

# Машиностроение и машиноведение

УДК 62-97, 62-98

doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-3-10

## Разработка многозвенного силопривода из материала с эффектом памяти формы

В.К. Алехина, И.А. Пфетцер, В.А. Глушченков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

## Development of a Multi-link Power Drive Made of a Material with a Shape Memory Effect

V.K. Alekhina, I.A. Pfetzer, V.A. Glushchenkov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

Эффект памяти формы — явление, при котором пластически деформированный металл восстанавливает исходную форму в результате нагрева. Этот эффект часто используют как силопривод в различных устройствах деформирования, исполнительных механизмах и т. д. Приведены конструкции многозвенных силоприводов из материала с эффектом памяти формы. В качестве рабочих элементов таких силоприводов предложено использовать термически тонкие элементы, выполненные, например, в виде проволоки из сплава ТН-1. Рассмотрены конструкции из составных многозвенных силовых элементов, которые соединены параллельно. Исследована эффективность развития усилий деформирования, создаваемых силоприводами из материала с эффектом памяти формы. Для их исследования разработан специальный испытательный стенд, позволяющий фиксировать несколько переменных в едином временном масштабе.

**Ключевые слова:** никелид титана, эффект памяти формы, испытательный стенд, силопривод, неравномерность нагрева

The shape memory effect is a phenomenon in which a plastically deformed metal restores its original shape as a result of heating. This effect is often used in engineering as actuators in various types of deformation devices, actuators, etc. In the proposed article, the designs of multi-link actuators made of a material with a shape memory effect are presented. As working elements of such power drives, it is proposed to use thermally thin elements made, for example, in the form of a wire made of TN-1 alloy. Particular attention is paid to the creation of structures from composite multi-link power elements that are connected in parallel and to the study of the effectiveness of the development of deformation forces developed by power drives from a material with a shape memory effect, and new design solutions. For the study, a specialized measuring stand was created that allows fixing several variables on a single time scale. Examples of the developed devices are illustrated with corresponding diagrams and photographs.

**Keywords:** titanium nickelide, shape memory effect, test bench, power drive, heating unevenness

Явление, при котором пластически деформированный металл восстанавливает исходную форму в результате нагрева [1, 2], называют эффектом памяти формы. Его часто используют как силовой привод в различных устройствах деформирования, исполнительных механизмах и т. д. [3, 4].

**Постановка вопроса.** Среди всех сплавов, обладающих эффектом памяти формы, наибольший интерес представляет никелид титана (сплав никеля и титана), так как он может развивать высокое напряжение при минимальном перемещении [5–7].

При использовании таких силовых приводов из материала с эффектом памяти формы обнаружено снижение их эффективности с возрастанием площади поперечного сечения. Так, для получения усилия, развиваемого силовым приводом в несколько тысяч ньютонов, потребовалось увеличить диаметр стержневого силового элемента (СЭ) до 20...25 мм.

При испытаниях стержневых СЭ выявлено значительное снижение развиваемых усилий. Возможной причиной такого поведения СЭ является неравномерность его нагрева по сечению [8]. Наружные слои стержня вследствие лучистого теплообмена достигали температуры реализации эффекта памяти формы и были готовы проявить заложенную деформацию, однако внутренние холодные слои не давали возможности для ее реализации.

Для проверки этого предположения проведен поисковый эксперимент. В качестве объекта исследования выбран СЭ, состоящий из втулки 1 и оси 2 (рис. 1, а), обеспечивающий хороший термический контакт между ними. Посадка скольжения давала возможность их взаимного перемещения.

При достижении втулкой температуры мартенситного превращения ее осевой размер увеличивается согласно сообщенной материалу памяти, а размер непрогретого до этой температуры центра остается неизменным (рис. 1, б).

Следовательно, для эффективной работы силового привода необходимо обеспечить равномерность его нагрева по сечению.

Цель статьи — разработать универсальные конструкции многозвенных силовых приводов из материала с эффектом памяти формы и обеспечением требуемых усилий и перемещений.

Для достижения этого условия СЭ должен быть термически тонким телом, т. е. критерий Био ( $Bi$ ), характеризующий отношение количества теплоты, подводимого к поверхности тела и отводимого от нее к внутренним слоям в результате теплопроводности, и численно равный отношению коэффициента теплоотдачи к поверхности тела  $\alpha$ , умноженного на его толщину  $l$ , к коэффициенту его теплопроводности  $\lambda$ , не должен превышать 0,2:  $Bi = \alpha l / \lambda \leq 0,2$  [9].

