



**Vitaliy
A. Polishchuk**
Полищук
Виталий
Анатольевич



**Aleksandr
L. Nikolaiev**
Николаев
Александр
Львович



Svetlana J. Bodu
Боду
Светлана
Жаковна



**Victoriia
S. Biloshapka**
Билошапка
Виктория
Сергеевна

УДК 669.017

ELEMENTAL BASE DEVELOPMENT OF THERMAL ACTUATORS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ТЕРМОСИЛОВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.29

Vitaliy A. Polishchuk

В. А. Полищук, канд. техн. наук, доц.
vitpolishchuk@gmail.com
ORC ID: 0000-0003-0320-4327

Oleksandr L. Nikolaiev

А. Л. Николаев, канд. техн. наук, доц.
aleks.nikolaiev61@gmail.com
ORC ID: —

Svetlana J. Bodu

С. Ж. Боду, старший преподаватель
svetlana.baudoux@gmail.com
ORC ID: 0000-0003-1932-0955

Victoriia S. Biloshapka

В. С. Билошапка, магистрант
belosapkavita257@gmail.com
ORC ID: —

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев

Abstract. The actual task of thermo-force drives designing for technological equipment based on actuators of alloys with shape memory effect is considered. The actuators use in thermomechanical engines and automatic regulation and control means provides significant advantages over traditional drives. These include high reliability, simplicity of design and parameters control, high stiffness of the power characteristics at the same time a wide range of movement speeds, low weight and size parameters. In the article analysis of schemes for implementing the reciprocating motion of small-sized devices actuating element for process equipment, which justifies the choice of schemes in the form of conjugated pairs: a thermosensing element with the effect of shape memory—the return elastic element, was carried out. In this case, the thermal actuator bi-directional action is provided by combining the parts with a unidirectional action or using the reversible shape memory effect. Analysis of the possibilities of thermosensitive elements types using, types of their deformation, effects of thermomechanical memory, phenomena of reversible and irreversible shape memory effect, operation modes of thermosensitive elements is made. The analysis of the thermal actuators applicability depending on the number of work cycles and methods of shape memory effect initiating is given. Regulating method of the generated reactive stresses magnitude by varying the counterbody counteraction stiffness is considered.

Keywords: thermal actuator, shape memory effect, execution unit, actuating mechanism, thermosensitive element, movable operating element, technological equipment.

Анотація. Розглянуто актуальну задачу проектування термосилових приводів для технологічного обладнання на базі виконавчих елементів зі сплавів з ефектом пам'яті форми, застосування яких в термомеханічних двигунах і засобах автоматичного регулювання та керування забезпечує суттєві переваги в порівнянні з традиційними приводами. До них слід віднести високу надійність, простоту конструкції й управління параметрами, високу жорсткість силової характеристики при одночасно широкому діапазоні швидкостей переміщення, низькі масогабаритні показники. У статті проведено аналіз схем реалізації зворотно-поступального руху виконавчої ланки малогабаритних пристроїв для технологічного обладнання, який обґрунтовує вибір схем у вигляді спряжених пар: термочутливий елемент з ефектом пам'яті форми—зворотний пружний елемент. При цьому двонаправленість дії термосилового приводу забезпечується шляхом комбінації деталей з однонаправленою дією або з використанням оборотного ефекту пам'яті форми. Наведено аналіз можливостей використання видів термочутливих елементів, видів їх деформації, використовуваних ефектів термомеханічної пам'яті, явищ оборотного і необоротного ефекту пам'яті форми, режимів роботи термочутливих елементів, аналіз застосовності термічних силових приводів в

залежності від кількості циклів роботи і способів ініціювання ефекту пам'яті форми. Розглянуто спосіб регулювання величини генерованих реактивних напружень шляхом варіювання жорсткості протидії контртіла.

Ключові слова: термосиловий привід; ефект пам'яті форми; виконавчий пристрій; виконавчий механізм; термочутливий елемент; робочий орган; технологічне обладнання.

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача проектирования термосиловых приводов для технологического оборудования на базе исполнительных элементов из сплавов с эффектом памяти формы, применение которых в термомеханических двигателях и средствах автоматического регулирования и управления обеспечивает существенные преимущества по сравнению с традиционными приводами. К ним следует отнести высокую надежность, простоту конструкции и управления параметрами, высокую жесткость силовой характеристики при одновременно широком диапазоне скоростей перемещения, низкие массогабаритные показатели. В статье проведен анализ схем реализации возвратно-поступательного движения исполнительного звена малогабаритных устройств для технологического оборудования, обосновывающий выбор схем в виде сопряженных пар: термочувствительный элемент с эффектом памяти формы–возвратный упругий элемент. При этом двунаправленность действия термического силового привода обеспечивается путем комбинации деталей с однонаправленным действием или с использованием обратимого эффекта памяти формы. Приведен анализ возможностей использования видов термочувствительных элементов, видов их деформации, используемых эффектов термомеханической памяти, явлений обратимого и необратимого эффекта памяти формы, режимов работы термочувствительных элементов, анализ применимости термических силовых приводов в зависимости от количества циклов работы и способов иницирования эффекта памяти формы. Рассмотрен способ регулирования величины генерируемых реактивных напряжений путем варьирования жесткости противодействия контртела.

