

УДК 621.896:669.018.6

**С.Н. СОЛОВЬЕВ, В.А. ПОЛИЩУК, А.Л. НИКОЛАЕВ**

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина*

### **К РАСЧЕТУ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ГТД**

Предложена методика расчета термочувствительных элементов с эффектом памяти формы в виде цилиндрических пружин сжатия с витками круглого поперечного сечения, используемых в качестве исполнительных элементов регулятора температуры системы смазки ГТД. Методика опирается на диаграммы сдвига полуфабрикатов из сплавов с памятью формы, полученных для исходного и мартенситного состояний, и позволяет определять диаграммы сжатия и геометрические параметры пружинных элементов термосиловых приводов для малогабаритных исполнительных устройств систем судовых энергетических установок.

**газотурбинный двигатель (ГТД), масляная система (МС), регулятор температуры (РТ), эффект памяти формы (ЭПФ), термочувствительный элемент (ТЧЭ), термосиловой привод (ТСП)**

Оптимальная работоспособность подшипников опор ГТД обеспечивается поддержанием температуры масла в жестко заданном интервале.

Для реализации частичнопоточной схемы системы смазки ГТД с воздушным охлаждением масла перспективным является применение регуляторов с ТЧЭ на базе сплавов с ЭПФ [1].

Для реализации возвратно-поступательного движения исполнительного звена терморегулирующих приборов, малогабаритной тепловой арматуры и приводов циклического действия систем СЭУ целесообразно использовать элементы пружинного вида с ЭПФ. Пружинные ТЧЭ обеспечивают наиболее удачное сочетание величин перемещений, развиваемых усилий, простоту регулировки указанных параметров и температурного интервала срабатывания, а также высокую циклическую стойкость, простоту конструкции и компоновки в узле.

Однако точное проектирование пружинных ТЧЭ с ЭПФ с заданными свойствами затруднено, поскольку кривые напряжение-деформация сплавов с ЭПФ являются нелинейными, модуль сдвига  $G$  и постоянная упругости не являются константами и, следовательно, общая методика проектирования спиральных пружин в этом случае неприменима.

Кроме того, кривая напряжение-деформация изменяется в зависимости от термической или деформационной предыстории, нет достаточно полных данных относительно свойств при кручении и сложном деформационном воздействии.

Задачей данной работы является разработка методики расчета ТЧЭ с ЭПФ в виде цилиндрических пружин сжатия с витками круглого поперечного сечения, позволяющей определять диаграммы сжатия и геометрические параметры таких элементов в составе ТСП. Методика опирается на положения теории больших перемещений цилиндрических винтовых пружин и методы их расчета при заневоливании [2].

При нагружении цилиндрических пружин осевыми силами  $P$  такие внутренние силовые факторы как нормальная сила  $N$ , поперечная сила  $Q$  и изгибающий момент  $M_{из}$  в любом из поперечных сечений витков практически малосущественны, а решающим фактором является крутящий момент  $M_{кр}$ . При этом возникающими в опорах моментами, препятствующими повороту торцов, и дополнительным изгибом пружины вследствие практически несколько эксцентричного приложения силы  $P$  и несоосности витков пренебрегаем, как малыми и не поддающи-

мися точному учету факторами [2]. Таким образом, методика расчет базируется на следующих допущениях:

1) при расчете пружинных ТЧЭ учитываются только напряжения от кручения  $\tau$  (влияние кривизны витка, усилия сдвига и угла подъема витков  $\alpha$  на величину касательных напряжений учитывается коэффициентом корректировки напряжений  $k$ );

2) виток пружины рассматривается как брус малой кривизны;

3) при нагрузке, вызывающей переход за предел упругости, деформированное состояние в сечении витка пружины получается таким, как если бы никакого перехода за предел упругости не было.

Для расчета пружин с ЭПФ необходимо иметь диаграммы сдвига  $\tau = f(\gamma)$  используемых полуфабрикатов (прутков или проволоки), полученные для исходного и мартенситного состояний. К сожалению, такие диаграммы практически невозможно найти в справочной литературе, а имеющиеся не поддаются классификации, что тормозит внедрение методов расчета пружинных ТЧЭ с ЭПФ.