Если неравномерность нагрева по сечению СЭ снижает эффективность его работы, то логично сделать предположение о влиянии неравномерности нагрева СЭ по длине на развиваемое усилие силового привода.

Для проверки этого предположения выполнен следующий эксперимент. В качестве СЭ использовали проволоку из сплава ТН-1. Проволоку диаметром 1,5 мм нагревали пропуском по нему электрического тока. Точки подключения тока обеспечивали необходимую для эксперимента неравномерность нагрева вдоль оси проволоки (рис. 2).

Во всех случаях температура нагрева СЭ составляла 110 °С. Эффективность СЭ оценивали по развиваемому усилию памяти. В результате

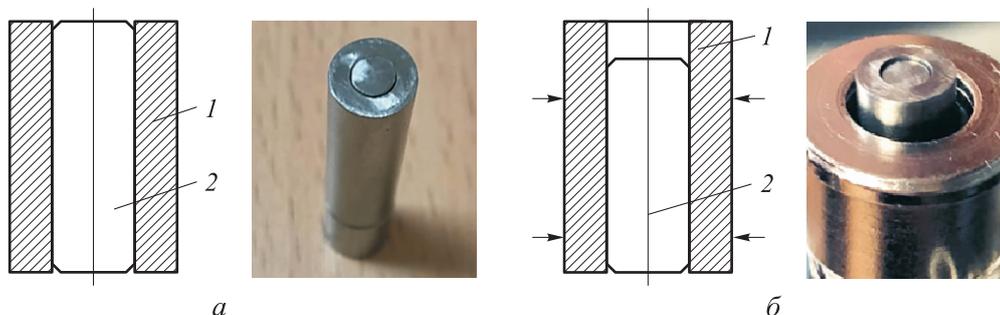


Рис. 1. Конструктивные схемы (слева) и внешний вид (справа) составного СЭ до (а) и после (б) нагрева

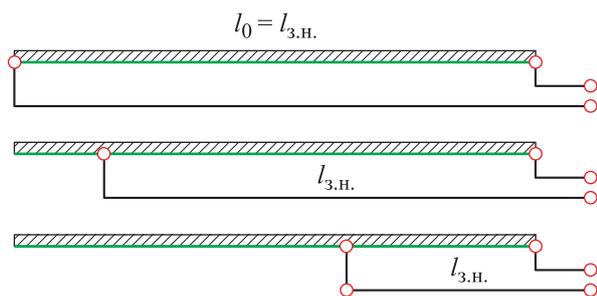


Рис. 2. Схема подключения тока к проволочному силовому элементу:

○ — точки подключения электрического тока;  
 $l_0$  — исходная длина СЭ;  $l_{з.н.}$  — длина зоны нагрева

эксперимента установили, что возникновение неравномерности нагрева по длине СЭ снижает развиваемое усилие.

**Предлагаемое техническое решение.** 3D-модели новых конструкций многозвенного силопривода из термически тонких СЭ (труб, листов, лент, полос, проволоки), соединенных в единый корпус [10–12], приведены на рис. 3.

К основным характеристикам СЭ с эффектом памяти формы относятся максимальное развиваемое усилие и время срабатывания, т. е. время рабочего цикла нагрев — охлаждение.

Термически тонкое тело (проволока, пластина, стержень) обеспечивает равномерность нагрева по сечению и значительно облегчает «наведение» эффекта памяти формы, не требуя приложения значительных усилий.

Экспериментальная проверка подтвердила факт сложения усилий, создаваемых каждым СЭ в единое усилие силопривода. Так, силопривод из пяти проволочных СЭ диаметром

1 мм с усилием 300 Н каждый развивает общее усилие силопривода, составляющее около 1500 Н.

**Нагрев и охлаждение СЭ.** Для циклической работы силопривода необходимо выполнять многократный нагрев и охлаждение СЭ. В целях выбора наиболее эффективного (быстрого и экономичного) метода нагрева рассматривали три схемы нагрева СЭ (рис. 4): пропусканием через СЭ электрического тока [13], обдувом СЭ нагретым воздушным потоком (конвективный теплообмен) и нагревом в электропечи (лучистый теплообмен).