Ключевые слова: термический силовой привод; эффект памяти формы; исполнительное устройство; исполнительный механизм; термочувствительный элемент; рабочий орган; технологическое оборудование.

References

- [1] Anisimov V. B., Vysotskaya K. E., Morozovich A. A. Proektirovanie termosilovikh privodov na baze funktsionalnykh materialov dlya maslyanykh sistem tekhnologicheskogo oborudovaniya [Design of thermal-force drives based on functional materials for oil systems of process equipment]. Materials of the V International Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Engineering Mechanics and Technology of Mechanical Engineering». Mykolaiv: NUK, 2018. pp. 61–62.
- [2] Nikolaev A. L., Polishchuk V. A., Dzhurbyna O. D. Issledovanie i razrabotka adaptivnogo drosselya gidravlicheskoy sistemy vysokotochnykh stankov s dlitelnyim tekhnologicheskim tsiklom [Research and development of an adaptive throttle of the hydraulic system of high-precision machine tools with a long technological cycle]. Bull. NUK of admiral Makarov. Mykolaiv: NUK, 2011. Issue № 2.
- [3] Nikitenko R. V., Krizhanovskiy T. V., Lovgenyuk V. D. Proektirovanie termomekhanicheskikh privodov osnastki metallorezhushchego oborudovaniya [Design of thermomechanical drives of metal-cutting equipment]. Sudnova enerhetyka: stan ta problemy — Ship engineer: state and problems. Materialy VIII mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv, naukovtsiv ta fakhivtsiv. Mykolaiv: NUK, 2017. pp. 341–344.
- [4] Ootsuka K., Simidzu K., Sudzuki Yu. Splavy s efektom pamyati formy [Shape Memory Alloys]. M.: Metallurgiya, 1990. 224 p.
- [5] Vyakhkhi, I. E. Dvizhiteli na materialakh s efektom pamyati formy [Movers on materials with shape memory effect]. Innovatsii. 1999, Issue № 9–10, pp. 97–99.
- [6] Gvozdeva O. Kollerov M., Gusev D., Gurtovaya G., Ruchina N. Funktsionalnye materialy s efektom pamyati formy. Uchebnoe posobie [Functional materials with shape memory effect]. INFRA-M, 2016. 140 p.
- [7] Soloviov S. M., Nikolaiev O. L., Polishchuk V. A. Modeliuvannia dynamiky adaptivnykh deformatsiino-sylovykh elementiv i pryvodiv na osnovi materialiv z efektom pamiaty formy [Modeling of dynamics of adaptive deformation-force elements and drives on the basis of materials with shape memory effect] / Mashynoznavstvo. Lviv, 2004. Issue № 10.
- [8] Khusainov M. A., Malukhina O. A., Andreev V. A. Fazovyie perekhody v splavakh nikelida titana s efektom pamyati formy [Phase transitions in alloys of nickel-titanium with shape memory effect]. Bull. NovGU. Ser.: Physics and Mathematics. 2015. Issue № 3(86). pp. 81–84.
- [9] Malukhina O. A., Filippov D. A. Rabotosposobnost sfericheskikh segmentov iz splavov s efektom pamyati formy pri termomekhanicheskom tsiklirovanii cherez interval martensitnykh prevrashcheniy [Efficiency of spherical segments from alloys with shape memory effect during thermomechanical cycling through the interval