Диаграмму сдвига можно получить из диаграммы растяжения на основе теории пластичности квазиизотропного тела, которая базируется на гипотезе о том, что интенсивность касательного напряжения является функцией интенсивности деформации сдвига, справедливой для любого напряженного состояния. Согласно этой гипотезе, если в двух различных напряженных состояниях интенсивности касательного напряжения  $\tau$  одинаковы, то тогда и интенсивности деформации сдвига  $\gamma$  также одинаковы. Из этих положений получены зависимости:

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}; \quad \gamma = \sqrt{3} \left( \varepsilon - \frac{1-2\mu}{3E} \sigma \right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение;

$\varepsilon$  – относительная деформация;

$E$  – модуль упругости;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Очевидно, что располагая диаграммой растяже-

ния  $\sigma = f(\varepsilon)$ , при помощи формул (1) можно построить диаграмму сдвига  $\tau = f(\gamma)$ .

В том случае, когда отсутствуют диаграммы растяжения сплава с памятью формы (СПФ), оптимальным способом получения диаграмм сдвига является предварительное пластическое обжатие опытной пружины большого индекса и шага, изготовленной по принятой технологии из полуфабриката, намеченного к использованию в ТСП. По полученным в результате такого обжатия нелинейным характеристикам пружины в низко- и высокотемпературном состояниях, построенным в координатах "абсолютная деформация  $\lambda$  – усилие  $P$ " (рис. 1), строят соответствующие диаграммы сдвига ( $\gamma$ ,  $\tau$ ). Для этого используют выражение для момента внутренних сил в любом из поперечных сечений и зависимость, связывающую деформацию сдвига в наружном слое материала  $\gamma_{\max}$  и осевое перемещение  $\lambda$  пружинного ТЧЭ (справедлива как в пределах, так и за пределами упругости) [2]:

$$M_{KP} \approx \frac{PD}{2} = \frac{\pi d^3}{4\gamma_{\max}^3} \int_0^{\gamma_{\max}} \tau \gamma^2 d\gamma; \quad (2)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{\lambda d}{\pi D^2 n}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр проволоки пружины;

$D$  – диаметр навивки пружины;

$n$  – число витков пружины.

После преобразования выражения (2), учитывая, что  $\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\gamma_{\max}}{\gamma_{\max}}$ , для наибольшего касательного напряжения в поперечном сечении проволоки, соответствующего угловой деформации  $\gamma_{\max}$ , имеем

$$\tau_{\max} = \frac{2D}{\pi d^3} \left( 3P + \lambda \frac{dP}{d\lambda} \right). \quad (4)$$

Выражение в скобках в некотором масштабе равно сумме утроенного отрезка  $AB$  и отрезка  $BD$  (рис. 1). Таким образом, задаваясь значениями  $\lambda$ , определяют по диаграмме сжатия пружины соответствующие значения  $P$ , после чего по формулам (4) и

(3) находят  $\tau_{\max}$  и соответствующее ему значение  $\gamma_{\max}$ . Так устанавливается зависимость касательного напряжения от угловой деформации и строится диаграмма сдвига. Особое внимание следует обратить на тот факт, что кривую  $\tau - \gamma$ , предназначенную для расчета реактивных напряжений в исходной фазе, получают путем преобразования кривой  $P - \lambda$ , построенной при понижении нагрузки  $P$ , то есть при разгрузке, а кривую  $\tau - \gamma$  для расчета напряжений наведения в низкотемпературной фазе получают путем преобразования соответствующей кривой  $P - \lambda$  при повышении нагрузки.

