

Деформирующие устройства с силовым приводом из материала с эффектом памяти формы

Конструкторские решения, порядок расчета и проектирования

© 2022 г. В.К. Алехина, В.А. Глушченков, Ф.В. Гречников

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 08.12.2021 г., доработана 10.02.2022 г., подписана в печать 15.02.2022 г.

Аннотация: Представлены технические решения по созданию деформирующих устройств с силовым приводом из материала с эффектом памяти формы. В качестве примера рассмотрены конструкции пресса, пресс-штампа, в которых использованы новые конструкции многозвенных силовых приводов. Предложена методика проектирования универсального многозвенного силового привода, силовые элементы которого выполнены из термически тонкого материала с эффектом памяти формы. Приведен анализ тепловых процессов в силовых элементах различных форм, геометрических размеров и для разных методов их нагрева (пропусканием тока, конвективным и лучистым теплообменом) и охлаждения, позволяющий определить эффективность создаваемых устройств. Исследованы технологические и эксплуатационные свойства термически тонких силовых элементов многозвенного силового привода. Для определения качественных и количественных их показателей создан измерительный стенд, позволяющий в едином временном масштабе фиксировать силу тока, изменение температуры и перемещения, развиваемые усилия. Установлена взаимосвязь скорости нагрева со скоростью развития рабочих усилий и значением возвратного усилия деформирования, определяющими производительность деформирующих устройств. На основании выполненных расчетов создана линейка универсальных силовых приводов с развиваемым усилием деформирования 500–10000 Н и перемещением 1,0–8,0 мм, приведены результаты их испытания и использования в действующих моделях деформирующих устройств.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, деформирующие и испытательные устройства, пресс-штамп, пресс, измерительный стенд, многозвенные силовые элементы, методы нагрева, и охлаждения, методика расчета параметров.

Алехина В.К. — мл. науч. сотр. науч.-иссл. лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева (443086, г. Самара, Московское ш., 34). E-mail: valysha_alehina@mail.ru.

Глушченков В.А. — вед. науч. сотр. науч.-иссл. лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева. E-mail: vgl@ssau.ru.

Гречников Ф.В. — акад. РАН, докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева. E-mail: gretch@ssau.ru.

Для цитирования: Алехина В.К., Глушченков В.А., Гречников Ф.В. Деформирующие устройства с силовым приводом из материала с эффектом памяти формы. Конструкторские решения, порядок расчета и проектирования. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 5. С. 26–35. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-26-35.

Deforming devices with a power drive made of a shape memory material

Design solutions, calculation and design procedure

V.K. Alekhina, V.A. Glushchenkov, F.V. Grechnikov

Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev, Samara, Russia

Received 08.12.2021, revised 10.02.2022, accepted for publication 15.02.2022

Abstract: The article presents engineering solutions developed to create deforming devices with a power drive made of a shape memory material. As an example, the paper considers designs of a press, a stamp press made using new designs of multi-link power drives. A method is proposed for engineering a universal multi-link power drive with power elements made of a thermally thin shape memory material. The paper

provides the analysis of thermal processes in power elements of various shapes, geometric dimensions and using different methods of their heating (current transmission heating, convective and radiant heat exchange) to determine the efficiency of the engineered devices. Processing and operational properties of thermally thin power elements of a multi-link power drive are investigated. To determine their qualitative and quantitative indicators, a measuring bench was created with such functions as recording the amperage, temperature change, displacement, and developed forces on a single time scale. A relationship between the heating rate, rate of operating force development and return deformation force was found. A line of universal power drives with a developed deformation force of 500–10000 N and a displacement of 1.0–8.0 mm was created based on the calculations performed with the results of their testing and use in existing models of deforming devices presented.

Keywords: shape memory alloys, deforming and testing devices, stamp press, press, measuring bench, multi-link power elements, heating and cooling methods, method for calculating parameters.

Alekhina V.K. — research assistant of the Laboratory «Progressive technological processes of plastic deformation», Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: valysha_alekhina@mail.ru.

Glushchenkov V.A. — leading researcher of the Laboratory «Progressive technological processes of plastic deformation», Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev. E-mail: vgl@ssau.ru.

Grechnikov F.V. — acad. of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department «Pressure treatment of metals», Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev. E-mail: gretch@ssau.ru.

For citation: Alekhina V.K., Glushchenkov V.A., Grechnikov F.V. Deforming devices with a power drive made of a shape memory material. Design solutions, calculation and design procedure. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 5. P. 26–35 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-26-35.

Введение

В заготовительно-штамповочном производстве машиностроительных предприятий определенная и довольно значительная номенклатура деталей изготавливается из тонколистовых заготовок с использованием разделительных операций (вырубка-пробивка) [1, 2]. Это, например, различного рода электроконтакты, элементы приборов и часовых механизмов, прокладки клапанов и исполнительных органов управления и многое другое.

Потребное усилие для вырубки-пробивки подобных деталей незначительное и может составлять десятки, сотни Н. Каждая такая деталь требует изготовления своего инструментального штампа и, несмотря на незначительное потребное усилие вырубки-пробивки, использования прессов с усилием в несколько десятков кН [3, 4].