- of martensitic transformations]. International Research Journal, № 07 (61), 2017. Issue 3. Yekaterinburg, 2017, pp. 48–53.
- [10] Patent Ukrainy (na korysnu model) № 101418. Rehuliator temperatury [Temperature controller]/ Pylypchak V. I., Polishchuk V. A., Pylypchak V. V. Bul. № 17, 10.09.2015.
- [11] Polishchuk V. A., Nikolaev A. L., Zadorozhnaya T. P. Determination of Spring Elements Characteristics Using Shape Memory Effect During Thermomechanical Impact [Text]. Scientific Bull. NUK of admiral Makarov. Mykolaiv: NUK, 2016. Issue № 1. pp. 26–29.
- [12] Andreev V. A., Evard M. E., Bondarev A. B., Khusainov M. A. Povrezhdaemost i razrushenie splavov TiNi, proyavlyayushchikh psevdouprugost [Damage and destruction of TiNi alloys exhibiting pseudoelasticity]. Bull. Novgorod State University. Technical science. Velikiy Novgorod : 2006. Issue № 44. pp. 4–8.
- [13] Michutta, J. Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni₄Ti₃ precipitates / J. Michutta, Ch. Somsen, A. Yawny, et al. // ActaMaterialia. 2006. V.54. Issue 13. pp. 3525–3542.
- [14] Andronov I. N. Demina M. Yu., Polugrudova L. S. Pruzhina iz nikelida titana kak ispolnitelnyy mekhanizm biotekhnologicheskikh sistem [Titanium nickelide spring as an actuator for biotechnological systems]. Aktual biotekhnologiya. Voronezh. Issue № 3(10). 2014. pp. 48–49.
- [15] Shishkin S. V. Makhutov N. A. Raschet i proektirovanie silovykh konstruksiy na splavakh s efektom pamyati formy [Calculation and design of power structures on alloys with shape memory effect]. Izhevsk: Research Center «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» – «Regular and chaotic dynamics», 2007. 412 p.
- [16] Kritchenko V. V., Armashov V. P., Beus A. V., Zaikin M. V. Udoskonalennia modelei dynamiki adaptivno kerovanykh elementiv i pryvodiv na osnovi funktsionalnykh materialiv [Improvement of dynamic models of adaptively controlled elements and drives based on functional materials]. Materials of the V International Scientific and Technical Conference “Actual Problems of Engineering Mechanics and Technology of Mechanical Engineering”. Mykolaiv : NUK, 2018. pp. 59–60.
- [17] Andronov I. N. Bogdanov N. P., Ulyasheva L. A. Analiticheskaya model upravleniya fazoy martensita pod nagruzkoy [Analytical model of controlling the phase of martensite under load] Applied mechanics and technical physics. Ukhta State Technical University. Ukhta : 2009. Vol. 50, № 4. pp. 196–200.
- [18] Letenkov O. V. Filippov D. A. Raschet sistemy privoda: pruzhina iz materiala s efektom pamyati formy — kontrapruzhina [Drive system design: spring made of material with shape memory effect — counter spring] International Science Research Journal, Issue № 11 (53), 2016. Part 4. Yekaterinburg, 2016. pp. 77–81.

Постановка проблемы. Важной задачей автоматизации технологических процессов и производств является создание адаптивно управляемых элементов и приводов [1, 2, 3]. В связи с этим заслуживает внимания использование в качестве деформационно-силовых элементов новых функциональных материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) [4, 5, 6], применение которых значительно упрощает систему управления при одновременном расширении возможностей регулирования [2, 7], конструкцию исполнительного механизма за счет объединения в одном элементе термочувствительных и деформационно-силовых функций [8, 9], а также расширяет технологические возможности и уменьшает массогабаритные показатели технических средств [2, 5, 10].

Однако точное проектирование исполнительных термочувствительных элементов (ТЧЭ) с ЭПФ с заданными свойствами затруднено, поскольку кривые напряжение-деформация сплавов с ЭПФ являются нелинейными, модуль сдвига G и постоянная упругости не являются константами и, следовательно, общая методика проектирования термосиловых элементов в этом случае неприменима [11, 12]. Кроме того, кривая напряжение-деформация изменяется в зависимости от термической или деформационной преды-

стории, нет достаточно полных данных относительно свойств при кручении и сложном деформационном воздействии [13, 14].

Анализ последних исследований и публикаций. При выборе сплавов с ЭПФ, удовлетворяющих требованиям практической эксплуатации в приводах технологического оборудования, их оценивают по следующим основным параметрам памяти: а) величине обратимой деформации; б) степени восстановления исходной формы; в) напряжению, генерируемому при нагреве; г) напряжению, необходимому для предварительной деформации [5, 6, 15].

Всегда желательно, чтобы первые три характеристики были максимально большими, а четвертая – минимальной. Для решения конкретных технических задач требуются сплавы с определенными температурами проявления эффекта, шириной температурного интервала восстановления формы, величиной гистерезиса между прямым и обратным превращениями. Поэтому возможность управления этими параметрами в широких пределах является также исключительно важной характеристикой материала, которая определяет масштабы его применения. Для конкурентной способности сплава в технических системах не менее важными являются его техноло-

гические и экономические показатели: прочность, пластичность, удельный вес, стойкость к коррозии, технологичность в изготовлении и т.д., и наконец, себестоимость [4, 9].

