

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ

КРАХИН Олег Иванович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), профессор, д.т.н.
e-mail: koi@mai.ru

Oleg I. KRAHIN – Moscow Aviation Institute (State Technical University), professor, doctor
e-mail: koi@mai.ru

ЗЕНИН Владислав Александрович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), инженер
e-mail: sentido_beleben@b.k.ru

Vladislav A. ZENIN – Moscow Aviation Institute (State Technical University), engineer
e-mail: sentido_beleben@b.k.ru

ФАТЬЯНОВ Сергей Александрович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), аспирант
e-mail: dewulf123@bk.ru

Sergey A. FATYANOV – Moscow Aviation Institute (State Technical University), postgraduate
e-mail: dewulf123@bk.ru

Рассматриваются вопросы расчёта и проектирования термомеханических двигателей (ТМД) и теплоэнергетических установок (ТЭУ) на основе сплавов с памятью. Особое внимание уделяется специальным свойствам сплавов на примере сплавов системы «никель-титан». Приводится геометрическая интерпретация свойств этих сплавов, а также процесс задания исходной и восстановления запоминаемой деформации.

Сформулированы требования, предъявляемые к сплаву при использовании его в качестве активного элемента (актуатора) в термомеханическом двигателе и, соответственно, в энергетической установке.

Приведена классификация активных элементов и даны рекомендации по их выбору с учётом максимальной энергоэффективности и технологичности.

Разработаны основы проектирования ТМД и активного элемента с целью определения рабочих размеров и деформационно-силовой характеристики последнего. Предложена инженерная методика расчета ТМД.

Проведено теоретическое исследование варианта энергетической установки турбинного типа (ЭУ), работающей в двух средах: вода–воздух. Её основным элементом являются пневмоцилиндры, активный ход штока в которых производится элементом из сплава с памятью, обратный ход – за счёт разности давления в цилиндре и в окружающей среде (воздухе). Показана возможность создания установки рассматриваемого типа.

The publication focuses on some questions about calculation and design of thermomechanical engines and thermal power plants developed by alloys with shape memory.

Also, some requirements for the alloy defined when it is used as an active element (actuator) in thermomechanical engine and in the power plant.

Next, there goes classification of active elements and recommendations for its selection for the maximum efficiency and adaptability.

There are also given some fundamentals of design of thermomechanical engines with active elements based on alloys with shape memory, then there goes engineering method for calculating the thermomechanical engine.

Finally, there goes a theoretical researching of special type power plant turbine working in two environments (water-air) and the possibility to create an installation of this type.

Ключевые слова: сплавы с памятью, термомеханический двигатель, энергетическая установка, рекуперация, актуатор.

Key words: alloys with shape memory, thermomechanical engine, power plant, recuperation, actuator.

Сплавы с памятью находят широкое применение в различных областях техники. В авиакосмической технике, в частности, они представляют интерес при создании управляемых приводов, обладающих наименьшими габаритами и массой.

Так, возможность получения малых скоростей вращения позволяет отказаться от установки редуктора, что значительно улучшает массогабаритные параметры механизма. Кроме того, к достоинствам термомеханических двигателей относятся простота конструкции, способность работать на различных режимах, хорошая управляемость и надёжность, бесшумность и экологичность.

В создании ЭУ фактором, определяющим обоснованность использования сплавов с памятью, является возможность использования энергетического потенциала внешних возобновляемых источников тепла для получения механической энергии. В частности, рассматриваются варианты рекуперации тепла промышленных и технических объектов и использования природных тепловых источников (солнечный свет, геотермальное тепло).

Известно большое количество конструктивных решений как ТМД, так и ЭУ. С другой стороны, теоретические исследования в области расчёта и проектирования весьма ограничены. Практически отсутствует инженерная методика расчета ТМД.

Поэтому в большинстве случаев процесс разработки ТМД и ЭУ носит эмпирический характер, что приводит к принятию неоптимальных решений в процессе проектирования и появлению механизмов, обладающих низкими функциональными характеристиками.

Вместе с тем, практически важным представляется определение критериев оценки тех или иных конструкторских решений, вырабатываемых в процессе проектирования ТМД и ЭУ, в зависимости от исходных требований.

Для принятия оптимальных решений необходимо иметь полную информацию о специальных свойствах сплавов.

Зависимости для сплавов с памятью носят более сложный характер, чем у традиционных конструкционных материалов. Поэтому для описания свойств сплавов с памятью требуется значительно больше информации, чем в случае традиционных материалов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что сплавы с памятью могут характеризоваться совокупностью функций $f_i(\sigma, \varepsilon, T) = 0$, каждая из которых соответствует своей величине исходной деформации $\varepsilon_{исх}$.

Одна из таких поверхностей, построенная по экспериментальным данным, представлена на рис. 1.

Можно показать, что на полученной диаграмме отражены как качественно, так и количественно основные свойства сплава.

Рассмотрим, например, задание исходной и восстановление запоминаемой деформации.

При температуре T_0 ниже температуры M_K пассивным деформированием задается начальная деформация ε_n . Этот процесс описывается кривой 1-2-3, получаемой сечением поверхности $f(\sigma, \varepsilon, T) = 0$ плоскостью $T = T_0$, параллельной плоскости $\sigma - \varepsilon$. При этом в процессе нагружения стержня на участке 1-2 возникает упругая деформация. При последующем увеличении нагрузки зависимость между напряжением и деформацией принимает нелинейную форму за счет формирования кажущегося пластического течения. При снятии нагрузки (участок 3-4) деформация частично восстанавливается за счет упругой составляющей. Остаточная деформация (отрезок 1-4) является исходной для последующего восстановления.