Для предприятий, особенно с мелкосерийным типом производства, такой подход к изготовлению приведенной номенклатуры деталей экономически нецелесообразен (значительные расход электроэнергии, занимаемая площадь, подготовительное время и др.).

Необходимо создание малогабаритных деформирующих устройств с силоприводом, обеспечивающим усилие, возникающее в результате перестройки кристаллической решетки, т.е. с силоприводом из материала с памятью формы (МПФ) [5, 6] — например, из сплава ТН-1 [7–9]. Для развития усилия таким силоприводом (в ре-

зультате структурных превращений «аустенит—мартенсит») требуется его нагрев до температур 80–100 °C.

В качестве силовых элементов используются полуфабрикаты: стержень, пластина, проволока, труба. Как правило, силовые элементы из таких полуфабрикатов имеют однократное применение для выполнения сборочных операций, развертывания, установки и крепления элементов конструкций в технике и медицине, в том числе в специальных условиях [10, 11]. В литературе описаны примеры использования эффекта памяти формы при создании различного рода двигательных устройств [12]. Имеются ограниченные сведения о применении силоприводов из МПФ в деформирующих устройствах. Первая публикация о возможности создания прессы с силоприводом из МПФ относится к 70-м годам прошлого столетия [13], но методика расчета и проектирования силопривода в ней не приводится. Не обнаружено работ, посвященных исследованию тепловых процессов в силовых элементах и их влиянию на эффективность развития напряжений «памяти».

Силовыводы из материала с эффектом памяти формы

Развиваемое силоприводом из МПФ усилие определяется напряжением, возникающим при перестройке кристаллической решетки, и необ-

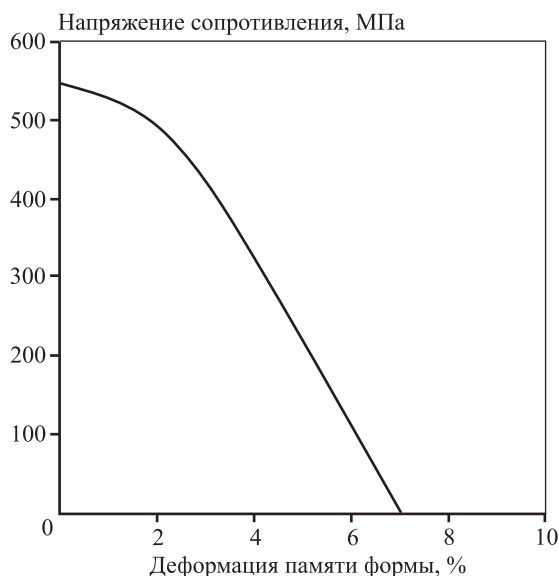


Рис. 1. Типовая зависимость развития реактивных напряжений от деформации памяти формы

Fig. 1. Typical dependence of reactive stress development on shape memory strain

ходимым перемещением (деформацией) — например, ходом создаваемого пресса (рис. 1).

Рабочее усилие пресса зависит от площади поперечного сечения силового элемента. Методика обеспечения «памяти формы» требует формирования в силовом элементе напряжения, адекватного рабочему, т.е. использования оборудования с развиваемым усилием, равным или несколько превышающим его.

Повышение создаваемого силоприводом усилия достигается увеличением площади поперечного сечения силового элемента.

Таким образом, для разработки деформирующих устройств с силоприводом из МПФ требуется взаимосвязка развиваемых усилий, перемещений, геометрических размеров силового элемента, температур, а для создания самой памяти — использование оборудования с адекватным рабочему усилием. Кроме того, необходимы технические решения по обеспечению многоциклового работоспособности, определяемой циклами «нагрев—охлаждение», и стабильности развиваемых усилий и перемещений.

Предлагаемое техническое решение

Одна из проблем, с которой столкнулись исследователи, — снижение эффекта памяти формы с увеличением поперечного сечения стержневого

силового элемента. Для нагрева стержневого силопривода диаметром 25 мм в эксперименте использовалась электрическая печь с температурой 600 °С. При лучистом теплообмене возникает неравномерность нагрева стержня по сечению, что, вероятнее всего, и стало причиной снижения эффективности силопривода и ограничением по применению стержневого силового элемента с большим сечением. Высказано предположение, что поверхностные слои, нагретые до 80–100 °С, уже претерпели мартенситные преобразования и были готовы к деформированию (согласно наведенной памяти), но внутренние слои, где еще не достигнута температура превращений, сдерживают их перемещение. Эффективность работы силового элемента снижается. Это предположение подтверждено экспериментально. Кроме того, установлено, что неравномерность нагрева по длине также уменьшает эффективность развития напряжений памяти формы. Следовательно, для обеспечения равномерности нагрева силовой элемент должен быть термически тонким телом с критерием теплопроводности $Bio < 0,2$ [14, 15].

Для достижения этого условия предложена новая многозвенная конструкция силопривода, состоящая из нескольких термически тонких тел: проволоки, пластин, стержней (рис. 2) [16, 17].