Из известных сплавов с ЭПФ лучше всех указанному комплексу свойств соответствуют сплавы на основе трех базовых систем: CuZn (β -латунь), CuAl (алюминиевая бронза) и TiNi (никелид титана) [4, 6, 15]. В табл. 1. сравниваются свойства сплавов наиболее перспективных для практического применения групп. В общем можно отметить, что сплавы TiNi имеют лучшие свойства с точки зрения практического применения и являются лучшей основой для разработки и создания изделий различного функционального назначения для технологических систем, однако сплавы на основе Cu имеют экономические преимущества. Поэтому там, где требуется высокая надежность при большом числе циклов работы, например для регуляторов и приводов, следует применять сплавы TiNi. Наоборот, в таких областях, где указанные свойства не требуются, а число циклов ограничено, как в температурных предохранителях или устройств безопасности, действующих только в аварийных ситуациях, можно применять сплавы на основе Cu (в основном CuZnAl и CuAlNi), учитывая их более низкую стоимость.

Существующие в настоящее время модели и методы по оценке деформационно-силовых характеристик [7, 11, 16, 17] не охватывают весь спектр вопросов, связанных с проектированием термосиловых приводов (ТСП). Поэтому создание научно обоснованной элементной базы термосиловых приводов, учитывающей последние исследования материалов с ЭПФ и факторов, влияющих на их свойства, будет способствовать более широкому использованию ТСП на базе ТЧЭ с ЭПФ и решению конструкторско-технологических вопросов, связанных с данным типом приводов для малогабаритных исполнительных механизмов технологических систем.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка элементной базы термосиловых приводов и требований к ним, которые коррелируют с условиями эксплуатации оборудования и оснастки технологических систем.

Основной материал. Для выбора схемы построения ТСП рассмотрим их параметры, приводящие к изменению начального положения или состояния выходного звена, и термомеханические характеристики сплава с ЭПФ, которые должны быть определены с учетом вида движения, конструкции механизма, его геометрических, силовых и других параметров. При этом, большинство учитываемых факторов определя-

Таблица 1. Сравнение свойств сплавов с ЭПФ на основе TiNi, CuAl и CuZn

Сплав с ЭПФ		TiNi-X (где X = Cu, Fe, Co, Al, Pd, Pt, Au)	Сплавы на основе CuAl (CuAlNi, CuAlFe, CuAlMn)	Сплавы на основе CuZn (CuZnAl, CuZnSn, CuZnSi)
Характеристики	Силовые: 1. Напряжения восстановления формы, МПа 2. Максимальная удельная мощность, Вт/кг 3. Работоспособность, Дж/см ³	400...700 до 16000 (при частоте 10 Гц) до 10 за цикл	250...440 — ~ 4 за цикл	200...250 — ~ 3 за цикл
	Деформационные: 1. Величина возврата деформации, % 2. Обратимая деформация, % 3. Пластичность	8...10 2...4 высокая	2...3 — низкая	4 0,5...2 довольно высокая
	Температурные: 1. Термическая стабильность 2. Интервал проявления ЭПФ, °C 3. Гистерезис превращения, °C 4. Интервал формовосстановления, °C	высокая (до 1200°C) -200...+500 2...65 5...40	низкая (до 150°C) -150...+100 6...80 5...90	низкая (до 200°C) -200...+100 10...70 5...120
	Цикловая долговечность при $\epsilon = 0,02$ при $\epsilon = 0,005$	 10 ⁵ 10 ⁷	проблемы интеркристаллитного разрушения 10 10 ³	 10 ² 10 ⁵
	Коррозионная стойкость	высокая химическая стойкость	низкая химическая стойкость	существуют проблемы, особенно в отношении коррозионной стойкости под напряжением
	Обрабатываемость давлением	хорошая	довольно плохая	довольно плохая
	Обработка с целью получения ЭПФ	сравнительно простая	довольно трудная	довольно трудная
	Себестоимость	высокая	довольно низкая	довольно низкая

ется функциональным назначением ТСП в технологической системе: величины развиваемых усилий и перемещений, прочность при циклическом нагружении, количество циклов срабатывания, технологичность, удобство конструкторской компоновки, способ инициирования срабатывания и т.п.

