

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Полищук В. А., Николаев А. Л.

Исследовано влияние термической и термомеханической обработки на обратимое формоизменение при теплосменах цилиндрических пружин сжатия с эффектом памяти формы в интервале температур мартенситного превращения. Определены зависимости и установлены режимы предварительной термообработки и последующего термосилового циклирования, обеспечивающие стабилизацию характеристик пружинных термочувствительных элементов и формирование оптимизированных параметров эффектов памяти для заданных геометрических характеристик пружин. Установленные зависимости позволяют осуществлять расчет и проектирование термосиловых приводов циклического действия для технологических систем.

Досліджено вплив термічної й термомеханічної обробки на оборотне формовідновлення при теплосмінах циліндричних пружин стискання з ефектом пам'яті форми в інтервалі температур мартенситного перетворення. Визначено залежності та встановлено режими попередньої термообробки та подальшого термосилового циклування, що забезпечують стабілізацію характеристик пружинних термочутливих елементів та формування оптимізованих параметрів ефектів пам'яті для заданих геометричних характеристик пружин. Встановлені залежності дозволяють здійснювати розрахунок та проектування термосилових приводів циклічної дії для технологічних систем.

Influence of the heat and mechanical treatment on the reversible change of shape on the cylindric compression springs with the shape memory effect under the cyclic change of temperatures during the intervals of martensite transformation is investigated. The dependences and the mode of preliminary heat treatment and subsequent thermopower cycling, providing stabilization characteristics of spring thermosensitive elements and the formation of the memory effects of the optimized parameters for a given geometric characteristics of the springs. Established dependences allow calculation and design of cyclic action thermoactuating drives for process systems.

Полищук В. А.

канд. техн. наук, доц., НУК имени  
адмирала Макарова  
[pva00@rambler.ru](mailto:pva00@rambler.ru)

Николаев А. Л.

канд. техн. наук, доц., НУК имени  
адмирала Макарова

НУК имени адмирала Макарова – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев.

УДК 669.017

Полищук В. А., Николаев А. Л.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРУЖИННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для реализации возвратно-поступательного движения деформационно-силовых элементов и приводов циклического действия технологических систем. Одними из наиболее перспективных являются схемы термосиловых приводов (ТСП) с термочувствительными элементами (ТЧЭ) в виде спиральных пружин с эффектом памяти формы (ЭПФ). Поскольку именно 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 [1, 2].

Целью работы является определение режимов предварительной термообработки и последующего термосилового циклирования для обеспечения стабилизации характеристик пружинных ТЧЭ и формирования оптимизированных параметров эффектов памяти для заданных геометрических характеристик пружин, что позволит осуществлять проектирование ТСП циклического действия для технологических систем.

Учитывая практически полное отсутствие информации относительно пружин с ЭПФ, был проведен ряд экспериментальных исследований пружинных образцов из сплавов типа никелида титана ВСП-1 и ТН-1К [3, 4, 5]. Это позволило, исходя из теоретических предположений (теория больших перемещений цилиндрических винтовых пружин, методы расчета пружин при заневоливании), разработать методику расчета ТЧЭ с ЭПФ в виде цилиндрических пружин сжатия с витками круглого поперечного сечения. Методику позволяющую определять их геометрические параметры и диаграммы сжатия, что необходимо для создания и освоения исполнительных устройств на базе ТСП в инженерной практике.

Разработанные методы расчета позволяют определять геометрические и деформационно-силовые параметры ТЧЭ в виде пружин растяжения-сжатия, применяемых непосредственно после окончательной термообработки в механизмах одноразового действия технологических систем. Последующее термоциклирование ТЧЭ через интервал фазового превращения сопровождается на начальном этапе (из-за незамкнутости термомеханического гистерезиса) постепенным накоплением деформации в направлении приложенного напряжения [2]. Это объясняется тем, что при напряжениях выше фазового предела текучести одновременно с пластичностью превращения в материале ТЧЭ инициируются и другие каналы деформации, обусловленные развитием аккомодационных сдвигов, неизотермической ползучести, а после достижения обычного предела текучести – и дислокационной пластичности.

Кроме того наблюдается фазовый и деформационный наклеп материала, что повышает дислокационный предел текучести и степень обратимости деформации (из-за подавления каналов необратимой деформации); скорость неизотермической ползучести уменьшается и стабилизируется. Происходит текстурирование мартенсита, т. е. образование и преимущественный рост только тех его кристаллографических вариантов, которые обеспечивают наибольшее формоизменение ТЧЭ в направлении приложенной нагрузки. Этому способствует формирование естественно наследуемых дефектных структур, в частности дислокаций, что приводит к усилению тенденции металла к таким трансформациям решетки, когда прямое и обратное превращение реализуются по принципу «точно вперед – назад». Возникающая вследствие термосилового циклирования (ТСП) дефектная структура, как правило, резко анизотропна, в результате формируются поля локальных ориентированных в пространстве микронапряжений, действие которых на мартенситное превращение

аналогично внешней нагрузке. Как следствие ТЧЭ обретает способность интенсивно накапливать деформацию в полцикле охлаждения даже при отсутствии внешней нагрузки (реализация обратимого ЭПФ).