Экспериментальная проверка подтвердила факт сложения усилий, создаваемых каждым силовым элементом, в единое усилие силопривода. Так, силопривод из 5 проволочных силовых элементов диаметром 1 мм, каждый из которых раз-

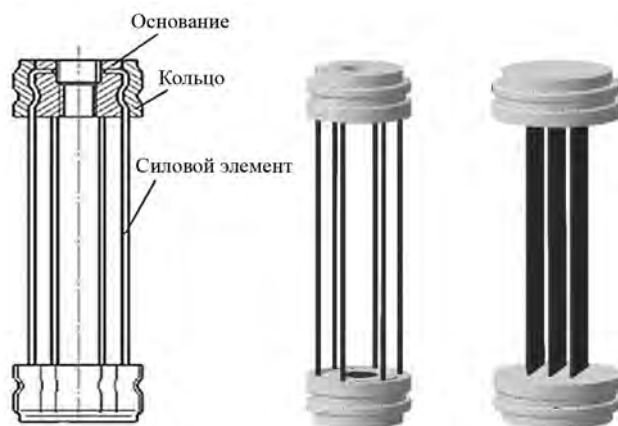


Рис. 2. Схема и 3D-модель многозвенного силопривода с термически тонкими силовыми элементами

Fig. 2. Diagram and 3D-model of the multi-link power drive with thermally thin power elements

вивает усилие 300 Н, обеспечивает общее усилие силопривода ~1500 Н.

Преимуществом разработанного силопривода является использование для наведения памяти в каждом силовом элементе оборудования со значительно меньшим усилием.

Методика исследований

Для циклической работы силопривода необходимы многократные нагрев и охлаждение силовых элементов. Для выбора наиболее эффективного (быстрого и экономичного) метода их нагрева осуществлено моделирование нестационарных тепловых процессов. При этом рассматривались три схемы нагрева силового элемента: пропускание через него электрического тока [18]; его обдув воздушным потоком (конвективный теплообмен); нагрев в электропечи (лучистый теплообмен). Охлаждение силовых элементов во всех случаях обеспечивалось конвективным теплообменом — воздушным потоком (сжатым воздухом).

Для моделирования указанных вариантов нагрева применялся программный комплекс ANSYS, использующий метод конечных элементов [19, 20].

Моделирование процесса нагрева силового элемента пропусканием через него электрического тока [21] проводилось при помощи связанного электротеплового расчета посредством модулей «Electric» (рассчитывались электрическое поле и ток, протекающий по проводнику) и «Transient Thermal» (определялось время достижения им конечной температуры).

Варьируемые параметры — сила тока, форма и размеры поперечного сечения силового элемента. Результаты моделирования нагрева силового элемента из проволоки диаметром 1,0; 1,5 и 2,0 мм при пропускании тока 10, 20 и 30 А представлены в табл. 1.

Полученные значения времени нагрева силовых элементов до $t = 110^\circ\text{C}$ позволяют впоследствии проводить оценку производительности деформирующих устройств.

Для анализа конвективного теплообмена использовались принципы CFD-расчетов в программном комплексе ANSYS CFX. Помимо геометрии силового элемента (формы и размеров поперечного сечения), варьируемым параметром при моделировании данного процесса являлась скорость воздушного потока (турбулентный режим обдува) на входе.

В табл. 2 и 3 приведены значения времени нагрева до $t = 110^\circ\text{C}$ для силовых элементов различных размеров и форм.

Представленные на рис. 3 картины температурных полей подтверждают их равномерность по сечению и длине.

Время нагрева при конвективном теплообмене, по сравнению с пропусканием тока, значительно увеличилось.

Таблица 1. Время нагрева проволоки (τ) до температуры 110°C при различных диаметрах ее поперечного сечения (D) и силе тока

Table 1. Time of wire heating (τ) to 110°C at different cross section diameters (D) and current

D , мм	τ , с		
	10 А	20 А	30 А
1,0	1,09	0,27	0,12
1,5	5,68	1,42	0,63
2,0	17,89	4,35	1,95

Таблица 2. Время нагрева силового элемента (τ) до температуры 110°C при различных размерах поперечного сечения (D) и скорости воздушного потока на входе

Table 2. Time of power element heating (τ) to 110°C at different cross sections (D) and inlet air flow rates

D , мм	τ , с		
	10 м/с	20 м/с	30 м/с
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. Время нагрева силовых элементов (τ) до температуры 110°C при различных формах их поперечного сечения и скорости воздушного потока на входе 20 м/с

Table 3. Time of power element heating (τ) to 110°C at different cross section shapes and inlet air flow rate of 20 m/s

Вид силового элемента	Размер поперечного сечения, мм	τ , с
Проволока	$\varnothing 1,5$	70,49
Стержень	$\varnothing 10$	152,37
Пластина	1×5	42,37