Если образец в свободном состоянии подвергнуть нагреву (участок 4-5-7), то в интервале температур $A_n - A_k$ (участок 5-7), он восстановится до размера, который имел до начала деформирования. Этот процесс характеризует “эффект памяти формы”.

Восстановление деформации для данного сплава может быть как полным, так и не полным в зависимости от величины исходной деформации и определяется коэффициентом термического восстановления.

Таким образом, “эффект памяти формы” характеризуется следующими экспериментальными параметрами: диапазонами температур превращений – M_n , M_k , A_n и A_k и коэффициентом восстановления $K_{исх}^{TM} = f(\varepsilon_{исх})$. При нагреве образца под нагрузкой (точка 3 диаграммы) первоначально наблюдается некоторое увеличение жесткости сплава. Если при этом нагрузку изменять таким образом, чтобы препятствовать упругим деформациям, то нагрев до температуры A_n опишется кривой, лежащей в плоскости $\varepsilon = \varepsilon_n$, параллельной плоскости $\sigma - T$ (участок 3-6).

Процесс восстановления деформации в диапазоне температур $A_n \leq T \leq A_k$ (кривая 6-7, лежащая в наклонной плоскости, перпендикулярной плоскости $\varepsilon - T$) сопровождается снижением нагрузочной способности таким образом, что полное вос-

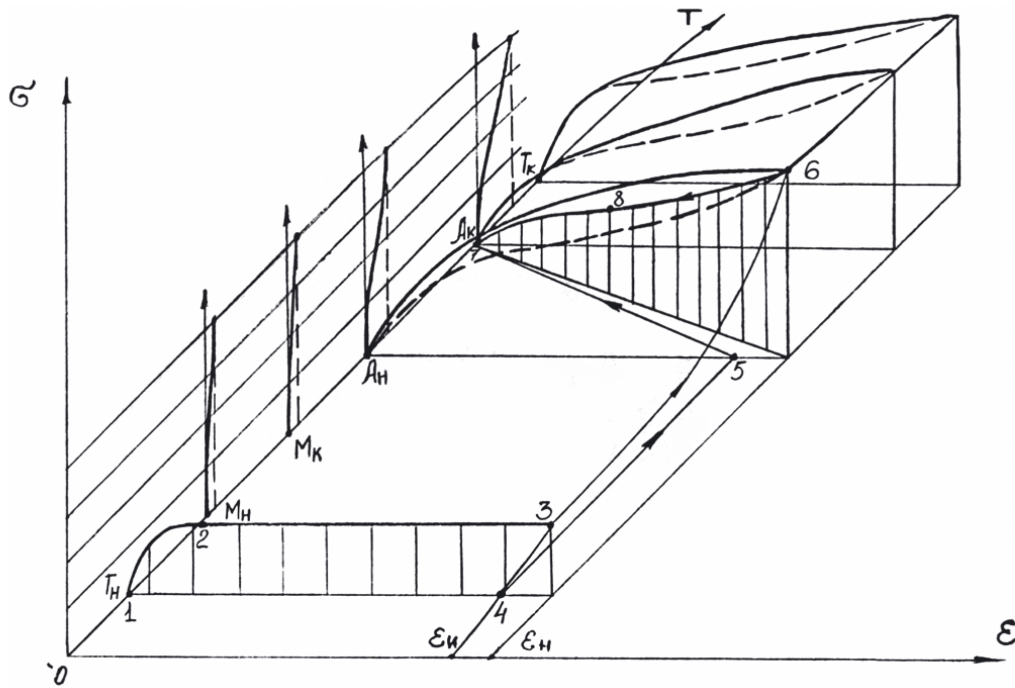


Рис.1. Диаграмма, отражающая основные свойства сплава

становление происходит только при внешней нагрузке равной 0.

Если же внешняя нагрузка не равна нулю, то процесс восстановления прекращается при величине деформации, соответствующей значению напряжения от внешней нагрузки (точка 8).

Восстановление деформации сопровождается совершением механической работы (ТМП), причем эта работа, определяемая площадью под кривой 6-7, спроектированной на плоскость, перпендикулярную оси T , больше работы, затрачиваемой на деформирование при начальной температуре, равной площади под кривой 1-3.

Для практического использования ТМП требуются следующие экспериментальные данные, характеризующие свойства сплавов: диапазоны температур превращений, коэффициент термического восстановления, механическая характеристика при температуре T_H и в диапазоне температур A_H-A_K .

Рассмотрим теперь характер деформирования сплава в области температур выше A_K (область псевдоупругости). Для этого разрежем поверхность $f(\sigma, \epsilon, T) = 0$ плоскостью $T = T_K$, где $T_K > A_K$. В результате получим кривую $\sigma = f(\epsilon)$, полностью характеризующую псевдоупругие свойства сплава при данной температуре. Так как кривая разгрузки не совпадает с кривой нагружения, этот график характеризует и диссипативные свойства.

Приведенный анализ показывает, что поверхности типа $f(\sigma, \epsilon, T) = 0$ в полной мере отражают основные свойства сплавов с памятью и могут быть положены в основу расчета деталей из этих сплавов различного назначения и в различных режимах эксплуатации. Однако при изучении экспериментальных данных, приведенных в ряде работ, было установлено, что диаграмма типа, показанного на рис.1, обладает некоторыми дополнительными возможностями, представляющими практический интерес.

Если образец, которому задана исходная деформация, закрепить между двумя абсолютно жесткими стенками, а затем нагреть, то его реакция на нагрев будет определяться кривой, получаемой путем сечения поверхности $f(\sigma, \epsilon, T) = 0$ плоскостью $\epsilon = \epsilon_{исх}$.