1. *Вид термочувствительного элемента.* Геометрические размеры ТЧЭ оказывают существенное влияние на реализацию эффектов памяти. Это обусловлено неоднородностью деформации по объему материала и неодновременностью фазовых превращений в объемах, расположенных на разном расстоянии от поверхности теплообмена, которая определяется градиентом температур по сечению при нагреве и охлаждении. Поэтому ТЧЭ должны иметь минимально возможное поперечное сечение при максимально возможной площади внешней поверхности, что особенно важно для обеспечения быстродействия и циклической стойкости. В противном случае нестационарность процессов, происходящих в материале ТЧЭ, вызывает накопление необратимых кристаллографических изменений (остаточные напряжения, инициирование необратимых источников деформации и т.д.), что приводит к ухудшению характеристик ЭПФ. В связи с этим наиболее доступными для применения и простыми при прогнозировании показателей являются элементы, выполненные из проволоки или пластин небольшого поперечного сечения.

2. *Вид деформации ТЧЭ.* По виду деформации, реализуемой при восстановлении формы ТЧЭ, ТСП разделяются на конструкции с рабочими элементами сжатия, растяжения, кручения, изгиба и сложного нагружения. Деформация растяжения-сжатия инициирует наибольшие реактивные напряжения при реализации ЭПФ, однако требует относительно высоких напряжений наведения. При деформации изгиба, наоборот, ТЧЭ характеризуется большими перемещениями, но малыми развиваемыми усилиями. Отметим перспективность применения элементов с ЭПФ, реализующих деформацию кручения. При этом достигается достаточно высокий уровень реактивных напряжений и обратимых деформаций. Для осуществления прямолинейного возвратно-поступательного перемещения элементы, работающие на кручение, можно изготавливать в виде пружин сжатия-растяжения различных типов.

3. *Вид используемого эффекта термомеханической памяти.* В большинстве случаев в элементах ТСП при нагреве реализуется ЭПФ (рабочий ход), а при охлаждении – эффект пластичности превращения (холостой ход). С точки зрения повышения к.п.д. привода целесообразно (даже частичное) использование обратимого ЭПФ. При этом будет наблюдаться значительное снижение напряжений наведения и, соответственно, отрицательной работы цикла, вследствие полной или частичной самодеформации ТЧЭ в процессе охлаждения.

4. *Направление действия ТЧЭ.* Явление ЭПФ является необратимым и однонаправленным. Однонаправленные ТЧЭ находят применение в устройствах,

где число рабочих циклов ограничено одним (либо возврат в исходное положение после рабочего хода осуществляется вручную).

Для обеспечения характеристик двунаправленного действия, т.е. обратимости изменения формы при термоциклировании элемента применяется специальная обработка сплавов с использованием свойств самого сплава или, используя однонаправленный сплав, обеспечивают двунаправленность действия устройств путем установки контртела. Такие приводы можно классифицировать по используемому контрвоздействию: гравитационные, пружинные, дифференциальные, с контрвоздействием среды.

5. *Режим работы.* Необходимо различать три основных режима работы ТЧЭ в составе привода: 1) режим фиксированных усилий, при котором напряжения остаются постоянными на этапах охлаждения (σ_n) и нагрева (σ_c), хотя $\sigma_n \neq \sigma_c$; 2) режим заданных деформаций – накладываются ограничения на предельные значения деформации материала, а напряжения, создаваемые в рабочем элементе, не лимитируются; 3) свободный деформационно-силовой режим.

6. *По количеству циклов работы ТСП* можно разделить на приводы однократного действия (температурные предохранители, устройства безопасности, действующие только в аварийных ситуациях) и циклического действия (исполнительные механизмы, переключатели, тепловые двигатели и т.п.). Приводы однократного действия после срабатывания заменяются новыми, или приводятся в рабочее состояние в ручном режиме.

7. *Способ инициирования ЭПФ.* Рабочий ход ТЧЭ привода обеспечивается любыми способами нагрева (в интервале температур обратного фазового превращения), реализация которых зависит от вида и геометрических параметров механизма, вида оборудования, способа закрепления, условий сопряжения с соседними элементами и т.д. Нагрев может осуществляться непосредственным пропусканием тока через рабочий элемент, либо косвенным способом: нагрев горячей средой, высокочастотный индукционный нагрев, инфракрасное и лазерное излучения.

8. *Жесткость противодействия.* Величина и кинетика развития реактивных напряжений, генерируемых при реализации ЭПФ, в значительной степени определяются жесткостью K системы. При $K = 0$ формовосстановление в свободном от напряжений состоянии приводит к полному или частичному возврату заданной деформации и напряжения не возникают. Напротив, при абсолютно жестком противодействии, когда $K \rightarrow \infty$, восстановление формы запрещено и в материале генерируются максимальные усилия, величина которых определяется степенью предварительной деформации ϵ_n и механическими свойствами материала.

В общем случае при постоянных значениях ϵ_n максимальные реактивные напряжения σ_p^{\max} возрастают при увеличении жесткости противодействия K (однако при этом снижается восстанавливаемая деформация памяти формы ϵ_n).