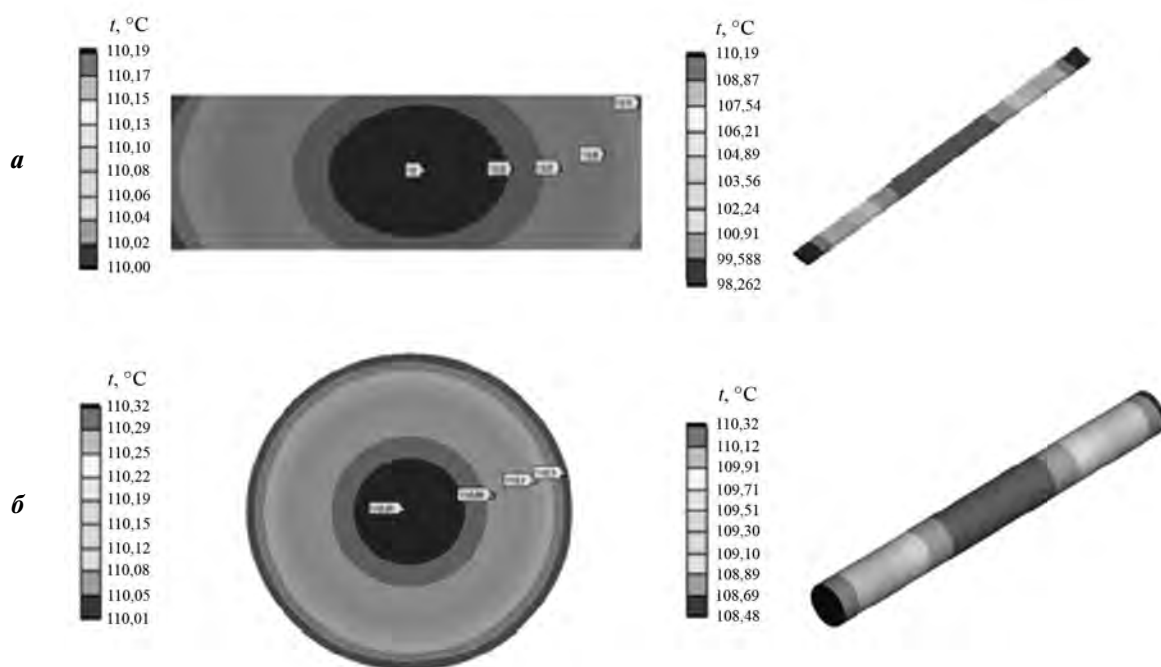


Рис. 3. Распределение температуры по поперечному сечению и длине пластины 1×5 мм (*a*) и стержня Ø 10 мм (*б*) $\tau = 47,58$ с (*a*) и 283,65 с (*б*)

Fig. 3. Distribution of temperature across the cross section and length of 1×5 mm (*a*) for the plate and Ø 10 mm (*б*) for the rod $\tau = 47.58$ s (*a*) and 283.65 s (*б*)

Таблица 4. Время нагрева силовых элементов (τ) до температуры 110 °С при различных диаметрах поперечного сечения (D) и температуре нагревательного тела

Table 4. Time of power element heating (τ) to 110 °C at different cross section diameters (D) and heating body temperature

D , мм	τ , с		
	400 °C	600 °C	800 °C
1,0	89,95	29,57	13,32
1,5	132,01	44,51	19,32
2,00	175,01	58,72	25,63

Таблица 5. Время нагрева силовых элементов (τ) до температуры 110 °С при различных формах поперечного сечения и температуре нагревательного элемента 600 °С

Table 5. Time of power element heating (τ) to 110 °C at different cross section shapes and heating body temperature of 600 °C

Вид силового элемента	Размер поперечного сечения, мм	τ , с
Проволока	Ø 1,5	44,51
Стержень	Ø 10	283,65
Пластина	1×5	47,58

При лучистом теплообмене, прежде всего, было смоделировано тело, с поверхности которого излучается тепло. Использовался нагревательный элемент в виде спирали из материала с высокой проводимостью.

Расчет проводился с помощью расчетных модулей «Steady-State Thermal» и «Transient Thermal». Варьируемыми параметрами являлись температура нагрева спирали, форма и размеры поперечного сечения силового элемента.

Характер изменения температуры нагрева силового элемента во времени можно проследить по данным табл. 4 и 5 для проволочных, пластинчатых и стержневых силовых элементов, нагреваемых лучистым теплообменом.

Охлаждение силового элемента (во всех случаях нагрева) осуществлялось обдувом его холодным потоком воздуха. Время возврата к исходной температуре окружающей среды (20–30 °C) для проволочного силового элемента составляет 300—

500 с при естественной конвекции и 7–10 с при обдуве холодным воздухом.

Результаты и их обсуждение

Проведенное моделирование тепловых процессов для различных видов нагрева и типов силовых элементов позволило, во-первых, подтвердить равномерность их нагрева по длине и сечению, а во-вторых — определить время достижения ими рабочей температуры.

Для сравнения в табл. 6 приведены значения времени нагрева силовых элементов различных форм до $t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ при рассмотренных методах нагрева.