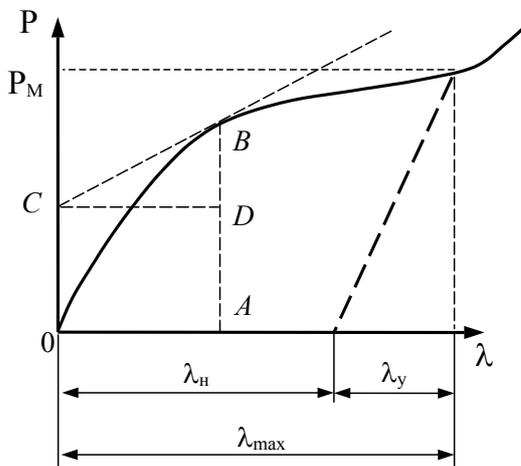


Рис. 1. Диаграмма первичного сжатия пружинного ТЧЭ в низкотемпературном состоянии

Исходными данными являются деформация восстановления формы  $\lambda_n$  и максимальные усилия в холодном и горячем состояниях  $P_M$  и  $P_A$  (либо одно из них и максимальное полезное усилие  $P_n = P_A - P_M$ ).

Руководствуясь диаграммой сдвига для материала ТЧЭ в мартенситном состоянии, задают величину наибольшего сдвига  $\gamma_{\max}$ , который практически целесообразно допустить в конкретном случае (величина  $\gamma_{\max}$  зависит от используемого СПФ, числа циклов работы ТЧЭ и не должна превышать предельной деформации фазовой пластичности  $\gamma_{np}$ ), и вычисляют функцию  $\Phi_M(\gamma_{\max})$  по формуле

$$\Phi_M(\gamma_{\max}) = \frac{1}{\gamma_{\max}^3} \int_0^{\gamma_{\max}} \tau \gamma^2 d\gamma. \quad (5)$$

Интеграл в формуле (5) представляет собой момент инерции площади, ограниченной диаграммой сдвига, осью абсцисс  $\gamma$  и прямой  $\gamma_{\max} = \text{const}$ , относительно оси ординат.

Задав индексом пружины  $c = 3 \dots 8$ , определяют диаметр проволоки  $d = \sqrt{\frac{2P_M c}{\pi \Phi_M(\gamma_{\max})}}$  и диаметр пружины  $D = cd$ .

Усилия и угловые деформации должны удовлетворять соотношению

$$\frac{P_M}{P_A} = \frac{\Phi_M(\gamma_{\max})}{\Phi_A(\gamma_A)}, \quad (6)$$

где  $\Phi_A(\gamma)$  – функция, определяемая уравнением (5), руководствуясь диаграммой сдвига СПФ в исходной фазе;

$\gamma_A$  – сдвиг, соответствующий усилию  $P_A$ , развиваемому при реализации ЭПФ.

Используя диаграмму сдвига для материала ТЧЭ в исходной фазе и выражение (6), определяют величину  $\gamma_A$ . Тогда сдвиг, соответствующий деформации памяти формы  $\lambda_n$ :

$$\gamma_n = \gamma_n - \gamma_A = (\gamma_{\max} - \gamma_y) - \gamma_A, \quad (7)$$

где  $\gamma_n$  – деформация сдвига, соответствующая осадке пружины  $\lambda_n$ ;

$\gamma_y$  – деформация сдвига, возникающая при разгрузке пружинного ТЧЭ после деформации наведения в низкотемпературном состоянии.

В соответствии с формулой (3) и законом разгрузки [3] имеем (рис. 1):

$$\gamma_y = \frac{\lambda_y d}{\pi D^2 n} = \frac{8P_M Dk}{G_M d^3 \pi}. \quad (8)$$

где  $G_M$  – модуль сдвига СПФ в мартенситном состоянии (при расчетах модули сдвига низкотемпературной и высокотемпературной фаз материала ТЧЭ будем считать постоянными величинами, что вполне допустимо для температурных интервалов экс-

плуатации масляной системы ГТД);

$k$  – коэффициент корректировки напряжений.