Независимо от метода нагрева охлаждение СЭ осуществляли конвективным теплообменом — обдувом холодным потоком воздуха. В этом случае время охлаждения СЭ до температуры внешней среды (20...30 °С) составляло 7...10 с, что намного меньше, чем при естественной конвекции (300...500 с).

Как указывалось ранее, для эффективной работы СЭ необходимо обеспечить его равномерный нагрев по сечению и длине.

Распределение температуры нагрева по СЭ, определение времени нагрева до температуры мартенситного превращения в зависимости от его формы, размеров и метода нагрева можно оценить, используя математическое моделирование тепловых процессов [14]. Для моделирования тепловых процессов, протекающих при нагреве СЭ, использовали программный комплекс ANSYS Mechanical.

*Нагрев СЭ пропусканием через него электрического тока.* Этот процесс моделировали с по-

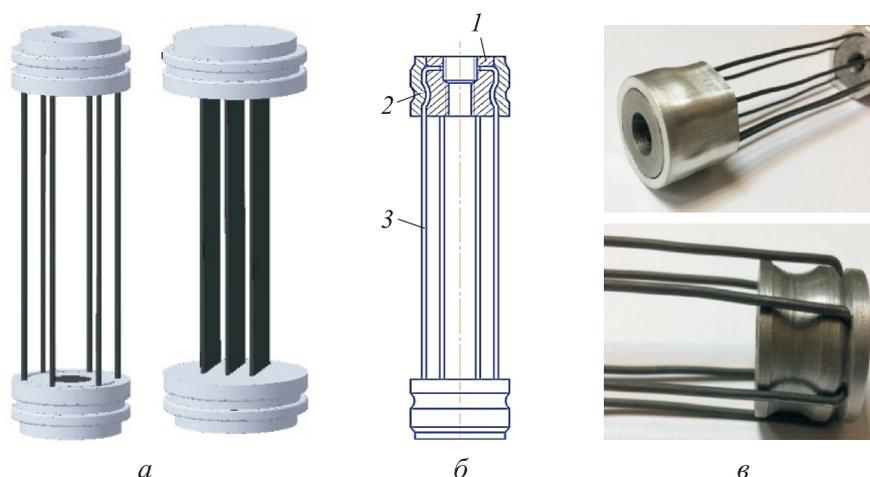


Рис. 3. 3D-модели (а), конструктивная схема (б) и внешний вид (в) многозвенного силопривода из термически тонких СЭ:

1 — основание; 2 — кольцо; 3 — СЭ

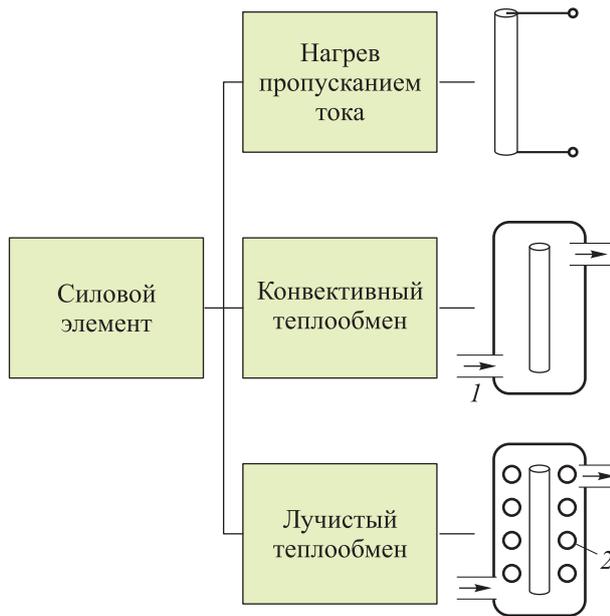


Рис. 4. Методы нагрева силовых элементов:  
1 — тепловой поток; 2 — электропечь

мощью связанного электротеплового расчета, используя два модуля Electric и Transient Thermal. В первом модуле определяли электрическое поле и протекающий по проводнику ток, во втором — время, необходимое для нагрева СЭ из проволоки до рабочей температуры  $T_p = 110^\circ\text{C}$ . Варьируемыми параметрами являлись диаметр проволоки и сила тока.