На рис. 2 показаны две пары кривых, полученные непосредственно из эксперимента (сплошная линия) и путем сечения поверхности $f(\sigma, \epsilon, T) = 0$ (пунктирная линия), для образца из сплава титан-никель в форме пружины, выполненной из проволоки диаметром 1,0 мм при среднем диаметре витка 9,0 мм и эффективном числе витков 8. Исходная деформация составляла 30 мм (1) и 10 мм (2).

Прежде всего следует отметить хорошую сходимость результатов, что свидетельствует о правильности принятой концепции представления свойств сплавов с памятью.

Так как характеристические температуры зависят от напряжения сопротивления σ_c , должны быть также экспериментально определены соответствующие зависимости $M_n = f(\sigma_c)$; $M_k = f(\sigma_c)$; $A_n = f(\sigma_c)$; $A_k = f(\sigma_c)$. Эти графики включаются в деформационно-силовую структуру, как это показано на рис. 1, завершая ее формирование.

Так как свойства сплавов с памятью существенно зависят от ряда технологических факторов (способов получения, видов и режимов механической, термической обработки), испытания должны проводиться на образцах, соответствующих их рабочему состоянию, после термической обработки при оптимальных режимах для данного сплава и термомеханической тренировки, обеспечивающей стабилизацию свойств сплава. Состояние сплавов, соответствующее полученным характеристикам, должно фиксироваться.

Полученные таким образом характеристики сплавов с памятью представляют собой банк данных, который служит основой для расчета деталей из сплавов с памятью и может быть представлен в форме, удобной для использования ЭВМ.

Эти данные не исчерпывают всех свойств сплавов, информация о которых требуется при практическом их использовании. Так, во многих случаях дополнительно определяются теплоемкость, теплопроводность, коэффициенты отражения, электрическое сопротивление и т.д. В то же время рассмотренные деформационно-силовые характеристики являются необходимыми во всех случаях применения сплавов.

Для разработки активных элементов в составе ТМД необходимо иметь следующие характеристики:

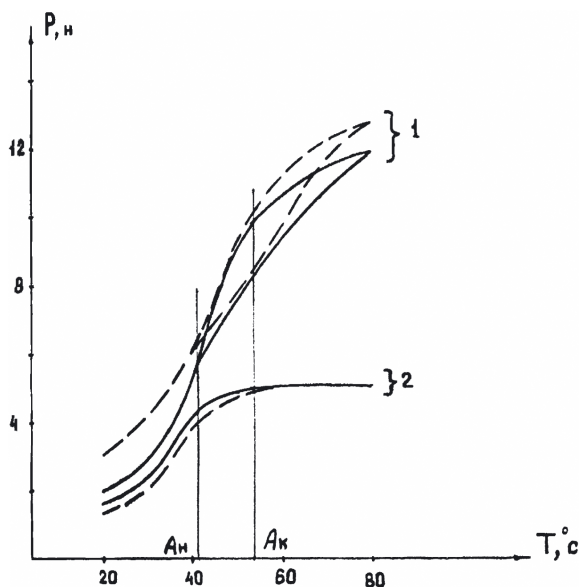


Рис. 2. Сравнение результатов, полученных экспериментально и теоретически

M_n^0, M_k^0 – температуры начала и конца прямого мартенситного превращения, определенные на образцах в ненагруженном состоянии;

$M_n^{0,7}, M_k^{0,7}$ – те же температуры, но определенные на образцах под нагрузкой при напряжении деформирования $\sigma_d = 0,7 \cdot \sigma_c$, т.е. 0,7 от минимального напряжения сопротивления восстановлению деформации, полностью подавляющего проявление ЭПФ;

A_n^0, A_k^0 – температуры начала и конца обратного мартенситного превращения, определенные на образцах в ненагруженном состоянии;

$A_n^{0,7}, A_k^{0,7}$ – те же температуры, определенные на образцах при напряжении сопротивления восстановлению формы $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;

$T_p^{0,7}$ – температура начала релаксации, определенная на образцах при напряжении сопротивления восстановлению формы $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;

ϵ_p^0 – деформация памяти формы (деформация восстановления), определенная при отсутствии сопротивления восстановлению;

$\epsilon_p^{0,7}$ – деформация восстановления, определенная на образцах при напряжении сопротивления $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;

σ_c^0 – минимальное напряжение сопротивления восстановлению, полностью подавляющее проявление ЭПФ;

σ_p^0 – максимальное реактивное напряжение, генерируемое в образце при полном запрещении деформации восстановления формы;

$\sigma_p^{0,7}$ – реактивное напряжение, генерируемое в образце при разрешенной деформации восстановления $\epsilon_p = 0,7 \cdot \epsilon_p^0$;

$\sigma_{та}$ – предел текучести сплава в аустенитном состоянии;

$\sigma_{дкр}$ – максимальное напряжение деформирования, при котором имеет место полное восстановление формы, если $\sigma_c = 0$;

$\sigma_{скр}$ – максимальное напряжение сопротивления восстановлению, при котором в процессе силового термоциклирования в режиме $\sigma_d < \sigma_{дкр}$ имеет место полное восстановление формы.

Все указанные характеристики должны определяться на образцах, подготовленных к эксплуата-

ции, т.е. со структурой текстурованного наведенного мартенсита, что достигается, например, термомеханической тренировкой (циклированием).

На практике при использовании сплава с памятью необходимо определить, какой характер движения рабочего органа, какая величина рабочего усилия. В связи с этим форма активного элемента (АЭ) может быть различной. Распространение получили простейшие, технологичные формы, в которых используется продольная деформация, изгиб или кручение, а также их сочетание.

