

УДК 621.98.044.7 : 621.757.002

РАСЧЕТ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ДЕФОРМИРУЮЩИХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

© 2024 Ф.В. Гречников, В.А. Глущенков

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

Статья поступила в редакцию 15.01.2024

Создание деформирующих и испытательных устройств с силоприводом из материала с памятью формы требует выполнения определенной последовательности шагов при его проектировании и расчете. В данной работе, на основе приобретенного опыта в создании таких устройств, представлена необходимая проектантам последовательность проектирования и расчета как отдельного силового элемента, так и силопривода в целом. Рассмотрены все этапы проектирования и расчета силопривода: от выбора формы и размеров силового элемента до необходимых параметров (деформационных, силовых, тепловых). Особое внимание уделено их взаимосвязи для обеспечения необходимой эффективности работы силоприводов.

Ключевые слова: материалы с памятью формы, нитинол, силопривод, силовые элементы, деформирующие устройства, последовательность проектирования, методика, расчет, эффективность работы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-20-25

EDN: PRNSEB

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Сотрудниками Самарского университета сделаны первые шаги в создании деформирующих устройств с силоприводом из материала с памятью формы. В работах [1-5] представлены некоторые конструкции таких устройств: пресс, пресс-штамп, прибор твердости. Для эффективной работы таких устройств предложен многозвенный (составной) силопривод [6-9], состоящий из нескольких проволочных, листовых или стержневых силовых элементов. Установлено, что общее усилие составного силопривода складывается из усилий, развиваемых каждым силовым элементом. Следовательно, проектирование силопривода сводится, в основном, к расчету одного силового элемента, а далее к определению их количества в силоприводе. В результате расчета силового элемента должны быть определены его геометрические размеры, развиваемые усилия, рациональные условия (параметры) нагрева и охлаждения. Исходными данными для расчета силопривода является техническое задание на создаваемое деформирующее устройство (требуемое усилие, рабочий ход, длительность производственного цикла).

Кроме того, необходимо решить ряд сопутствующих, специфических вопросов проектирования деформирующих устройств, например, *Гречников Федор Васильевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением». E-mail: gretch@ssau.ru*
Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vgl@ssau.ru

разработка конструкции и технологии крепления силовых элементов в корпусе силопривода, подвода энергоносителей, программное управление режимом работы и другие.

Последовательность проектирования и расчета силового элемента из материала с памятью формы представлена на рис 1.

Рассмотрим основные этапы проектирования и расчета, согласно представленной схеме.

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА

Для выбора материала силового элемента определяющей является деформационно-силовая диаграмма памяти формы. Такая диаграмма для сплава ТН-1 представлена на рис. 2 [10-12].

Для нахождения рабочего напряжения, развиваемого силовым элементом при нагреве его до 100 градусов, необходимо знание величины деформации δ (перемещения) при восстановлении памяти, которая в свою очередь определяется требуемой величиной рабочего хода деформирующего устройства Δl . Численное значение деформации должно находиться в пределах 3-4%. Такая рекомендация [13-16], во-первых, позволяет достичь максимальных значений развиваемых напряжений памяти (реактивные напряжения), а, во-вторых, обеспечить много-цикловую работу силового элемента. Для приведенной на рис 2 диаграммы напряжения памяти могут составлять порядка 450 МПа. С другой стороны, данная рекомендация дает возможность найти исходную длину силового элемента $l_0 = \Delta l / \delta$, а значение