Результаты моделирования нагрева СЭ пропусканием через него электрического тока — значения времени нагрева СЭ из проволоки диаметром  $d = 1,0; 1,5$  и  $2,0$  мм до рабочей температуры при силе тока  $I = 10, 20$  и  $30$  А — приведены в табл. 1.

*Нагрев СЭ конвективным теплообменом.* Этот процесс моделировали, используя принципы CFD-расчетов в программном комплексе ANSYS CFX. Варьируемыми параметрами являлись диаметр проволоки и скорость воздушно-

Таблица 1

Результаты моделирования нагрева СЭ пропусканием через него электрического тока

Диаметр проволоки, мм	Время нагрева проволоки, с, при силе тока, А		
	10	20	30
1,0	1,09	0,27	0,12
1,5	5,68	1,42	0,63
2,0	17,89	4,35	1,95

го потока (в турбулентном режиме обдува) — скорость потока на входе.

Результаты моделирования нагрева СЭ конвективным теплообменом — значения времени нагрева СЭ из проволоки диаметром  $d = 1,0; 1,5$  и  $2,0$  мм до рабочей температуры при скорости потока на входе  $v_n = 10, 20$  и  $30$  м/с — приведены в табл. 2.

Результаты расчета показали, что при конвективном теплообмене время нагрева СЭ из проволоки значительно выше, чем при нагреве пропусканием тока.

*Нагрев СЭ лучистым теплообменом.* Для расчета этого процесса смоделировали нагревательное тело, излучающее тепло. В качестве нагревательного тела выступал элемент в виде спирали из материала с высокой проводимостью.

Для моделирования использовали два модуля Steady: State Thermal и Transient Thermal. Варьируемыми параметрами являлись диаметр проволоки и температура спирали.

Результаты моделирования нагрева СЭ лучистым теплообменом — значения времени нагрева СЭ из проволоки диаметром  $d = 1,0; 1,5$  и  $2,0$  мм до рабочей температуры при температуре спирали  $T_{сп} = 400, 600$  и  $800^\circ\text{C}$  — приведены в табл. 3.

Моделирование тепловых процессов при использовании различных методов нагрева и ти-

Таблица 2

Результаты моделирования нагрева СЭ конвективным теплообменом

Диаметр проволоки, мм	Время нагрева проволоки, с, при скорости потока на входе, м/с		
	10	20	30
1,0	59,95	45,52	22,11
1,5	83,15	70,49	39,43
2,0	111,22	88,72	55,04

Таблица 3

Результаты моделирования нагрева СЭ лучистым теплообменом

Диаметр проволоки, мм	Время нагрева проволоки, с, при температуре спирали, $^\circ\text{C}$		
	400	600	800
1,0	89,95	29,57	13,32
1,5	132,01	44,51	19,32
2,0	175,01	58,72	25,63

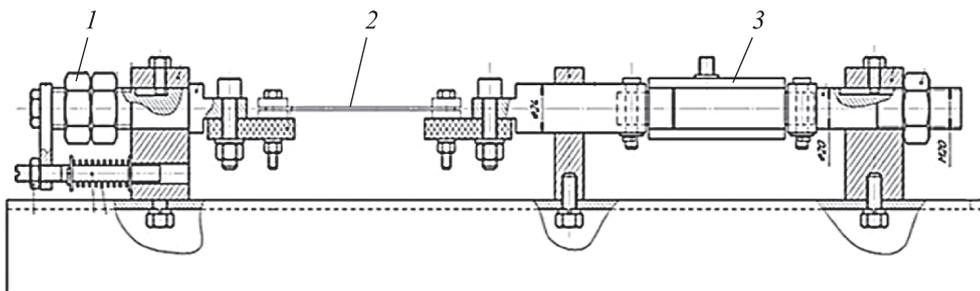


Рис. 5. Схема испытательного стенда:  
1 — упор; 2 — проволока с памятью формы; 3 — датчик усилия

пов СЭ позволило подтвердить равномерность их нагрева по длине и сечению, а также вычислить время их нагрева до рабочей температуры.