В России различными производителями освоена технология изготовления проволоки диаметром 0,6...4,0 мм, прутков, труб и листов толщиной 0,5...2,0 мм. Основные типы активных элементов, которые могут быть реализованы из перечисленных видов полуфабриката, представлены на рис. 3. На стадии формирования кинематической схемы термомеханического привода (ТМП) их выбор рекомендуется осуществлять, исходя из следующих предпосылок.

Эффективность АЭ и, соответственно, ТМП определяется величиной произведённой удельной работы, т.е. работы, отнесённой к единице объёма АЭ:

$$W = \int \sigma_p(T) d\varepsilon_p \quad (1)$$

где σ_p – генерируемое рабочее напряжение; T – температура; ε_p – относительная деформация, соответствующая рабочему ходу.

Максимальное использование энергоёмкости сплава в АЭ (и, следовательно, снижение его массы и габаритов) достигается при однородном напряжённо-деформированном состоянии и однородном температурном поле по сечению и длине АЭ. Однородное напряжённо-деформированное состояние реализуется в случае продольной деформации. Однородность температурного поля связана со способом нагрева. Так как никелид титана обладает низкой теплопроводностью, относительно однородное температурное поле по сечению достигается при нагреве АЭ путём пропускания через него электрического тока.

Поступательное движение наиболее просто реализуется с помощью элемента в виде проволоки. Его целесообразно использовать при рабочих усилиях P до 2000 Н и величине рабочего хода S примерно 30 мм, что составляет 0,05...0,06 длины проволоки. Нагрев проволоки целесообразно осуществлять за счёт омического сопротивления, что позволяет обеспечить равномерный нагрев по сечению. В зависимости от интенсивности нагрева

могут быть получены скорости примерно в пределах 0,2...50 мм/с.

При больших значениях усилий ($P = 2000...20000$ Н) может быть использован элемент, выполненный в виде трубы. Его нагрев осуществляется другими способами. Для обеспечения равномерного прогрева по сечению толщина стенки трубы не должна превышать 2...3 мм.

При больших значениях рабочего хода ($S = 50...1000$ мм) наиболее компактным является АЭ в форме цилиндрической витой пружины. Её длина в начальном состоянии в 2...5 раз меньше (пружина растяжения) или больше (пружина сжатия). Эти элементы могут быть рекомендованы для рабочих усилий до 1000...3000 Н. Их нагрев, как и нагрев проволочных элементов, можно осуществлять непосредственно электрическим током, получая примерно такие же скорости перемещения.

При значении усилий $P = 10000...300000$ Н могут использоваться АЭ сильфонного типа или элементы в форме усечённой конической оболочки. Такие АЭ позволяют обеспечить рабочий ход $S = 5...400$ мм, что составляет примерно 0,4 их длины в недеформированном состоянии. Их нагрев осуществляется электрической спиралью, токами Фуко или с помощью ТЭМО. В последнем случае достигается эффективный нагрев и охлаждение АЭ, что позволяет увеличить быстродействие при циклической работе.

Непосредственно вращательное движение обеспечивается с помощью АЭ в форме стержня, работающего на кручение. Развиваемый крутящий момент обычно не более 50 Н·м при угловом ходе до 360°. При толщине стенки трубы 0,1D и менее напряжённо-деформированное состояние является практически однородным, что существенно повышает эффективность двигателя.

Элементы, работающие на изгиб, чаще всего используются для передачи вращательного движения и выполняются либо в виде пластины при небольших углах поворота (до 180°), либо в виде спиральной пружины, если угол поворота составляет от 360 до 7200°. Напряжённо-деформированное состояние по сечению при изгибе существенно неоднородно, и поэтому эффективность АЭ в этом случае в 2...3 раза ниже, чем при продольной деформации.

После того как кинематическая схема сформирована и определён тип активного элемента, производится расчёт последнего с целью определения его рабочих размеров и деформационно-силовой характеристики.