Рис. 1. Этапы проектирования и расчета силового элемента

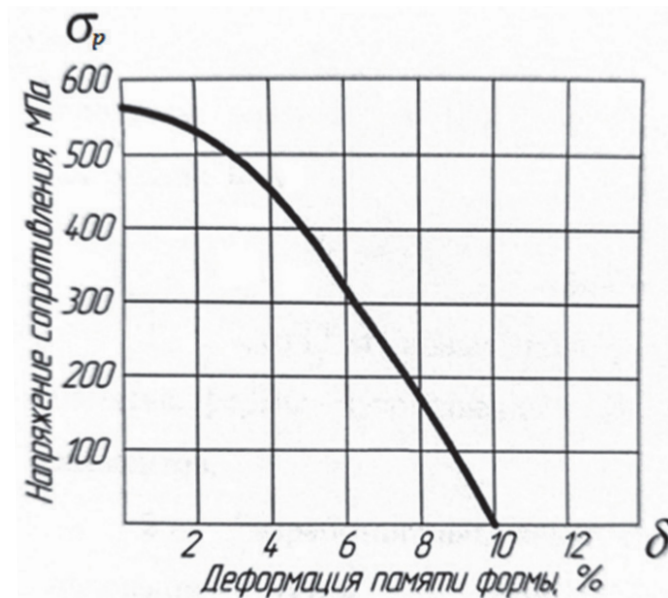


Рис. 2. Сплав ТН-1. Деформационно-силовая диаграмма памяти формы

рабочего напряжения памяти σ_p – рассчитать площадь его поперечного сечения F для обеспечения требуемого усилия деформирования $P = \sigma_p F$. Для выполнения, например, разделительных операций это усилие включает усилие вырубki-пробивки, прижима, проталкивания отхода и др. В результате появилась возможность оценить геометрические размеры силового элемента F и l_0 . И уже на этом этапе выбрать форму его поперечного сечения (проволоку, лист, стержень) и определиться с их количеством.

ВЫБОР МЕТОДА НАГРЕВА

Предварительные размеры силового элемента определяют выбор метода его нагрева до рабочей температуры T и последующего охлаждения до комнатной. Так, для проволочного силового элемента просматривается наиболее рациональным выбор нагрева пропусканием через него электрического тока I , для листового силового элемента предпочтителен конвективный теплообмен при обдуве его горячим воздухом со скоростью потока V . Стержневой силовой элемент потребует уже использования лучи-

стого теплообмена, т.е. нагрева стержня в печи электросопротивления с температурой T_n . Выбор метода нагрева зависит также от технико-экономических показателей: расхода и стоимости энергии, времени достижения нагрева до заданной температуры, простотой конструктивного решения подвода энергии и др.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Расчет режимов нагрева силового элемента осуществляется по известным уравнениям теплопередачи [17-18] с помощью соответствующих программных продуктов [19-22]. Для примера, оценочные результаты расчета времени нагрева T до рабочей температуры для трех видов силовых элементов приведены в таблице 1, где варьируемыми параметрами теплового воздействия были: сила тока I , пропускаемого через проволочный силовой элемент, скорость обдува листового силового элемента нагретым воздухом V , температура печи T_n , используемой при нагреве стержневого силового элемента.

Полученное время нагрева силовых элементов до заданной температуры (100) является дополнительным фактором принятия обоснованного решения при выборе метода нагрева для обеспечения заданной техникой заданием производительности (цикла) работы создаваемого деформирующего устройства.

КОНТРОЛЬ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА

Эффективность работы силового элемента из МПФ определяется равномерностью его нагрева по сечению, т.е. силовой элемент должен представлять собой термически тонкое тело. Неравномерность нагрева создает неравномерность развития напряжений памяти по слоям. Непрогретые слои металла сдерживают развитие напряжений памяти в прогретых. Эффективность работы силового элемента падает. Поэтому после расчета геометрических размеров силового элемента, выбора метода его нагрева

должен быть осуществлен проверочный расчет на равномерность нагрева путем, например, моделирования тепловых полей в силовом элементе по сечению и длине, как, например, это показано в работе [19].

Если требование равномерности температурного поля не выполняется, т.е. силовой элемент не соответствует критерию тонкого тела ($Bi < 0,25$), в методику проектирования необходимо внести соответствующие коррективы, заменив выбранные ранее силовые элементы на более тонкие и увеличив их количество.

ОХЛАЖДЕНИЕ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для охлаждения силовых элементов (не зависимо от метода нагрева) наиболее простым техническим решением является естественное конвективное остывание их до комнатной температуры. Так, например, для охлаждения проволочного силового элемента диаметром 1,5 мм потребуется 600 секунд. Возможно сокращение указанного времени за счет применения принудительного охлаждения с высокими скоростями воздушного потока.

ВОЗВРАТНОЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ УСИЛИЕ

Для обеспечения стабильности работы силовых элементов и, следовательно, деформирующего устройства в целом необходим полный возврат силового элемента в исходное состояние, т.е. к исходным размерам. Чтобы развернуть все кристаллы в исходное состояние им необходимо «помочь». Для чего надо приложить к силовому элементу возвратное усилие. Экспериментально установлено, что возвратное усилие должно составлять 10% от запрограммированного (созданного) рабочего усилия.