Выбор типа СЭ должен определяться не одним параметром (производительностью деформирующих устройств), а совокупностью параметров, и в первую очередь требуемым усилием. Например, для СЭ из проволоки сечением 1 мм<sup>2</sup> развиваемое усилие составляет 300...400 Н. Чтобы создать усилие 1500 Н, необходимое для получения типовой детали, потребуется пять СЭ из проволоки или один СЭ из пластины сечением 1×5 мм.

Кроме того, выбор метода нагрева, формы и геометрических размеров СЭ зависит от конструктивных и технологических особенностей создаваемого силопривода.

**Исследование эксплуатационных свойств СЭ.**

Для исследования эксплуатационных свойств термически тонких СЭ из материала с эффектом памяти формы создан специальный испытательный стенд (рис. 5), позволяющий в едином временном масштабе фиксировать варьируемые параметры СЭ из проволоки.

Экспериментальные исследования, выполненные с помощью специального стенда, позволили получить зависимость развиваемого СЭ усилия деформирования от перемещения. Установленные закономерности изменения развиваемого усилия можно учитывать при проектировании СЭ в режиме реализации ими рабочих нагрузок.

Также результатами экспериментального исследования стали параметры, приведенные в табл. 4, на основе которых построена зависимость скорости развития рабочих усилий деформирования, создаваемого СЭ, от скорости его нагрева (рис. 6).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для определения производительности деформирующих устройств с силоприводом из материала с эффектом памяти формы следует учитывать не только температуру нагрева СЭ до температуры мартенситного превращения, но, и что более важно, скорость нагрева, так как она определяет скорость развития рабочих усилий деформирования.

Для обеспечения стабильности (статистической обработки результатов экспериментов) замер параметров на стенде проводили не менее пяти раз. Приведенные графики отражают результаты (доверительный интервал) с надежностью 95 %.

**Возвратное усилие.** При охлаждении СЭ не все кристаллы возвращаются в исходное состояние, что влияет на конечные размеры силопривода. Для его многоциклового использования необ-

Таблица 4  
Результаты экспериментального исследования

Сила тока, А	Время нагрева СЭ, с	Скорость нагрева СЭ, °С/с	Скорость развития рабочих усилий деформирования, Н/с
30	3,1	25,80	459,93
20	3,9	10,26	235,35

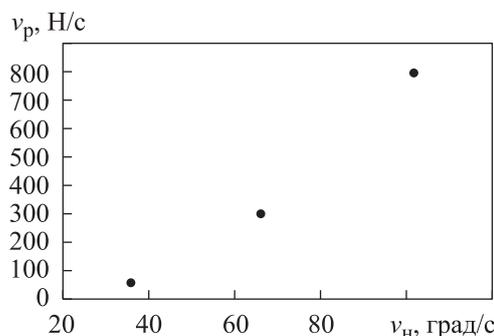


Рис. 6. Зависимость скорости развития рабочих усилий деформирования  $v_p$  от скорости нагрева СЭ  $v_n$



Рис. 7. 3D-модель (а) и внешний вид (б) многозвенного силопривода

ходимо создавать дополнительное усилие, обеспечивающее полный возврат кристаллической решетки в исходное положение.

Результаты экспериментального исследования позволили определить зависимость остаточных деформаций  $\Delta h$  от возвратного усилия  $P_v$ :

$P_v$ , Н (кгс) ...	9,8 (1)	19,6 (2)	29,4 (3)	39,2 (4)	49,0 (5)
$\Delta h$ , мм .....	0,03	0,04	0,02	0,001	0

Установлено, что возвратное усилие должно составлять (с коэффициентом запаса) 10...12 % развиваемого рабочего усилия. Так, при рабочем усилии 1500 Н возвратное усилие  $P_v = 150$  Н.

Согласно полученным данным, для создания возвратного усилия в конструкции силоприво-

да должны быть предусмотрены пружины с усилием  $P_v$ .

Проведенное моделирование и экспериментальные исследования позволили разработать модельный ряд многозвенных силоприводов, выполненных из термически тонких СЭ (рис. 7).

Развитие больших усилий при малых массогабаритных параметрах позволяет использовать разработанные силоприводы в электротехнической, автомобильной, часовой, аэрокосмической и других отраслях промышленности [15].

## Выводы

1. Предложена новая конструкция многозвенного силопривода, состоящая из термически тонких СЭ.