Оценка характера развития реактивных напряжений [11, 18] для различных вариантов этого процесса позволяет заключить, что максимальная полезная работа достигается при максимальной жесткости противодействия на начальной стадии процесса (необходимо достичь максимально допустимых напряжений, но не выше предела текучести σ_T исходной фазы), и минимальной жесткости противодействия на основной стадии процесса формовосстановления при максимально допустимом напряжении.

Исследования работоспособности ТЧЭ [9, 14, 15] показывают, что наиболее силовыми являются линейные и полукольцевые элементы. Преимущество линейных элементов заключается в простоте исполнения и удачном объединении наибольших развиваемых усилий с малой тепловой инерционностью при использовании набора элементов с диаметром 0,1...1,0 мм. К недостаткам необходимо отнести малый рабочий ход, определяемый величиной исходной деформации (составляет 6...8 % длины элемента). В свою очередь полукольцевые элементы, при несколько меньших величинах генерируемых усилий, имеют значительно большие значения перемещений (табл. 2).

При использовании в качестве ТЧЭ линейных образцов (провода, стержень) если восстанавливаемой деформации недостаточно для обеспечения требуемого рабочего хода, необходимо посредством применения соответствующей кинематической схемы увеличить величину перемещения выходного звена. Затем на основе анализа кинематики определить взаимосвязь усилий и перемещений в выходном звене и ТЧЭ. При построении диаграммы рабочего цикла эта взаимосвязь учитывается коэффициентами редукции перемещений и усилий.

Однако усложнение кинематической схемы зачастую не выгодно с точки зрения простоты конструкции, управления, надежности. В связи с этим для

увеличения рабочего хода исполнительные элементы ТСП целесообразно изготавливать в виде спиралей с ЭПФ (такой элемент имеет сочетание изгибной деформации и кручения). Это позволяет также варьировать величины усилия и рабочего хода в достаточно широких пределах.

При использовании пружинных ТЧЭ растяжения-сжатия появляется возможность получить такой же рабочий ход, как и в электромагнитных соленоидах, гидравлических и пневматических цилиндрах при значительном упрощении конструкции устройства в целом. Применение сплавов с ЭПФ для изготовления витых пружин существенно расширит области использования данных конструктивных элементов, позволит предложить новые решения ряда задач благодаря переходу от «пассивной» аккумуляции упругой энергии к «активному» превращению тепловой энергии в механическую, или комбинированию этих свойств в пружинных ТЧЭ.

Положительными качествами ТЧЭ пружинного типа являются простота крепления, возможность компоновки в цилиндрических корпусах, большие значения перемещений, небольшая величина напряжений наведения при сравнительно высоком уровне реактивных напряжений (что позволяет использовать в качестве контртел возвратные пружины небольшой жесткости), простота регулировки указанных параметров и температурного интервала срабатывания, высокая циклическая стойкость. Это дает возможность рекомендовать пружинные элементы при разработке различных регулирующих устройств, малогабаритной арматуры, приводов циклического действия для различных устройств, применяемых в технологических системах [1, 3, 5, 10, 14, 18].

Для сочленения ТСП с регулирующими органами различных устройств технологических систем зачастую необходимо применение механических связей, расчет которых сводится к обеспечению соответствия:

Таблица 2. Сравнение деформационно-силовых характеристик исполнительных элементов с ЭПФ

Тип силового элемента	Характеристики элементов						Силовые параметры		
	Длина, мм		Диаметр проволоки d , мм	Радиус изгиба R , мм	Количество витков, n	Шаг t , мм	Полезный ход Δl , мм	Начальное усилие поджатия N_0 , Н	Максимальное усилие N_{max} , Н
	l_{min}	l_{max}							
Линейный	100	102	0,5	-	-	-	1,6	80	120
		108					8,0	400	600
	100	102	2,0	-	-	-	1,6	1200	1800
		108					8,0	6000	9000
Полукольцевой	100	115	0,5	2,75	2	3,5	10,0	40	120
	100	160	2,0	7,0	2	14	40,0	600	1800
Пружинный	6,5	30,1	0,5	3,0	10	3	5,0	10	35
	26,4	60,8	2,0	3,1	12	5	23,0	13	108
	27,6	73,1	2,0	3,15	12	6	34,0	17,5	113
	28,1	85,5	2,0	3,15	12	7	43,0	26	126
	28,9	96,6	2,0	3,15	12	8	50,0	31	140
	6	15	2,0	7,0	3	5	2,0	23	70
	12	30	4,0	13,0	3	10	12,0	150	300

1) статической характеристики кинематической передачи;

2) перестановочного усилия ТСП требуемому усилию (моменту) рабочего органа (РО);

3) полных ходов выходного элемента ТСП и РО.