Выбор типа нагрева должен определяться не одним параметром — производительностью про-

цесса, а совокупностью показателей, в первую очередь — необходимым усилием. Например, для проволочного силового элемента при сечении проволоки 1 мм^2 развиваемое усилие составляет 300–400 Н, поэтому для создания усилия 1500 Н, необходимого для получения типовой детали, потребуется 5 проволочных силовых элементов. В случае изготовления силового элемента из пластины для создания усилия 1500 Н будет нужен только один элемент сечением $1 \times 5\text{ мм}$. Кроме того, выбор способа нагрева, вида и геометрии силового элемента определяется также конструктивными и технологическими соображениями при разработке силопривода в целом.

Скорость срабатывания силового элемента, т.е. скорость развития рабочих напряжений, зависит от скорости нагрева, что определяется временем

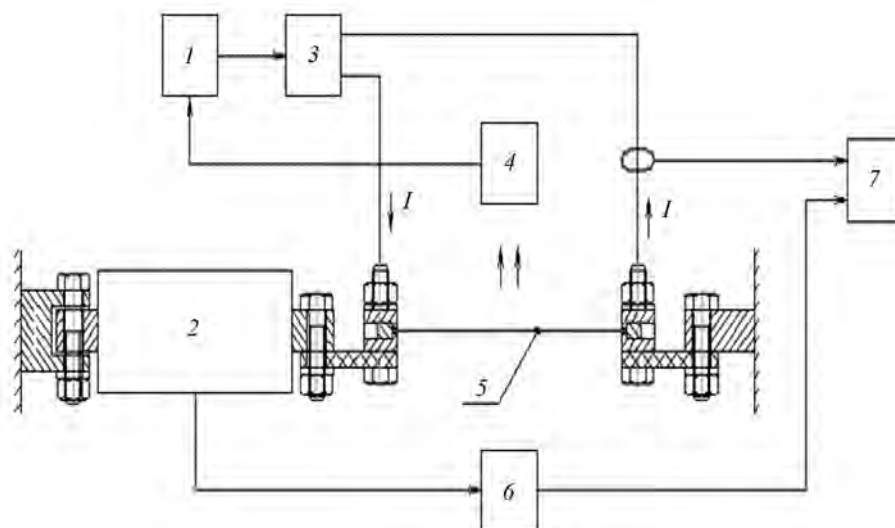


Рис. 4. Схема устройства для испытания проволочных силовых элементов

1 — схема управления; 2 — тензодатчик; 3 — источник переменного тока; 4 — тепловизор; 5 — испытуемый образец; 6 — схема формирования сигнала; 7 — осциллограф

Fig. 4. Diagram of the device for testing wire power elements

1 — control diagram; 2 — load cell; 3 — AC source; 4 — thermal imaging camera; 5 — test sample; 6 — signal conditioning circuit; 7 — oscilloscope

Таблица 6. Время нагрева силовых элементов (τ) для различных их форм и вариантов нагрева

Table 6. Time of power element heating (τ) for different shapes and heating options

Вид силового элемента	Размер поперечного сечения, мм	τ , с		
		Пропускание тока, 20 А	Конвективный теплообмен, 20 м/с	Лучистый теплообмен, 600 $^{\circ}\text{C}$
Проволока	$\varnothing 1,5$	1,42	70,49	44,51
Стержень	$\varnothing 10$	499,98	152,37	283,67
Пластина	1×5	10,95	42,37	47,58

перестройки кристаллической решетки. Для качественной и количественной проверки этих показателей создан измерительный стенд (рис. 4), позволяющий в едином временном масштабе фиксировать варьируемые параметры проволочных силовых элементов.