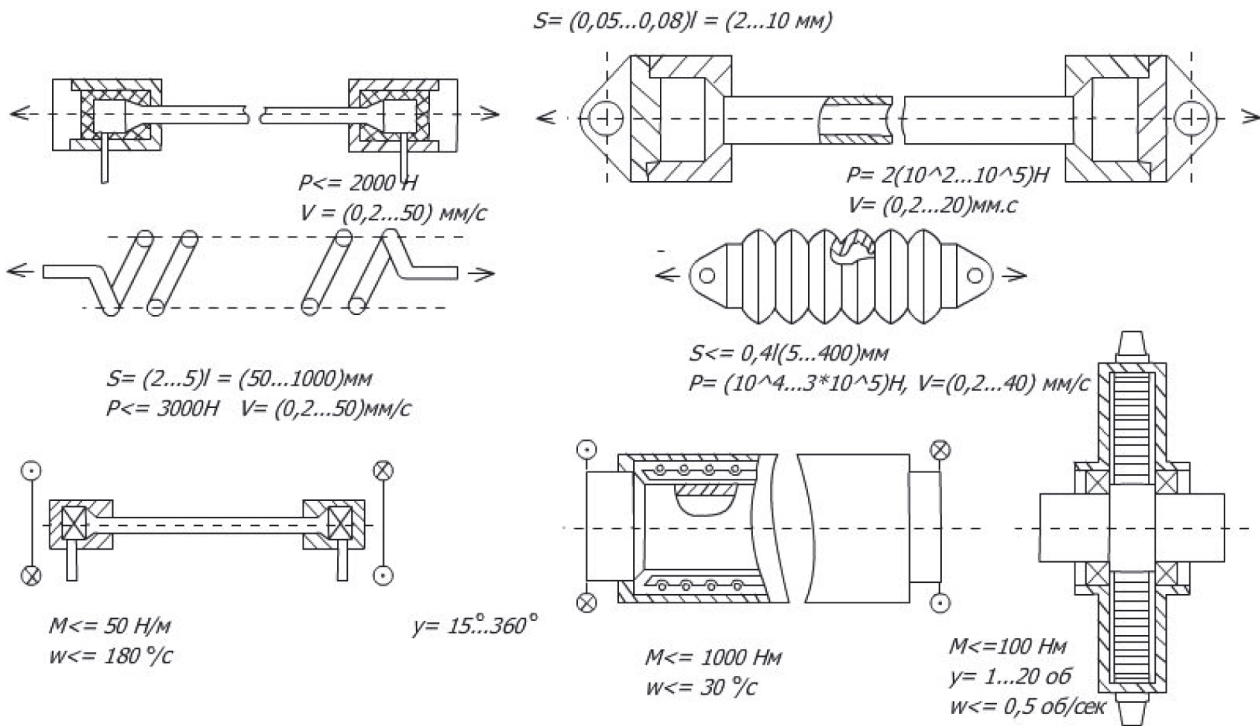


Рис. 3. Основные типы активных элементов

Рассмотрим применение сплава с памятью в термомеханических двигателях. Известно большое количество видов двигателей, приведем один из наиболее простых вариантов исполнения. Двигатель представляется ТМД одноразового действия с АЭ, работающим на продольную деформацию.

АЭ поз. 1 (рис. 4) выполнен в виде проволоочки с конусными законцовками, зажатый в безлюфтовой втулке 2. Нагрев элемента осуществляется пропусканием через него электрического тока, подводимого с помощью штеккера 3. Подводящие провода и АЭ изолированы с помощью диэлектрических вкладышей 4. Тяговое усилие, развиваемое АЭ, передается к исполнительному органу через корпус 5 непосредственно или, как показано на рисунке, через гайку 6 с заделанным в нее тросом или жестким звеном 7.

Другой вариант ТМД показан на рис. 5. Это ТМД торсионного типа. АЭ 1 выполнен в виде цилиндрической трубки. Нагрев АЭ осуществляется при помощи электрического тока с помощью специального нагревательного устройства, которое состоит из спирали, намотанной на керамическую втулку 3, облаченной в теплозащитный корпус 2.

Проектировочный расчет ТМД, как и привода в целом, в состав которого он включен, можно разделить на три этапа: кинематический расчет; силовой расчет; динамический расчет.

При кинематическом расчете исходя из заданной траектории движения исполнительного органа определяют вид деформирования АЭ, его конфигурацию и геометрические размеры, которые обеспечивают требуемую величину рабочего хода.

Целью силового расчета является определение тех размеров АЭ, которые обеспечивают его несущую способность и долговечность при заданных эксплуатационных нагрузках. Динамический расчет заключается в определении, исходя из заданного закона движения исполнительного органа $S = f(t)$, энергопотребления двигателя, требуемого режима управления и в установлении основных параметров системы управления. Кинематический

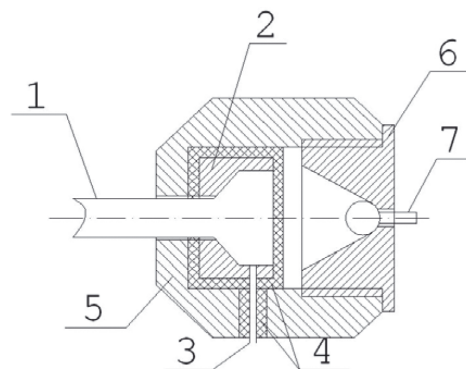


Рис. 4. ТМД одноразового действия, работающий на деформацию

расчет ТМД, работающего на продольную деформацию, в целом имеет следующий вид.

Задаваясь различными значениями исходной деформации $\varepsilon_{и}$, определяют зависимость коэффициента термического формовосстановления K^{TM} от величины напряжения сопротивления σ_c (рис. 6). Используя полученные графики, выбирают исходную деформацию, при которой величина восстановленной деформации оптимальна, и величина этой деформации находится по формуле

$$E\varepsilon = K^{TM} u y \cdot E u \cdot \quad (2)$$

Длина АЭ – l_0 должна обеспечить требуемую величину рабочего хода x_p , определяемую заданной траекторией движения рабочего органа и кинематической схемой привода, причем

$$x_p = (E_y E_y - E_k) \cdot l_0, \quad (3)$$

где E_y , E_k – упругие деформации АЭ и конструкции, где он закреплен.

$$E_y = \frac{1}{F_{\varnothing}} \left(\frac{P_k}{E_k} - \frac{P_n}{E_n} \right), \quad (4)$$

где F_{\varnothing} – площадь сечения АЭ; E_n , E_k – модуль упругости АЭ в начале и в конце нагрева; P_n , P_k – усилие в начале и в конце рабочего хода.

Деформация сопряженной конструкции:

$$E_k = \frac{1}{C_k \cdot l_0} (P_k - P_n), \quad (5)$$

где C_k – жесткость сопряженной конструкции.