ВЫВОДЫ

Проектирование силоприводов из материала с памятью формы требует комплексного подхода, т.е. взаимной увязки развиваемых на-

Таблица 1 – Время нагрева силовых элементов до заданной температуры

Время нагрева силового элемента, τ с			
Параметры нагрева	$I = 20$ А	$V = 20$ м/с	$T_n = 600$ °C
Силовой элемент			
Проволока $\varnothing 1,5$ мм	1,5	70	40
Лист $F = 1 \times 5$ мм	10	40	47
Стержень $\varnothing 10$ мм	500	152	283

пряжений памяти, требуемых деформационных характеристик и температурных воздействий, обеспечивающих эффективную работу силовых элементов.

Предложенные последовательность и методика расчета облегчают конструкторам и технологам разработку и эксплуатацию силовых приводов, в том числе составных, на основе материалов с памятью формы, дают возможность получить исходные данные для их проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушников, В.А. Пресс с силовым приводом из сплава с памятью формы / В.А. Глушников, В.С. Феоктистов // Кузнечное штамповочное производство. – 1966. – № 4. – С. 21 – 22.
2. Патент № 157417 Российская Федерация, МПК G01N 3/40 B64G 4/00 Устройство для испытания материалов на твердость в условиях космического пространства / Юсупов Р.Ю. Глушников В.А. Алехина В.К. 2015. – 11 с.
3. Gluschenkov, V. Actuator from a material with the high-temperature shape memory effect and examples of its application in engineering / V. Gluschenkov, R. Yusupov, V. Alekhina [et al] // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol.684. – P. 523-529.
4. Алехина, В.К. Использование материалов с памятью формы в технических устройствах / В. К. Алехина, В. А. Глушников, Р. М. Бикбаев, Ф. В. Гречников // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 63–65.
5. Алехина, В.К. Деформирующие устройства с многозвенным силовым приводом из материала с «памятью формы» / В. К. Алехина, В. А. Глушников, Р. М. Бикбаев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 6. – С. 18–25.
6. Патент № 163932 Российская Федерация, МПК F03G 7/06. Электротермический силовой привод / Глушников В.А., Юсупов Р.Ю., Алехина В.К., Егоров Ю.А. - 2016. - 12 с.
7. Патент № 172360 Российская Федерация, МПК F03G 7/06. Электротермический силовой привод / Глушников В.А., Юсупов Р.Ю., Алехина В.К., Егоров Ю.А. - 2017. - 10 с.
8. Алехина, В.К. Многозвенные силовые приводы из материала с памятью формы и их характеристики / Алехина В.К., Глушников В.А. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19. – № 1(3). – С. 483-488.
9. Патент № 182028 Российская Федерация, МПК F03G 7/06. Электротермический силовой привод / Глушников В.А., Гречников Ф.В., Алехина В.К., Бикбаев Р.М. – 2018. – 10 с.
10. Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч. 1: Структура, фазовые превращения и свойства [под ред. В.Г. Путина]. – Урал. Отделение, Ин-т физики металлов. – Екатеринбург, 2006. – 440 с.
11. Моторин, А.С. Функционально-механические свойства никелида титана при высокоскоростном растяжении: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: Александр Сергеевич Моторин. – СПб., 2016. – 134 с.
12. Коллеров, М.Ю. Функциональные материалы с эффектом памяти формы: учеб. пособие / М.Ю. Коллеров, Д.Е. Гусев, Г.В. Гуртовая [и др.]. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 140 с.
13. Беляев, С.П. Обратимый эффект памяти формы как результат термоциклической тренировки под нагрузкой / С.П. Беляев, С.Л. Кузьмин, В.А. Лихачев // Проблемы прочности. – 1988. № 7. – С. 50-54
14. Андронов, И.Н. Явление многократно-обратимой памяти формы и реактивные напряжения в сплаве ТН-1 / И.Н. Андронов, А.С. Гуревич, В.А. Лихачев, П.И. Недбаев // Актуальные проблемы прочности: материалы XXIVВсесоюзного семинара. – 1990. – С. 147-148.
15. Андронов, И.Н. Эффекты обратимой памяти формы итермоциклического возврата деформации в сплаве ТН-1 / И.Н. Андронов, Р.А. Вербаховская // Заводская лаборатория. – 2007. – № 2. – Т. 73. – С. 64-67.
16. Разов, А.И. Реверсивная обратимая память формы в никелиде титана / А.И. Разов, А.С. Моторин, Г.Г. Нахатова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – С. 1733-1735.
17. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977.
18. Ерофеев, В.Л. Теплотехника. В 2 т: Том 1 Термодинамика и теория теплообмена: учебник для вузов / В.Л. Ерофеев, А.С. Пряхин, П.Д. Семенов [под ред. В.Л. Ерофеева, А.С. Пряхина]. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – 308 с.
19. Алехина, В.К. Совершенствование конструкций деформирующего оборудования на основе силовых приводов из материала с эффектом памяти формы: дисс. ... канд. тех. наук / В.К. Алехина. – Самарский университет, 2023. – С. 154 с ил.
20. Бондарчук, П.В. Моделирование многодисциплинарных нестационарных тепловых процессов в элементах двигателей: учеб. пособие / П.В. Бондарчук [и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – 90 с.
21. Шкловец, А.О. Работа в САЕ-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов: метод. указания / А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 76 с.
22. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: Учеб. пособие. / В.Г. Фокин. – Самара: Самарский государственный технический университет. 2010. – 131 с.