2. Выполнено компьютерное моделирование тепловых процессов в СЭ, доказавшее равномерность их нагрева и позволившее определить минимальное время выхода на рабочий режим при незначительных энергозатратах.

3. Создан уникальный экспериментальный стенд для измерения и фиксации в едином временном масштабе деформационно-силовых, электрических и тепловых параметров, развиваемых СЭ.

4. Полученные зависимости позволяют определять недостающие характеристики силопривода: скорость нагрева, скорость развития напряжений памяти, обратное усилие и др.

5. Разработаны конструкции универсальных малогабаритных многозвенных силоприводов с обеспечением требуемых усилий и перемещений различного технологического назначения.

## Литература

- [1] Fernandes F.M.B. *Shape memory alloys. Processing, characterization and applications*. InTechOpen, 2013. 292 p.
- [2] Лихачев В.А. *Материалы с эффектом памяти формы*. Санкт-Петербург, Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. 374 с.
- [3] Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. *Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1981. 81 с.
- [4] Оуэн В. Эффекты запоминания формы и их применение. В: *Эффект памяти формы в сплавах*. Москва, Металлургия, 1979, с. 254–273.
- [5] Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Гуртовая Г.В. и др. *Функциональные материалы с эффектом памяти формы*. Москва, Инфра-М, 2019. 140 с.
- [6] Пушин В.Г., Прокошкин С.Д., Валиев Р.З. *Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч. 1. Структура, фазовые превращения и свойства*. Екатеринбург, УрО РАН, 2006. 440 с.
- [7] Ивасишин О.М., Свириденко Н.В., Полушкин Ю.А. Эффект запоминания формы в конструкционных титановых сплавах. *Металлофизика*, 1989, т. 11, № 1, с. 30–35.

- [8] Лыков А.В. *Теория теплопроводности*. Москва, Высшая школа, 1967. 599 с.
- [9] Ерофеев В.Л., Пряхин А.С., Семенов П.Д. *Теплотехника*. Т. 1. *Термодинамика и теория теплообмена*. Москва, Юрайт, 2020. 308 с.
- [10] Глушченков В.А., Юсупов Р.Ю., Алехина В.К. и др. *Электротермический силовой привод*. Патент РФ 172360. Заявл. 10.03.2016, опубл. 05.07.2017.
- [11] Глушченков В.А., Юсупов Р.Ю., Алехина В.К. и др. *Электротермический силовой привод*. Патент РФ 163932. Заявл. 14.12.2015, опубл. 20.08.2016.
- [12] Алехина В.К., Глушченков В.А. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2017, т. 19, № 1–3, с. 483–488.
- [13] Малинин Г.В. Применение метода конечных элементов для расчета статически неопределимой стержневой системы, выполненной из материала с эффектом памяти формы. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2015, № 4, с. 3–10.
- [14] Бондарчук П.В., Тисарев А.Ю. *Моделирование многодисциплинарных и нестационарных тепловых процессов в элементах*. Самара, Изд-во СГАУ, 2011. 90 с.
- [15] Алехина В.К., Бикбаев Р.М., Глушченков В.А. и др. Использование материалов с памятью формы в технических устройствах. *Вестник машиностроения*, 2019, № 9, с. 63–65.