Расчет механических связей для сочленения ТСП с РО заключается в определении передаточного отношения кинематических цепей и их моментов в соответствии с перестановочными усилиями механизмов и требуемыми усилиями для перемещения РО. В общем случае этот расчет сводится к нахождению следующих равенств:

$$N_{пу} = N_{ро} \frac{S_{ро}}{S_{им}} \text{ или } N_{пу} = N_{ро} K_{кц},$$

где $N_{пу}$ — перестановочное усилие ТСП; $N_{ро}$ — усилие, необходимое для перемещения РО; $S_{ро}$ — ход РО; $S_{им}$ — ход выходного элемента ТСП; $K_{кц}$ — передаточное отношение кинематической передачи.

Однако при практических решениях для обеспечения работоспособности всего ИУ принимают, что перестановочный момент ТСП больше момента рабочего органа не менее чем на 10...15%, тогда

$$N_{пу} = (N_{ро} + 0,1N_{пу})K_{кц}.$$

Исходными данными для таких расчетов являются:

1. Величина перестановочного усилия на выходном элементе ТСП (определяется на основании силового расчета ТСП).

2. Величина усилия, требуемого для перемещения РО (для стандартных РО определяется по справочной литературе, для специальных – на основании предварительных расчетов).

3. Значения коэффициентов передачи для исполнительного устройства и механической связи.

4. Требования к механической связи в отношении линеаризации характеристики регулирующего органа.

5. Точные координаты предполагаемой установки РО и возможные варианты размещения ТСП с учетом эксплуатационных требований по обслуживанию.

6. Дополнительные требования, касающиеся конструкции кинематической связи (например, наличие узлов настройки для изменения передаточного отношения).

Обсуждение полученных результатов. 1. Анализ схем реализации возвратно-поступательного движения исполнительного звена малогабаритных устройств для технологического оборудования, позволяет остановить выбор на простейших схемах в

виде сопряженных пар: ТЧЭ с ЭПФ и возвратный элемент из традиционного материала (пружина постоянной жесткости). При этом двунаправленность действия ТСП обеспечивается путем комбинации деталей с однонаправленным действием (метод смещения), когда деформация ТЧЭ осуществляется с помощью соответствующей внешней силы смещения при его охлаждении.

2. Двунаправленность действия целесообразно обеспечивать также, используя обратимый ЭПФ, что приведет к уменьшению размеров элементов ТСП, упростит конструкцию, повысит к.п.д. привода.

3. В связи с фактором жесткости противодействия необходимо учитывать влияние зазора между ТЧЭ и контртелом (или другими сопряженными деталями) на величину развиваемых усилий. Поскольку при наличии зазора (свободного хода) восстановление формы элемента частично происходит при $K = 0$, то на генерирование реактивных напряжений идет меньшая доля энергии процесса. При этом σ_p^{\max} будет пропорционально доле деформации наведения ϵ_n , участвующей в процессе возврата с момента контакта ТЧЭ с контртелом или РО (после выбора зазора). Таким образом варьирование жесткости позволяет в необходимой степени регулировать величину σ_p , что важно с практической точки зрения.

ВЫВОДЫ. Проведен анализ схем реализации возвратно-поступательного движения исполнительного звена малогабаритных устройств для технологического оборудования, обосновывающий выбор схем в виде сопряженных пар: термочувствительный элемент с эффектом памяти формы — возвратный упругий элемент. При этом двунаправленность действия термического силового привода обеспечивается путем комбинации деталей с однонаправленным действием или с использованием обратимого эффекта памяти формы. Приведены анализ возможностей использования и рекомендации по применению видов термочувствительных элементов, видов деформации ТЧЭ, используемых эффектов термомеханической памяти, явлений обратимого и необратимого эффекта памяти формы, режимов работы ТЧЭ, анализ применимости термических силовых приводов в зависимости от количества циклов работы и способов инициирования эффекта памяти формы для термосиловых приводов технологического оборудования. Рассмотрен способ регулирования величины генерируемых реактивных напряжений путем варьирования жесткости противодействия контртела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Анисимов, В. Б. Проектирование термосиловых приводов на базе функциональных материалов для масляных систем технологического оборудования / В. Б. Анисимов, К. Е. Высоцкая, А. А. Морозович / Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування». Миколаїв: НУК, 2018. С. 61–62.
- [2] Николаев, А. Л. Исследование и разработка адаптивного дросселя гидравлической системы высокоточных станков с длительным технологическим циклом [Текст] / О. Л. Николаев, В. А. Полішук, О. Д. Джурбина / Зб. наук. пр. НУК. Миколаїв: НУК, 2011. № 2.