Путем подстановки определяется минимальная длина АЭ, обеспечивающая заданную величину рабочего хода:

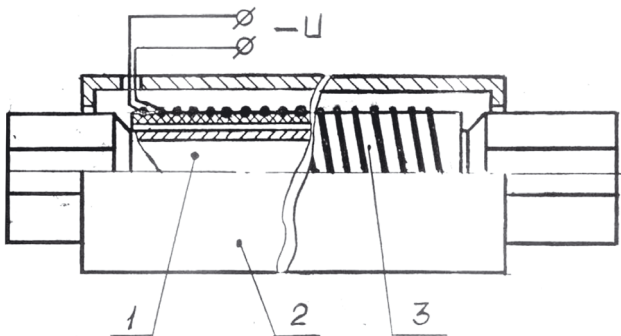


Рис. 5. ТМД одноразового действия, работающий на кручение

$$l_0 = \frac{X_p + \frac{1}{C_k} (P_k - P_n)}{K^{TM} u y \cdot E u - \frac{1}{F_{\varnothing}} \left(\frac{P_k}{E_k} - \frac{P_n}{E_n} \right)}. \quad (6)$$

Площадь сечения элемента определяется из условия обеспечения заданной величины деформации восстановления.

В случае продольной деформации

$$N p \cdot \eta(T) = \dot{T} (E \cdot l \cdot F_{\varnothing} \cdot (E u j - E p j \frac{T - A_n}{A_k - A_n})^m \times \times \frac{E p j}{A_k - A_n} + C_p \cdot M). \quad (7)$$

Механическая характеристика АЭ:

$$P g = E \cdot F_{\varnothing} \cdot (E u j - E p j \frac{T(t) - A_n}{A_k - A_n})^m. \quad (8)$$

В случае деформации кручения дифференциальное уравнение для отыскания $T(t)$, выраженное через угол сдвига или закручивания:

$$N p \cdot \eta(T) = \dot{T} \left(\frac{G \cdot J_{kp}^* \cdot l}{r 0^{m+1}} (\gamma u j r - \gamma p j r \frac{T - A_n}{A_k - A_n})^m \times \times \frac{\gamma p j r}{A_k - A_n} + C p \cdot M \right); \quad (9)$$

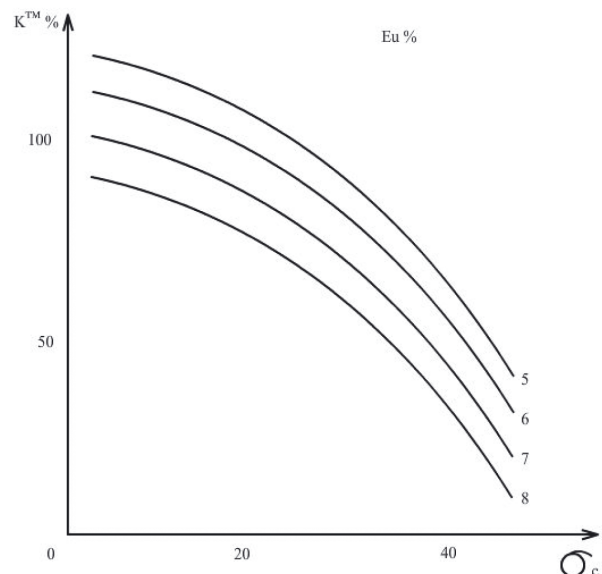


Рис. 6. Зависимость коэффициента термического формовосстановления K^{TM} от величины напряжения сопротивления $\varepsilon_{и}$

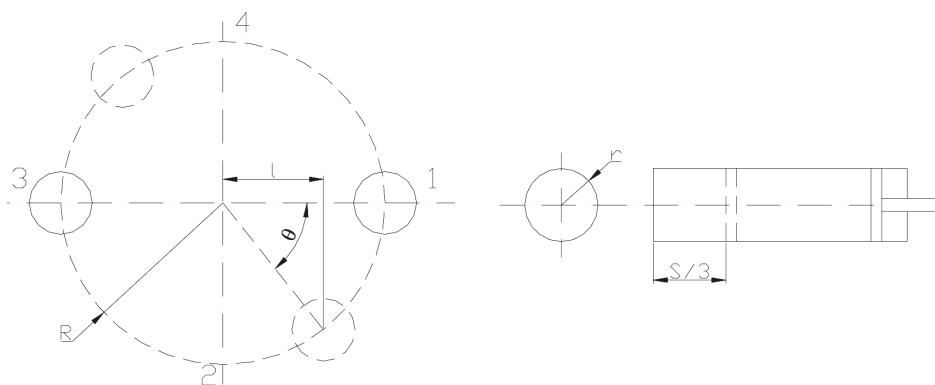


Рис. 7. Схема ТЭУ

$$Np \cdot \eta(T) = \dot{T} \left(\frac{G \cdot J_{кр}^*}{I^m} (\phi_{ij} - \phi_{pj} \frac{T - A_n}{A_k - A_n})^m \times \right. \\ \left. \times \frac{\phi_{pj}}{A_k - A_n} + C_p \cdot M \right).$$

Механическая характеристика, представляющая собой величину крутящего момента как функцию времени:

$$M_{кр} = \frac{G \cdot J_{кр}^*}{I^m} (\phi_{ij} - \phi_{pj} \frac{T(t) - A_n}{A_k - A_n})^m. \quad (10)$$

После определения механической характеристики переходят к динамическому расчету привода и определению оптимального режима управления.

Другим вариантом применения сплавов с памятью, рассматриваемым нами, является разработка энергетической установки (ЭУ), которая использует природное или промышленное тепло.

В общем случае установка состоит из теплоэнергетической установки (ТЭУ), преобразующей тепловую энергию теплоносителя в механическую, и генератора, преобразующего механическую энергию в электрическую. Задача создания специального генератора была решена ранее, поэтому далее рассматриваются вопросы, связанные с созданием ТЭУ. Предлагаемая схема построения ТЭУ представляет собой установку турбинного типа.