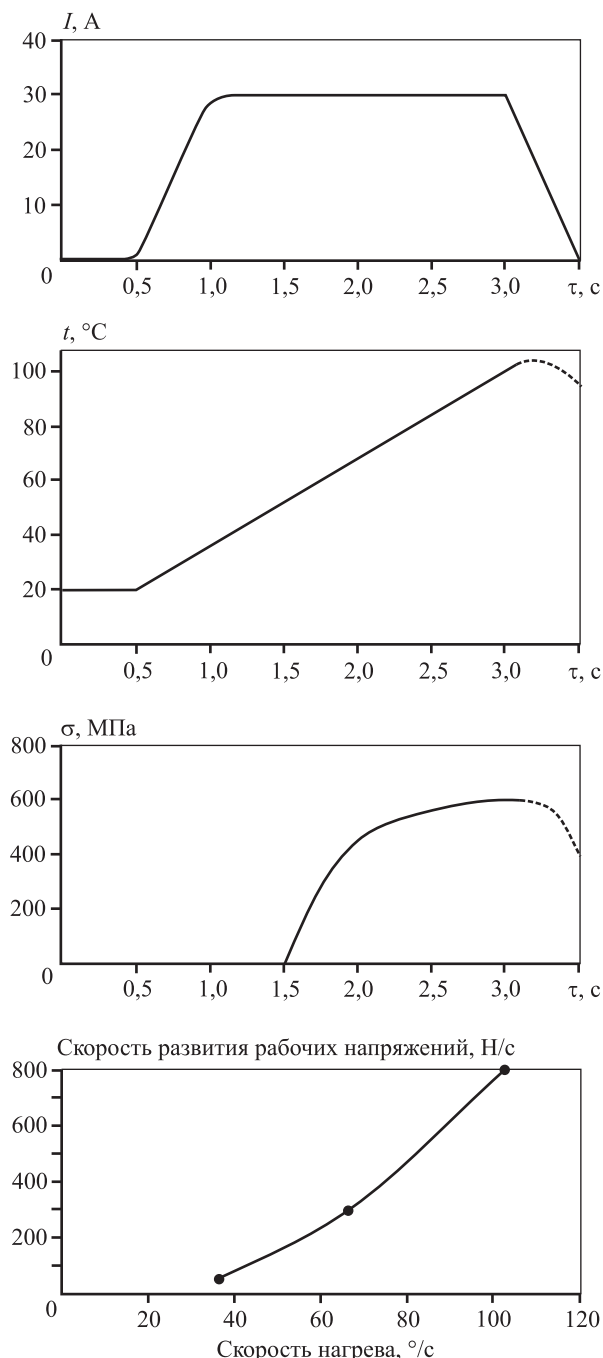


Рис. 5. Результаты обработки экспериментальных данных, приведенные к единому временному масштабу

Fig. 5. Results of experimental data processing brought to a single time scale

Результаты проведенных экспериментов позволили построить соответствующие графики (рис. 5), на основании которых получена зависимость $\dot{\sigma} = f(\dot{t})$.

Таким образом скорость срабатывания силового элемента определяется не только и не столько значением t , сколько временем достижения требуемой температуры, т.е. скоростью нагрева ($\dot{t}$).

При охлаждении силового элемента не все кристаллы возвращаются в исходное состояние, что создает эффект невозвращения силопривода в исходное положение. Для многоциклового использования необходимо создавать дополнительное усилие, обеспечивающее полный возврат кристаллической решетки в исходное состояние. Как показали проведенные экспериментальные исследования, возвратное усилие (P_B) должно составлять 10–12 % от развиваемого рабочего усилия (P), что гарантирует условие полного возврата силового элемента к первоначальным размерам. Так, при рабочем усилии 1500 Н возвратное усилие составит 150 Н.

Последовательность проектирования деформирующих устройств:

1) с помощью диаграммы σ – ϵ определяют количество и геометрические размеры силопривода (форму и площадь поперечного сечения, исходную длину и количество силовых элементов);

2) выбирают метод нагрева и время нагрева и охлаждения, обеспечивающие необходимую производительность процесса;

3) находят возвратное усилие, прикладываемое к силоприводу, используя в устройствах возвратные пружины с усилием $P_B = 0,1 P$.

Использование результатов на практике

На основе результатов моделирования и экспериментальных исследований создана линейка универсальных многозвенных силоприводов с усилием 500–10000 Н и перемещением 1,0–8,0 мм (рис. 6).

На базе разработанных многозвенных силоприводов спроектированы, изготовлены и опробованы в лабораторных условиях действующие модели деформирующих устройств (рис. 7) [22]. Осуществлена их опытно-промышленная проверка на примере изготовления типовой детали «Кон-

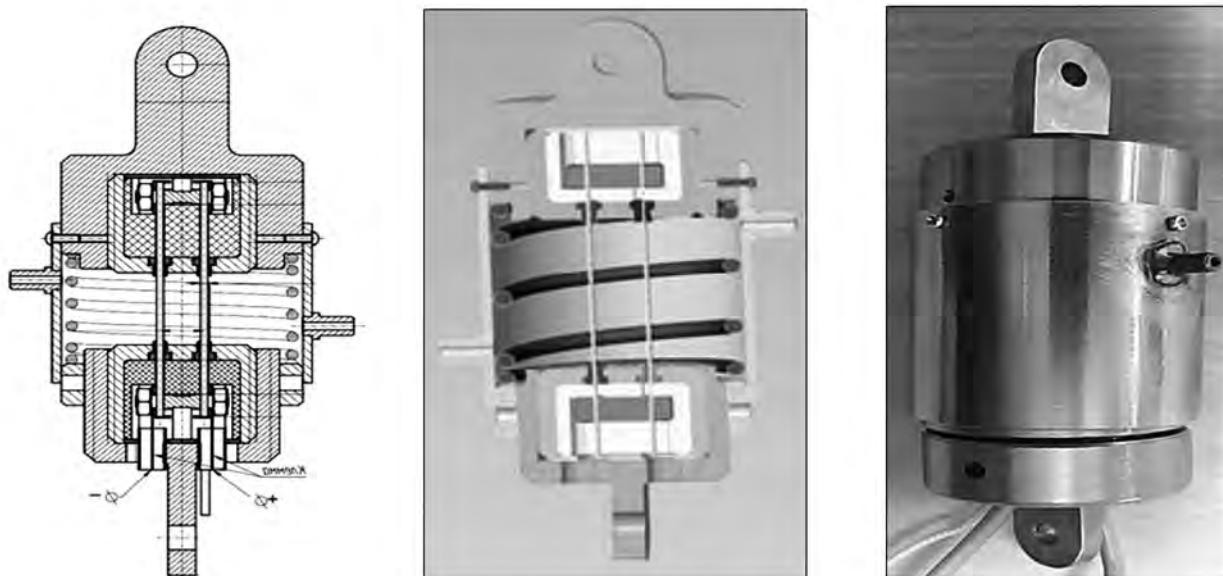


Рис. 6. Многозвенный силопривод (схема и внешний вид)