- [3] **Никитенко, Р. В.** Проектирование термомеханических приводов оснастки металлорежущего оборудования / Р. В. Никитенко, Т. В. Крижановский, В. Д. Ловгенюк / Суднова энергетика: стан та проблеми: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2017. С. 341–344.
- [4] **Ооцука, К.** Сплавы с эффектом памяти формы [Текст] / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки // Под ред. Х. Фунакубо. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
- [5] **Вяххи, И. Э.** Двигатели на материалах с эффектом памяти формы [Текст] / И. Э. Вяххи / Инновации. 1999, № 9–10, С. 97–99.
- [6] **Гвоздева, О.** Функциональные материалы с эффектом памяти формы. Учебное пособие [Текст] / О. Гвоздева, М. Коллеров, Д. Гусев, Г. Гуртовая, Н. Ручина / ИНФРА-М, 2016. 140 с.
- [7] **Соловійов, С. М.** Моделювання динаміки адаптивних деформаційно-силових елементів і приводів на основі матеріалів з ефектом пам'яті форми [Текст] / С. М. Соловійов, О. Л. Ніколаєв, В. А. Поліщук / *Машинознавство*. Львів, 2004. № 10.
- [8] **Хусаинов, М. А.** Фазовые переходы в сплавах никелида титана с эффектом памяти формы [Текст] / М. А. Хусаинов, О. А. Малухина, В. А. Андреев // *Вестник НовГУ. Сер.: Физико-математические науки*. 2015. № 3(86). С. 81–84.
- [9] **Малухина, О.А.** Работоспособность сферических сегментов из сплавов с эффектом памяти формы при термомеханическом циклировании через интервал мартенситных превращений [Текст] / О. А. Малухина, Д. А. Филиппов / *Международный Научно-Исследовательский Журнал*, № 07 (61), 2017. Часть 3. Екатеринбург, 2017, С. 48–53.
- [10] **Патент України** (на корисну модель) № 101418. Регулятор температуры / Пилипчак В. І., Поліщук В. А., Пилипчак В. В. Бюл. № 17, 10.09.2015 р.
- [11] **Polishchuk, V. A.** Determination of Spring Elements Characteristics Using Shape Memory Effect During Thermomechanical Impact [Text] / V. A. Polishchuk, A. L. Nikolaev, T. P. Zadorozhnaya / *Збірник наук. праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2016. № 1. С. 26–29.
- [12] **Андреев, В. А.** Повреждаемость и разрушение сплавов TiNi, проявляющих псевдоупругость / В. А. Андреев, М. Е. Эвард, А. Б. Бондарев, М. А. Хусаинов / *Вестник Новгородского государственного университета. Технические науки*. Великий Новгород : 2006. № 44. С. 4–8.
- [13] **Michutta, J.** Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni₄Ti₃ precipitates / J. Michutta, Ch. Somsen, A. Yawny, et al. // *ActaMaterialia*. 2006. V. 54. Issue 13. pp. 3525–3542.
- [14] **Андронов, И. Н.** Пружина из никелида титана как исполнительный механизм биотехнологических систем [Текст] / И. Н. Андронов, М. Ю. Демина, Л. С. Полугрудова / *Актуальная биотехнология*. Воронеж. № 3(10). 2014. С. 48–49.
- [15] **Шишкин, С. В.** Расчёт и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы [Текст] / С. В. Шишкин, Н. А. Махутов / Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. 412 с.
- [16] **Крітченко, В. В.** Удосконалення моделей динаміки адаптивно керованих елементів і приводів на основі функціональних матеріалів / В. В. Крітченко, В. П. Армашов, А. В. Беус, М. В. Зайкін / *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування»*. Миколаїв : НУК, 2018. С. 59–60.
- [17] **Андронов, И. Н.** Аналитическая модель управления фазой мартенсита под нагрузкой [Текст] / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, Л. А. Уляшева / *Прикладная механика и техническая физика*. Ухтинский государственный технический университет. Ухта : 2009. Т. 50, № 4. С. 196–200.
- [18] **Летенков, О. В.** Расчет системы привода: пружина из материала с эффектом памяти формы — контрпружина [Текст] / О. В. Летенков, Д. А. Филиппов / *Международный Научно-Исследовательский Журнал*, № 11 (53), 2016. Часть 4. Екатеринбург, 2016. С. 77–81.

© В. А. Поліщук, О. Л. Ніколаєв, С. Ж. Боду, В. С. Білошапка

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*