CALCULATION AND CONSEQUENCE OF DESIGNING THE POWER DRIVES FROM MATERIALS WITH SHAPE MEMORY FOR DEFORMING AND TESTING DEVICES

© 2024 F.V. Grechnikov, V.A. Glouschenkov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

Development of deforming and testing devices with power drive from the material with shape memory demands implementing a specified consequence of steps at its designing and calculating. A necessary consequence of designing and calculating a separate power element, as well as a whole power drive on the base of the obtained experience in developing such equipment is represented in this work. All designing and calculating stages of the power drive from a shape choice and size of a power element to the needed parameters (deformation, power and thermal parameters) are considered. A special attention is paid to the parameters: interconnection for providing a necessary operation efficiency of the power drives.

Key words: materials with a shape memory, nitinol, a power drive, power elements, deforming equipment, consequence of designing, a method, calculation, operation efficiency.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-1-20-25

EDN: PRNSEB

REFERENCES

1. *Glushchenkov, V.A.* Press s siloprivodom iz splava s pamyat'yu formy / V.A. Glushchenkov, B.C. Feoktistov // Kuznechnoe shtampovochnoe proizvodstvo. – 1966. – № 4. – S. 21 – 22.
2. Patent № 157417 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 3/40 B64G 4/00 Ustrojstvo dlya ispytaniya materialov na tverdosť v usloviyah kosmicheskogo prostranstva / YUsupov R.YU. Glushchenkov V.A. Alekhina V.K. 2015. – 11 s.
3. *Glushchenkov, V.* Actuator from a material with the high-temperature shape memory effect and examples of its application in engineering / V. Glushchenkov, R. Yusupov, V. Alekhina [et al] // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol.684. – P. 523-529.
4. *Alekhina, V.K.* Ispol'zovanie materialov s pamyat'yu formy v tekhnicheskikh ustrojstvakh / V. K. Alekhina, V. A. Glushchenkov, R. M. Bikbaev, F. V. Grechnikov // Vestnik mashinostroeniya. – 2019. – № 9. – S. 63–65.
5. *Alekhina, V.K.* Deformiruyushchie ustrojstva s mnogozvennym siloprivodom iz materiala s «pamyat'yu formy» / V.K. Alekhina, V.A. Glushchenkov, R.M. Bikbaev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2019. – № 6. – S. 18–25.
6. Patent № 163932 Rossijskaya Federaciya, MPK F03G 7/06. Elektrotermicheskij silovoj privod / Glushchenkov V.A., Yusupov R.Yu., Alekhina B.K., Egorov YU.A. - 2016. - 12 s.
7. Patent № 172360 Rossijskaya Federaciya, MPK F03G 7/06. Elektrotermicheskij silovoj privod / Glushchenkov V.A., Yusupov R.Yu., Alekhina V.K., Egorov Yu.A. - 2017. - 10 s.
8. *Alekhina, V.K.* Mnozozvennye siloprivody iz materiala s pamyat'yu formy i ih karakteristiki / Alekhina V.K., Glushchenkov V.A. // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2017. – T. 19. – № 1 (3). – S. 483-488.
9. Patent № 182028 Rossijskaya Federaciya, MPK F03G 7/06. Elektrotermicheskij silovoj privod / Glushchenkov V.A., Grechnikov F.V., Alekhina V.K., Bikbaev P.M. – 2018. – 10 s.