Fig. 6. Multi-link power drive (diagram and appearance)

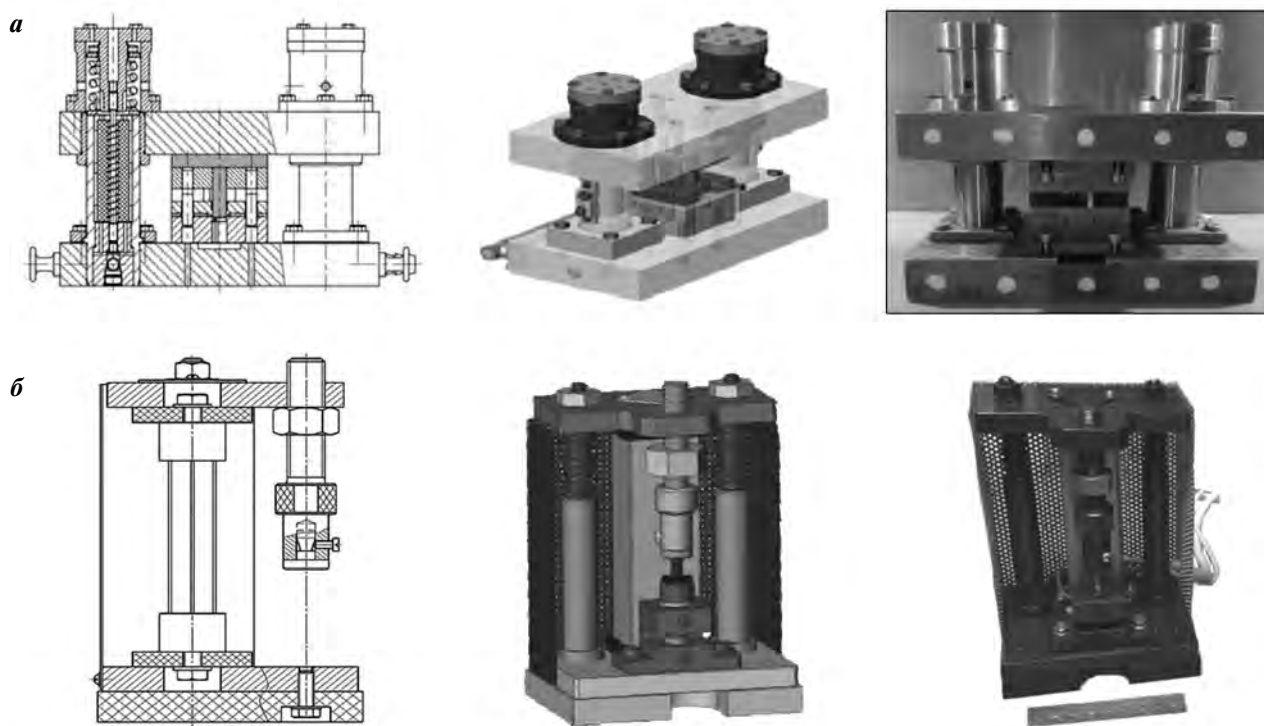


Рис. 7. Чертеж, 3D-модель и внешний вид деформирующих устройств с многозвенными силоприводами из материала с памятью формы

a – пресс-штамп, *б* – пресс

Fig. 7. Drawing, 3D-model and appearance of deforming devices with multi-link power drives made of the shape memory material

a – stamp press, *б* – press

такт», применяемой в изделиях ракеты-носителя «Союз-5».

Преимущества деформирующих устройств и оборудования, в котором они используются, — в их малых массогабаритных размерах, незначительном энергопотреблении и экологической чистоте.

Заключение

Цикл проведенных исследований позволил осуществить выбор параметров силовых элементов из материала с памятью формы для обоснованного проектирования силоприводов деформирующих устройств. Создана линейка универсальных многозвенных силоприводов с усилием от 500 до 10000 Н и перемещением от 1,0 до 8,0 мм. Разработаны и изготовлены действующие модели деформирующих устройств с силоприводом из материала с эффектом памяти формы.