Для пружин растяжения-сжатия с витками круглого поперечного сечения  $k$  определяется по следующим известным уравнениям [3]:

$$\text{уравнение Валя: } k = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0,615}{c};$$

$$\text{уравнение Ревера: } k = \frac{c}{c-1} + \frac{1}{4c};$$

$$\text{уравнение Вуда: } k = \frac{c}{c-1} + \frac{1}{2c};$$

$$\text{уравнение Генера: } k = 1 + \frac{5}{4c} + \frac{7}{8c^2} + \frac{1}{c^3}.$$

Число витков  $n$ , необходимое для обеспечения заданной деформации восстановления формы  $\lambda_n$ :

$$n = \frac{\lambda_n d}{\pi D^2 \gamma_n}.$$

Зная параметры пружины  $d$ ,  $D$  и  $n$ , учитывая (3), (7), (8), определяют:

– максимальную осадку пружины

$$\lambda_{\max} = \frac{\pi D^2 n \gamma_{\max}}{d}; \quad (9)$$

– осадку, снимаемую при разгрузке в мартенситном состоянии

$$\lambda_y = \frac{8 P_M D^3 n k}{G d^4};$$

– деформацию наведения

$$\lambda_H = \lambda_{\max} - \lambda_y;$$

– деформацию пружины после реализации ЭПФ

$$\lambda_A = \frac{\pi D^2 n}{d} \gamma_A \text{ или } \lambda_A = \lambda_H - \lambda_n.$$

Для получения максимальной работы термомеханического возврата необходимо исключить зазор в силовом узле между ТЧЭ и соединяемыми деталями и не производить разгрузку ТЧЭ в мартенситном состоянии, тогда  $\lambda_H = \lambda_{\max}$ .

Руководствуясь диаграммой сдвига материала ТЧЭ в мартенситной фазе, строится диаграмма сжатия пружинного ТЧЭ в режиме наведения деформации при касательных напряжениях больше фазового (дислокационного) предела текучести при сдвиге

проволоки. Учитывая выражения (2) и (5), получим

$$P = \frac{\pi d^3 \Phi(\gamma_{\max})}{2D}. \quad (10)$$

Тогда, задаваясь значениями  $\gamma_{\max}$ , по формуле (10) при помощи предварительно построенного графика функции  $\Phi(\gamma_{\max})$  подсчитывается сила  $P$ , а по формуле (9) – осадка пружины  $\lambda$ , после чего строится диаграмма сжатия  $\lambda - P$  (рис. 1).

Построение диаграммы сжатия для пружинного ТЧЭ в режиме восстановления деформации осуществляется аналогично, руководствуясь диаграммой сдвига проволоки из СПФ в исходной фазе (рис. 2). При этом, из-за незамкнутости термомеханического гистерезиса на первых циклах, данную диаграмму сдвига предварительно необходимо сместить относительно начала координат по оси  $\gamma$  на величину  $\gamma_{\text{ост}}$ :

$$\gamma_{\text{ост}} = \gamma_n (1 - C),$$

где  $C = \frac{\gamma_n^0}{\gamma_n}$  – степень восстановления деформации;

$\gamma_n^0$  – сдвиг при реализации ЭПФ, когда напряжение сопротивления  $\tau_c = 0$ .

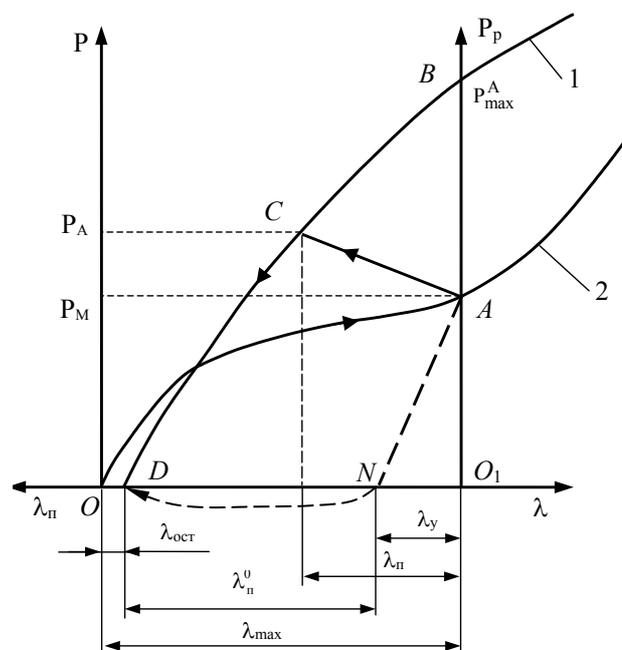


Рис. 2. Деформационно-силовые диаграммы пружинного ТЧЭ из СПФ в высокотемпературном (1) и мартенситном (2) состояниях