10. Splavy nikelida titana s pamyat'yu formy. CH. 1: Struktura, fazovye prevrashcheniya i svoystva [pod red. V.G. Putina]. – Ural. Otdelenie, In-t fiziki metallov. – Ekaterinburg, 2006. – 440 s.
11. *Motorin, A.S.* Funkcional'no-mekhanicheskie svoystva nikelida titana pri vysokoskorostnom rastyazhenii: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: Aleksandr Sergeevich Motorin. – SPb., 2016. – 134 s.
12. *Kollerov, M.Yu.* Funkcional'nye materialy s efektom pamyati formy: ucheb. posobie / M.YU. Kollerov, D.E. Gusev, G.V. Gurtovaya [i dr.]. – M.: INFRA-M, 2016. – 140 s.
13. *Belyaev, S.P.* Obratimyj effekt pamyati formy kak rezul'tat termociklicheskoj trenirovki pod nagruzkoj / S.P. Belyaev, S.L. Kuz'min, V.A. Lihachev // Problemy prochnosti. – 1988. № 7. – S. 50-54
14. *Andronov, I.N.* YAvlenie mnogokratno-obratimoy pamyati formy i reaktivnye napryazheniya v splave TN-1 / I.N. Andronov, A.S. Gurevich, V.A. Lihachev, P.I. Nedbaev // Aktual'nye problemy prochnosti: materialy XXIVsesoyuznogo seminar. – 1990. – S. 147-148.
15. *Andronov, I.N.* Effekty obratimoy pamyati formy itermociklicheskogo vozvrata deformacii v splave TN-1 / I.N. Andronov, R.A. Verbahovskaya // Zavodskaya laboratoriya. – 2007. – № 2. – T. 73. – S. 64-67.
16. *Razov, A.I.* Reversivnaya obratimaya pamyat' formy v nikelide titana / A.I. Razov, A.S. Motorin, G.G. Nahatova // Vestnik Nizhegorodskogo universitetaim. N.I. Lobachevskogo. – 2011. – № 4. – S. 1733-1735.

17. *Miheev M.A.* Osnovy teploperedachi / M.A. Miheev, I.M. Miheeva. – Izd. 2-e, stereotip. – M.: Energiya, 1977.
18. *Erofeev, V.L.* Teplotekhnika. V 2 t: Tom 1 Termodinamika i teoriya teploobmena: uchebnik dlya vuzov / V.L. Erofeev, A.S. Pryahin, P.D. Semenov [pod red. V.L. Erofeeva, A.S. Pryahina]. – M.: Izdatel'stvo YUrajt, 2020. – 308 s.
19. *Alekhina, V.K.* Sovershenstvovanie konstrukcij deformiruyushchego oborudovaniya na osnove siloprivodov iz materiala s efektom pamyati formy: diss. ... kand. tekhn. nauk / V.K. Alekhina. – Samarskij universitet, 2023. – S. 154 s il.
20. *Bondarchuk, P.V.* Modelirovanie mnogo disciplinarnykh inestacionarnykh teplovykh processov v elementah dvigatelej: ucheb. posobie / P.V. Bondarchuk [i dr.]. – Samara: Izd-vo SGAU, 2011. – 90 s.
21. *Shklovec, A.O.* Rabota v CAE-pakete ANSYS MECHANICAL: konstrukcionnyj analiz metodom konechnykh elementov: metod, ukazaniya / A.O. Shklovec, V.S. Melent'ev. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2018. – 76 s.
22. *Fokin, V.G.* Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruemogo tvyordogo tela: Ucheb. posobie. / V.G. Fokin. – Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. 2010. – 131 s.

*Fedor Grechnikov, Academician of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Metal Forming Department.
E-mail: gretch@ssau.ru
Vladimir Glouschenkov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Metal Forming Department.
E-mail: vgl@ssau.ru*