Литература/References

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 283 С.
Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet stamping. Moscow: Mashinostroenie, 1977 (In Russ.).
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979.
Romanovsky V.P. Handbook of cold stamping. Leningrad: Mashinostroenie, 1979 (In Russ.).
3. Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
4. Дурандин М.М., Рымзин Н.П., Шихов Н.А. Штампы для холодной штамповки мелких деталей. Альбом конструкций и схем. М.: Машиностроение, 1978.
Durandin M.M., Rymzin N.P., Shikhov N.A. Stamps for cold stamping of small parts. Album of designs and diagrams. Moscow: Mashinostroenie, 1978 (In Russ.).
5. Булдакова Т.А., Войтенко Ю.В., Лихачев В.А., Разов А.М. Термомеханические циклы мартенситных преобразователей энергии. *Инж.-физ. журн.* 1990. Т. 59. No. 2. С. 269—277.
Buldakova T.A., Voitenko Yu.V., Likhachev V.A., Razov A.M. Thermomechanical cycles of martensitic energy converters. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1990. Vol. 59. No. 2. P. 269—277 (In Russ.).
6. Тихонов А.С. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
Tikhonov A.S. Application of the shape memory effect in modern mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 1981 (In Russ.).
7. Lambert T.R., Gurley A., Kubik K., Beale D., Broughton R. Numerical heat transfer modelling of SMA actuators and model comparison. *Conf. on smart materials, adaptive structures and intelligent systems*. 2017. Vol. 2. DOI: 10.1115/SMASIS2017-3725.
8. Остропико Е.С. Исследование функциональности рабочих элементов с памятью формы: Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб: СПбГУ, 2018.
Ostropiko E.S. The study of the functionality of working elements with form memory: Dissertation of PhD. Saint-Petersburg: SPbGU, 2018 (In Russ.).
9. Concilio A., Lecce L. Shape memory alloy engineering: For aerospace, structural and biomedical applications. Elsevier Inc., 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-07151-7.
10. Оуэн В. Эффекты запоминания формы и их применение. В сб.: *Эффект памяти формы в сплавах*. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. С. 254—273.
Owen V. The effects of shape memorization and their application. In: Shape memory effect in alloys. Moscow: Metallurgiya, 1979. P. 254—273 (In Russ.).
11. Mohd Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater. Design*. 2014. Vol. 56. P. 1078—1113. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
12. Balasubramanian M., Srimath R., Vignesh L., Rajesh S. Application of shape memory alloys in engineering: A review. In: *Int. conf. on advances in thermal engineering and applications (ICATEA 2021)* (Tamil Nadu, 19—20 March 2021). *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2054. P. 1—11. DOI: 10.1088/1742-6596/2054/1/012078.
13. Глуценков В.А., Феоктистов В.С. Пресс с силоприводом из сплава с памятью формы. *Кузн.-штамп. пр-во*. 1986. No. 4. С. 21—22.
Glushchenkov V.A., Feoktistov V.S. A press with a power drive made of an alloy with shape memory. Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. 1986. No. 4. P. 21—22 (In Russ.).
14. Ерофеев В.Л., Пряхин А.С., Семенов П.Д. Термодинамика и теория теплообмена. М.: Изд-во «Юрайт», 2020.
Erofeev V.L., Pryakhin A.S., Semenov P.D. Thermodynamics and theory of heat transfer. Moscow: Izd-vo «Yurait», 2020 (In Russ.).
15. Иванцов Г.П. Нагрев металла (теория и методы расчета). Свердловск; М.: Металлургиздат, 1948.
Ivantsov G.P. Heating of metal (theory and methods of calculation). Sverdlovsk; Moscow: Metallurgizdat, 1948 (In Russ.).
16. Егоров Ю.А., Юсупов Р.Ю., Глуценков В.А., Алехина В.К.

- Электротермический силовой привод: Пат. 163932 (РФ). 2015.
- Egorov Yu.A., Jusupov R.Yu., Glushhenkov V.A., Alekhina V.K. Electrothermal power drive: Pat. 163932 (RF). 2015 (In Russ.).
17. Алехина В.К., Бикбаев Р.М., Глушников В.А., Гречников Ф.В. Использование материалов с памятью формы в технических устройствах. *Вестн. машиностроения*. 2019. No. 9. С. 63—65.
Alekhina V.K., Bikbaev R.M., Glushchenkov V.A., Grechnikov F.V. Applications of shape memory. *Russ. Eng. Res.* 2019. Vol. 39. P. 1043—1045.
 18. Novak V., Sittner P., Dayananda G.N., Braz-Fernandes F.M., Mahesh K.K. Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests. Experiments and simulation. *Mater. Sci. Eng.* 2008. Vol. 481—482. P. 127—133. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.162.
 19. Christ D., Reese S. A finite element model for shape memory alloys considering thermomechanical couplings at large strains. *Int. J. Solids Struct.* 2009. Vol. 46 (20). P. 3694—3709. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.06.017.
 20. Шкловец А.О., Мелентьев В.С. Работа в САЕ-пакете Ansys Mechanical: конструкционный анализ методом конечных элементов. Учеб. пос. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2018.
Shklovets A.O., Melent'yev V.S. Work in the Ansys Mechanical CAE package: structural analysis by the finite element method. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2018 (In Russ.).
 21. Guan J.H., Pei Y.C., Wu J.T. A driving strategy of shape memory alloy wires with electric resistance modeled by logistic function for power consumption reduction. *Mechan. Syst. Signal Process.* 2021. Vol. 160. P. 4—6 DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107839.
 22. Глушников В.А., Алехина В.К. Термический пресс-штамп: Пат. 205272 (РФ). 2021.
Glushchenkov V.A., Alekhina V.K. Thermal press stamp: Pat. 205272 (RF). 2021 (In Russ.).