## References

- [1] Fernandes F.M.B. *Shape memory alloys. Processing, characterization and applications*. InTechOpen, 2013. 292 p.
- [2] Likhachev V.A. *Materialy s efektom pamyati formy* [Materials with shape memory effect]. Sankt-Petersburg, Izd-vo NIIKh SPbGU Publ., 1998. 374 p. (In Russ.).
- [3] Tikhonov A.S., Gerasimov A.P., Prokhorova I.I. *Primenenie efekta pamyati formy v sovremennoy mashinostroyeni* [Using shape memory effect in modern mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 81 p. (In Russ.).
- [4] Owen W.S. *Shape memory effects and applications: an overview*. In: *Shape memory effects in alloys*. Springer, 1975, pp. 305–325. (Russ. ed.: *Effekty zapominaniya formy i ikh primeneniye*. V: *Effekt pamyati formy v splavakh*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, pp. 254–273).
- [5] Kollerov M.Yu., Gusev D.E., Gurtovaya G.V. et al. *Funktsionalnye materialy s efektom pamyati formy* [Functional materials with shape memory effect]. Moscow, Infra-M Publ., 2019. 140 p. (In Russ.).
- [6] Pushin V.G., Prokoshkin S.D., Valiev R.Z. *Splavy nikelida titana s pamyatyu formy*. Ch. 1. *Struktura, fazovye prevrashcheniya i svoystva* [Alloys of shape memory effect with shape memory effect. P. 1. Structure, phase change and properties]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2006. 440 p. (In Russ.).
- [7] Ivasishin O.M., Sviridenko N.V., Polushkin Yu.A. Shape memory effect in structural titanium alloys. *Metallfizika*, 1989, vol. 11, no. 1, pp. 30–35. (In Russ.).
- [8] Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat exchange theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (In Russ.).
- [9] Erofeev V.L., Pryakhin A.S., Semenov P.D. *Teplotekhnika*. Т. 1. *Termodinamika i teoriya teploobmena* [Heating engineering. Vol. 1. Thermodynamics and heat exchange theory]. Moscow, Yurayt Publ., 2020. 308 p. (In Russ.).
- [10] Glushchenkov V.A., Yusupov R.Yu., Alekhina V.K. et al. *Elektrotermicheskiy silovoy privod* [Electro-thermal power drive]. Patent RU 172360. Appl. 10.03.2016, publ. 05.07.2017. (In Russ.).
- [11] Glushchenkov V.A., Yusupov R.Yu., Alekhina V.K. et al. *Elektrotermicheskiy silovoy privod* [Electro-thermal power drive]. Patent RU 163932. Appl. 14.12.2015, publ. 20.08.2016. (In Russ.).
- [12] Alekhina V.K., Glushchenkov V.A. Multi-link actuators from a shape memory material and their characteristics. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2017, vol. 19, no. 1–3, pp. 483–488. (In Russ.).
- [13] Malinin G.V. Finite element method for calculation of statically indeterminate bar system made of a material with shape memory effect. *Fundamentalnye i prikladnye problemy*

*tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2015, no. 4, pp. 3–10. (In Russ.).

- [14] Bondarchuk P.V., Tisarev A.Yu. *Modelirovanie mnogodistsiplinarnykh i nestatsionarnykh teplovykh protsessov v elementakh* [Modeling of multidisciplinary and nonstationary thermal processes in elements]. Samara, Izd-vo SGAU Publ., 2011. 90 p. (In Russ.).
- [15] Alekhina V.K., Bikbaev R.M., Glushchenkov V.A. et al. The use of materials with shape memory in technical devices. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 9, pp. 63–65. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.07.2022

## Информация об авторах

**АЛЕХИНА Валентина Константиновна** — старший научный сотрудник лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования». Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самара, Российская Федерация, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: alekhina.vk@ssau.ru).

**ПФЕТЦЕР Илья Александрович** — инженер-конструктор лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования». Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самара, Российская Федерация, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: pfetzser.2-mmt-4@yandex.ru).

**ГЛУЩЕНКОВ Владимир Александрович** — профессор кафедры «Обработка металлов давлением». Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443086, Самара, Российская Федерация, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: vgl@ssau.ru).

## Information about the authors

**ALEKHINA Valentina Konstantinovna** — Senior Researcher at the Laboratory "Progressive Technological Processes of Plastic Deformation". Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (443086, Samara, Russian Federation, Moskovskoye Shosse, Bldg. 34, e-mail: alekhina.vk@ssau.ru).

**PFETZER Ilya Aleksandrovich** — Design Engineer of the Laboratory "Progressive Technological Processes of Plastic Deformation". Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (443086, Samara, Russian Federation, Moskovskoye Shosse, Bldg. 34, e-mail: pfetzser.2-mmt-4@yandex.ru).

**GLUSHCHENKOV Vladimir Aleksandrovich** — Professor of the Department of Metalworking by Pressure. Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (443086, Samara, Russian Federation, Moskovskoye Shosse, Bldg. 34, e-mail: vgl@ssau.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алехина В.К., Пфетцер И.А., Глушченков В.А. Разработка многозвенного силопривода из материала с эффектом памяти формы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-3-10

### Please cite this article in English as:

Alekhina V.K., Pfetzer I.A., Glushchenkov V.A. Development of a Multi-link Power Drive Made of a Material with a Shape Memory Effect. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 10, pp. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-3-10