reviews*, 2010, 55 (5), pp. 257–315.
- [2] Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. *Sensor Actuator Phys.*, 2010, 158 (1), pp. 149–160.

- [3] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 2014, 56, pp. 1078–1113.
- [4] Donnellan, Q.A. Design and testing of linear shape memory alloy actuator. National Science Foundation – Research Experience for Undergraduates, 2005, pp. 1-6.
- [5] Elwaleed, A.K., Mohamed, N.A., Nor. M.J.M., Mustafa, M.M. A new concept of a linear smart actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135 (1), pp. 244–249.
- [6] Pittaccio, S., Viscuso, S., Rossini, M., Magoni, L., Pirovano, S., Villa, E., Besseghini, S., Molteni, F. SHADE: A shape-memory-activated device promoting ankle dorsiflexion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18 (5), pp. 824–830.
- [7] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28 (13), pp. 1699–1718.
- [8] Глущенко В.А., Алехина В.К. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017. С. 483-488.
- [9] Патент № 2775658 Российская Федерация, МПК F03G 7/06 (2006.01), F03G 7/065 (2022.02). Вибрационная мельница: N 2021119568: заявл. 05.07.2021: опубликовано 06.07.2022 / Коротких М.Т., Арслан Х.; заявитель СПбПУ. – 8 С.: ил. – Текст: непосредственный.
- [10] Arslan, H., Korotkih, M.T. Electromechanical clamping device using shape memory materials. 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 150-158.
- [11] Арслан Х., Коротких М.Т. Применение электромеханических зажимных устройств с применением материалов с памятью формы в станочных приспособлениях. *Металлообработка*. 2022. № 1. С. 51-55.
- [12] Арслан Х., Коротких М.Т. Расчетное обоснование термомеханических зажимных устройств для станочных приспособлений. *Наука и бизнес: пути развития*. 2022. № 7 (133). С. 133-137.
- [13] Arslan, H., Korotkih, M.T. Optimization method for clamping devices based on shape memory materials. 2023. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 195-202.
- [14] Патент № 2796035 Российская Федерация, МПК F03G 7/06 (2006.01), F03G 7/065 (2022.08). Вибрационная мельница: N 2022117173: заявл. 24.06.2022: опубликовано 16.05.2023 / Коротких М.Т., Арслан Х.; заявитель СПбПУ. – 10 С.: ил. – Текст: непосредственный.

- [15] Бледнова Ж.М. Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении: Научно-образовательный курс. Краснодар. 2012. 69 с.
- [16] Кухарева А.С. Решение краевых задач для цилиндра и пластины из сплава с памятью формы. *Materials Physics and Mechanics*. 2017. № 31. С. 23-27.
- [17] Глущенко В.А., Алехина В.К. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017. С. 483-488.
- [18] Казей З.А., Снегирев В.В. Упругие свойства сплавов TiNi с памятью формы с различной термообработкой. *Физика твердого тела*. 2019. № 61 (7). С. 1223-1228.

H. Arslan, M.T. Korotkikh

## **CLAMPING ELECTROMECHANICAL DEVICES WITH AN ELASTIC BELLOWS ELEMENT USING SHAPE MEMORY MATERIALS**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

### **Abstract**

The article is devoted to determining the characteristics of electromechanical clamping devices using shape memory materials (SMM).

The issue of developing elastic elements, which are made in the form of hermetic bellows filled with high-pressure gas, and the ends of the bellows are connected by elements of a SMM, is being considered.

Calculation formulas for the design parameters of clamping elements made of elastic bellows for fixing and unclamping an object in terms of the heating time and the cooling time of the SMM are given.

The results showed that such drives can have minimal dimensions at high power forces compared to other drives, which allows them to be used in various small-sized machine tools that can develop high forces.

*Key words:* bellows element, clamping device, electromechanical device, machine tools, shape memory.

### **REFERENCES**

- [1] Ma, J., Karaman, I., Noebe, R.D. High temperature shape memory alloys. *International Materials Reviews*, 2010, 55 (5), pp. 257–315.

- [2] Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. *Sensor Actuator Phys.*, 2010, 158 (1), pp. 149–160.
- [3] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 2014, 56, pp. 1078–1113.
- [4] Donnellan, Q.A. Design and testing of linear shape memory alloy actuator. National Science Foundation – Research Experience for Undergraduates, 2005, pp. 1-6.
- [5] Elwaleed, A.K., Mohamed, N.A., Nor. M.J.M., Mustafa, M.M. A new concept of a linear smart actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135 (1), pp. 244–249.
- [6] Pittaccio, S., Viscuso, S., Rossini, M., Magoni, L., Pirovano, S., Villa, E., Besseghini, S., Molteni, F. SHADE: A shape-memory-activated device promoting ankle dorsiflexion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18 (5), pp. 824–830.
- [7] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28 (13), pp. 1699–1718.
- [8] Glushchenkov V.A., Alekhina V.K. Multi-link actuators made of shape memory material and their characteristics. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. pp. 483-488. (rus.)
- [9] Patent № 2775658 Russian Federation, IPC F03G 7/06 (2006.01), F03G 7/065 (2022.02). Vibratory mill: N 2021119568: Appl. 05.07.2021: published on 06.07.2022 / Korotkikh M.T., Arslan Kh.; SPbPU applicant. - 8 pp.: ill. – Text: direct. (rus.)
- [10] Arslan, H., Korotkih, M.T. Electromechanical clamping device using shape memory materials. 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 150-158.
- [11] Arslan H., Korotkikh M.T. The use of electromechanical clamping devices by using shape memory materials in machine tools. *Metallrobrabotka*. 2022. № 1 (127). pp. 51-55. (rus.)
- [12] Arslan H., Korotkikh M.T. Calculation substantiation of thermo-mechanical clamping devices for machine devices. *Science and business: development ways*. 2022. № 7 (133). pp. 133-137 (rus.)
- [13] Arslan, H., Korotkih, M.T. Optimization method for clamping devices based on shape memory materials. 2023. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 195-202.
- [14] Patent № 2796035 Russian Federation, IPC F03G 7/06 (2006.01), F03G 7/065 (2022.08). Vibratory mill: N 2022117173: Appl. 24.06.2022:

- published on 16.05.2023 / Korotkikh M.T., Arslan Kh.; SPbPU applicant. - 10 pp.: ill. – Text: direct. (rus.)
- [15] Blednova Zh.M. The role of shape memory alloys in modern mechanical engineering: Scientific and educational course. Krasnodar. 2012. pp. 69. (rus.)
- [16] Kukhareva A.S. Solving boundary value problems for a cylinder and a shape memory alloy plate. Materials Physics and Mechanics. 2017. № 31. pp. 23-27. (rus.)
- [17] Glushchenkov V.A., Alekhina V.K. Multi-link actuators made of shape memory material and their characteristics. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. pp. 483-488. (rus.)
- [18] Kazei Z.A., Snegirev V.V. Elastic properties of TiNi shape memory alloys with different heat treatment. Solid state physics. 2019. № 61 (7). pp. 1223-1228. (rus.)