Рассмотрим принцип действия установки и проведем расчет суммарного момента для пары элементов при повороте колеса на 360° . Принципиальная схема представлена на рис. 7.

Ротор, частично погруженный в теплую воду, конструктивно представляет собой колесо, на ободе которого размещены герметичные пневмоцилиндры (модули) (рис. 8). Количество пневмоцилиндров и габаритные размеры определяются задаваемой мощностью и нагрузкой. В исходном состоянии пневмоцилиндры имеют объем, равный примерно 1/3 от рабочего. Перемещение поршня

производится активным элементом из сплава с памятью (АЭ).

Каждый модуль поочередно погружается в воду. При этом АЭ, нагреваясь, совершает рабочий ход в на участке 1-2 и увеличивает рабочий объем пневмоцилиндра до полного, в результате чего в пневмоциindre создается разрежение. На участке 2-3 модуль создаёт полезный движущий момент за счёт подъёмной силы. Движущий момент ротора определяется разностью моментов от подъёмной силы модулей на участке 1-2 и участке 2-3.

После выхода пневмоцилиндра из воды АЭ охлаждается, сплав переходит в мартенситное состояние, и за счёт разности наружного и внутреннего давления поршень пневмоцилиндра в пределах половины оборота возвращается в исходное состояние.

Объем газа в цилиндре зависит от угла θ . В положении 1 (см. рис. 7) объем газа равен $\frac{1}{3} \cdot S \cdot F$, где $F = 2 \cdot \pi \cdot r$ – площадь цилиндра.

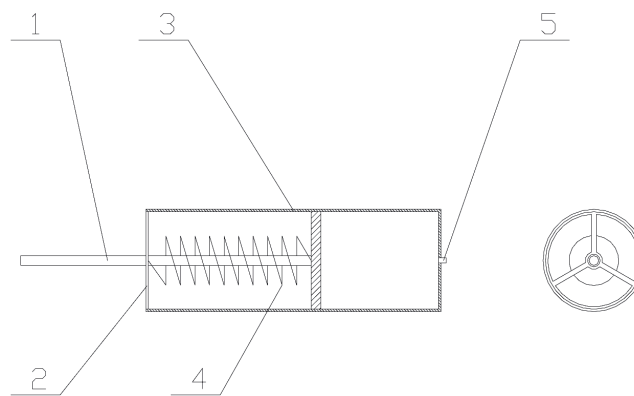


Рис. 8. Схема пневмоцилиндра; 1 – поршень, 2 – крышка стакана, 3 – стакан, 4 – АЭ, 5 – клапан

Определим зависимость объема газа от положения цилиндра $V(\theta)$. Во время прохождения элементом участка 1-2 объем газа в поршне будет меняться по линейному закону в зависимости от угла θ :

$$V = k \cdot \theta + b;$$

при $q = 0$ $b = \frac{1}{3} \cdot S \cdot F$;

при $\theta = \frac{\pi}{2}$ $k = \frac{4 \cdot S \cdot F}{3 \cdot \pi}$;

тогда

$$V_{1-2} = S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right). \quad (11)$$

На участке 2-3 объем газа не зависит от угла θ и равен

$$V_{2-3} = S \cdot F. \quad (12)$$

Рассмотрим действие выталкивающей силы:

$$F_B = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_T,$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

V_T – объем тела, погруженного в жидкость, в нашем случае объем газа в поршне.

В зависимости от положения элемента выталкивающая сила будет разной (с учетом (11)):

$$F_{B_{1-2}} = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right); \quad (13)$$

На участке 2-3 выталкивающая сила не зависит от угла и равна с учетом (12):

$$F_{B_{2-3}} = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F. \quad (14)$$

Во время движения элемента по кругу будет меняться величина l (расстояние от элемента до вертикальной оси) (см. рис. 7.). Величина l зависит от угла θ по закону:

$$l = R \cdot \cos(\theta). \quad (15)$$

Выразим моменты, которые создаются выталкивающей силой, в зависимости от угла θ на всех участках движения. С учетом (13), (14) и (15) получаем.

Участок 1-2:

$$M_{1-2} = R \cdot \cos(\theta) \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right). \quad (16)$$

Участок 2-3:

$$M_{2-3} = R \cdot \cos(\theta) \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F; \quad (17)$$

преобразуем уравнения (16) и (17) к виду

$$M = A \cdot \gamma \cdot R \cdot S \cdot F, \quad (18)$$

где $\gamma = \rho_{ж} \cdot g$; R – радиус колеса; S – ход поршня; F – площадь сечения цилиндра;

$$A = \begin{cases} -\cos(\theta) \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right), \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right]; \\ -\cos(\theta), \theta \in \left[\frac{\pi}{2}; \pi \right]; \\ 0, \theta \in [\pi; 2\pi]. \end{cases}$$

График зависимости величины A от угла θ представлен на рис. 9.

Полученные результаты показывают, что для обеспечения работы установки минимальное количество модулей 4, а для устойчивого движения 16 (рис. 10).

Таким образом, проведенный анализ показали практическую возможность создания теплоэнергетической установки по предложенной схеме.

Можно также отметить, что спроектированная в соответствии с разработанным методом экологически чистая теплоэнергетическая установка отличается малой массой, бесшумностью, компактностью, свойством сохранять работоспособность в различных агрессивных средах, в вакууме, обладает высокой точностью позиционирования и возможностью регулирования скорости без снижения нагрузочной способности, имеет в номинальном режиме мощность на выходе большую, чем у существующих аналогов.