Реактивные напряжения, генерируемые в процессе обратного фазового превращения, достигают максимального значения в абсолютно жестких условиях противодействия, т.е. при полном запрещении восстановления деформации. Развиваемое при этом усилие  $P_{\max}^A$  (прямая  $AB$ , рис. 2) определяется по формуле (10) для ТЧЭ в высокотемпературном состоянии при  $\gamma = \gamma_n$ , а деформация памяти формы  $\lambda_n = 0$ . Если пружинный ТЧЭ после деформации в мартенситной фазе разгружен, а затем нагрет в свободном состоянии, то процесс формовосстановления идет по пути  $AND$ , где  $AN$  – упругое, а  $ND$  – термоупругое восстановление. При этом деформация памяти формы, когда напряжение сопротивления отсутствует

$$\lambda_n^0 = C\lambda_H = \lambda_H - \lambda_{ост},$$

где  $\lambda_{ост}$  – остаточная деформация пружины, соответствующая сдвигу  $\gamma_{ост}$  в сечениях витков

$$\lambda_{ост} = \frac{\pi D^2 n}{d} \gamma_n (1 - C) = \lambda_H (1 - C).$$

При конечной жесткости сопряженной системы генерирование реактивных напряжений будет сопровождаться восстановлением первоначальной формы ТЧЭ (кривая  $AC$ , рис. 2). Вид кривой  $AC$  определяется системой, сопряженной с пружинным ТЧЭ.

Из соображений максимальной упругости и минимизации геометрических размеров термосилового узла целесообразно осадку пружины с ЭПФ в режиме наведения деформации осуществлять практически до соприкосновения витков. Тогда длина пружины-заготовки для ТЧЭ

$$H_3 = H_K + \lambda_{\max} + \delta n,$$

где  $H_K = (n - 0,5)d$  – высота пружины при сжатии ее до соприкосновения витков;

$\delta \approx 0,1d$  – зазор между витками, необходимый для уменьшения максимального напряжения наведения, возрастающего на конечном участке характеристики в связи с неравномерностью шага в пределах допусков и допуском на диаметр проволоки.

Длина пружины после разгрузки в мартенситном состоянии

$$H_M = H_3 - \lambda_H.$$

Длина пружины в высокотемпературном состоянии (после реализации ЭПФ и генерирования усилия  $P_A$ ):

$$H_A = H_3 - \lambda_A \text{ или } H_A = H_M + \lambda_n.$$

После разгрузки пружины в исходной фазе ее длина увеличится до величины

$$H_A^0 = H_3 - \lambda_{ост} \text{ или } H_A^0 = H_M + \lambda_n^0.$$

## Выводы

Методика расчета ТЧЭ с ЭПФ в виде цилиндрических пружин сжатия опирается на диаграммы сдвига  $\tau = f(\gamma)$  полуфабрикатов из СПФ, полученные для исходного и мартенситного состояний, и позволяет определять диаграммы сжатия и геометрические параметры пружинных ТЧЭ, что необходимо для разработки исполнительных адаптивных устройств на базе ТСП в инженерной практике систем смазки ГТД. Применение деформационно-силовых чувствительных элементов на основе СПФ является перспективным и имеет значительные преимущества по сравнению с существующими.

## Литература

1. Соловьев С.Н., Полищук В.А. Совершенствование систем смазки ГТД с воздушным охлаждением масла // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО “Мотор Сич”. – 2004. – № 2. – С. 25 – 29.
2. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с.
3. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки и др.; Под ред. Х. Фунакубо: Пер. с японск. – М.: Металлургия, 1990. – 224 с.

Поступила в редакцию 6.06.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.П. Клименко, Николаевский государственный гуманитарный университет им. Петра Могилы, Николаев.