С учетом дешевизны используемых материалов, установка может найти широкое применение в различных областях жизнедеятельности человека, от обеспечения электричеством малонаселенных районов, до увеличения КПД крупногабаритных устройств, имеющих жидкостную систему охлаждения.

Выводы

1. К основным свойствам сплавов с памятью относятся: эффект памяти формы, сверхупругость, повышенные диссипативные свойства, способность преобразовывать тепловую энергию в механическую. Последнее свойство в совокупности с эффектом памяти формы принято называть термо-механической памятью.

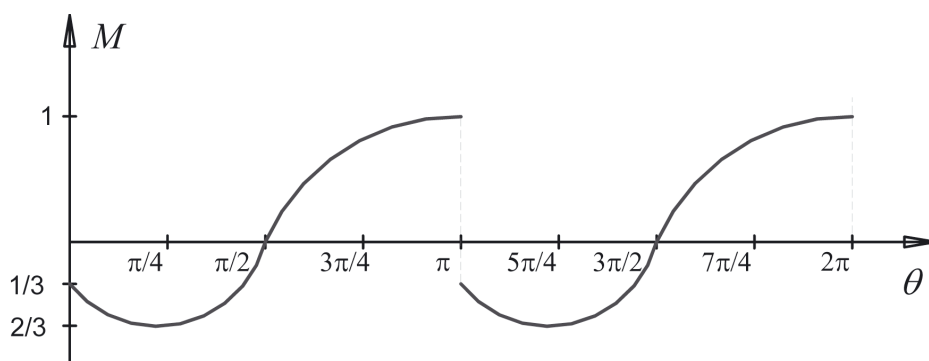


Рис. 9. График $M=f(\theta)$ для пары модулей

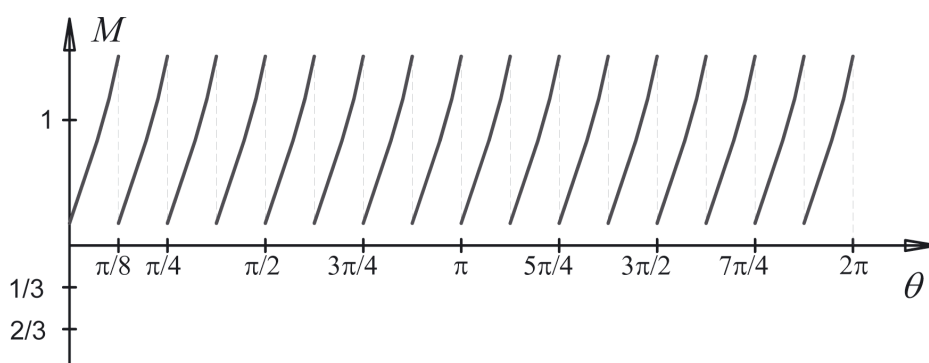


Рис. 10. График $M=f(\theta)$ для восьми пар модулей

2. Для описания свойств сплавов с памятью требуется значительно больше информации, чем в случае традиционных материалов. Как качественно, так и количественно основные свойства сплавов с памятью могут характеризоваться совокупностью функций типа «напряжение–деформация–температура». Приведены основные параметры, характеризующие совокупность специальных свойств сплавов системы никель-титан, необходимых для проектирования термомеханических приводов.

3. Разработана классификация АЭ, включающая в себя конструкции, имеющие простые, технологичные формы, в которых используется продольная деформация, изгиб или кручение, а также их сочетание.

4. Предложены рекомендации по выбору типа АЭ в зависимости от характера движения рабочего органа, величины рабочего хода и рабочего усилия по критерию минимизации его массогабаритных характеристик.

5. Рассмотрены принципиальные схемы термомеханических двигателей на основе сплавов с памятью, рассмотрены вопросы проектирования термомеханических двигателей.

6. Разработана методика расчёта ТЭУ и на основе расчётов даны рекомендации по оптимизации схемы и конструкции ТЭУ рассматриваемого типа.

Библиографический список

1. Шимизу К., Оцука К. Эффекты памяти формы в сплавах. М.: — Наука, 1979.
2. Лихачев В.А., Кугмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. — Л.: ЛГУ, 1987.
3. Путин ВТ., Кондратьев В.В., Хачин В.И. Никелид титана. — М.: Наука, 1992.
4. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / Под ред. В.Р. Гюнтер. — Новосибирск: Наука, 1992.
5. Shape Memory Alloys / Ed. H. Funakubo. Vol. 1-2. New York: Gordon and Breach, 1984.
6. Materials for Smart Systems II / Ed. E.P. George, R. Gotthardt, K. Otsuka et al. Vol. 459. Pittsburg MRS, 1997.
7. Roythurd A.L., Kim TA, Su Q, SlutskerJ., Wuttig M //Acta Mater. 2000. Vol. 46. N 14. P. 5095 5107.
8. Малыгин Г.А. ПФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 7. С. 1286-1291.

9. *Мальгин Г.А.* II ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 9. С. 33-37.
10. *Spearing S.M.* II Acta Mater. 2000. Vol. 48. N 1. P. 179-196.
11. *Уорден К.* Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. – М.: Техносфера, 2006.
12. *Займовский В.А., Колупаева Т.Л.* Необычные свойства обычных металлов /Под ред. Л.Г. Асламазова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.— 192 с. — (Библиотечка «Квант». Вып. 32).
13. *Крахин О.И., Кузнецов А.И., Косов М.Г.* Материалы с термомеханической памятью в станкостроении – М.: ВНИИТЭМР, 1988.
14. *Крахин О.И.* Проектирование элементов конструкций апертурных антенн и ФАР. – М.: Изд-во МАИ 1998.

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)