Следовательно, в случае использования пружинных ТЧЭ в ТСП циклического и непрерывного действия, необходимо после термообработки по наведению ЭПФ осуществлять окончательную термомеханическую обработку в виде стабилизирующего ТСЦ. На основании экспериментальных данных [2] были получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие априори оценить изменения деформационно-силовых характеристик пружинных ТЧЭ из TiNi (ВСП-1 и ТН-1К) в процессе ТСЦ в зависимости от количества циклов и деформации наведения.

Изменение максимального напряжения наведения при деформировании в мартенситном состоянии описывается зависимостью следующего вида:

$$\overline{\tau}_H = u_0(\gamma_H) + u_1(\gamma_H)N^{u_2(\gamma_H)}, \quad (1)$$

$$\text{где } \overline{\tau}_H = \tau_N / \tau_{N=0};$$

$\tau_N$  и  $\tau_{N=0}$  – максимальные напряжения наведения соответственно после  $N$  циклов и без ТСЦ;

$u_0(\gamma_H)$ ,  $u_1(\gamma_H)$ ,  $u_2(\gamma_H)$  – линейные функции от деформации наведения  $\gamma_H$ , причем

$$u_i(\gamma_H) = \begin{cases} A_i\gamma_H + B_i & \text{при } \gamma_H \leq \gamma_{пр}; \\ C_i\gamma_H + D_i & \text{при } \gamma_H \geq \gamma_{пр}; \end{cases}$$

где  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  – константы, характеризующие циклические свойства сплава и определяемые по экспериментальным данным (значения констант  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  для пружинных ТЧЭ из сплава ВСП-1 приведены в таблице 1);

$N$  – количество термосиловых циклов (см. рис. 1, а).

Среднеквадратическое отклонение (СКО) экспериментальных данных от расчетных, определяемых уравнением (1), не превышает 2,4 %.

Таблица 1.

Параметры материала пружинных ТЧЭ (сплав ВСП-1)

$u_i(\gamma_H)$	$\overline{\tau}_H$				$\overline{\tau}'_H$		$\overline{\tau}_p$		$\gamma_{ос}$		$\gamma_{об}$	
	$A_i$	$B_i$	$C_i$	$D_i$	$A_i$	$B_i$	$A_i$	$B_i$	$A_i$	$B_i$	$A_i$	$B_i$
$u_0$	3,404	$2,336 \cdot 10^4$	-5,003	0,586	-1,859	0,659	0,124	0,965	0,226	$5,466 \cdot 10^{-3}$	0,43	$-2,188 \cdot 10^{-3}$
$u_1$	-3,404	1,003	5,084	0,411	2,794	0,255	-0,128	0,036	-0,226	$-5,314 \cdot 10^{-3}$	-0,446	$2,588 \cdot 10^{-3}$
$u_2$	-0,649	-0,222	3,524	-0,512	-0,481	0,021	-0,031	-0,028	0,049	-0,035	-0,302	-0,016

Изменение максимального напряжения наведения при деформировании в интервале МП (при реализации эффекта пластичности превращения (ЭПП)) аппроксимируется экспоненциальной зависимостью вида:

$$\overline{\tau}'_H = u_0(\gamma_H) + u_1(\gamma_H) \exp[u_2(\gamma_H)N], \quad (2)$$

$$\text{где } \overline{\tau}'_H = \tau'_N / \tau'_{N=0};$$

$$u_i(\gamma_H) = A_i\gamma_H + B_i.$$

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от расчетных, определяемых уравнением (2), не превышает 2,5 % (см. рис. 1, б).

Изменение максимального реактивного напряжения (при реализации ЭПФ) происходит также по экспоненциальной зависимости (см. рис. 1, в):

$$\bar{\tau}_p = u_0(\gamma_n) + u_1(\gamma_n) \exp[u_2(\gamma_n)N],$$

$$\text{где } \bar{\tau}_p = \frac{\tau_p}{\tau_{pN=0}};$$

$\tau_p$  и  $\tau_{pN=0}$  – максимальные реактивные напряжения соответственно после  $N$  циклов и без ТСЦ;

$$u_i(\gamma_n) = A_i \gamma_n + B_i.$$

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от расчетных, определяемых уравнением  $\bar{\tau}_p = \varphi(N, \gamma_n)$ , не превышает 1,5 %.

Влияние ТСЦ и величины деформации наведения на суммарную остаточную деформацию  $\gamma_{oc}$  и обратимую деформацию  $\gamma_{об}$  (накапливается при реализации обратимого ЭПФ) может быть описано аналогичными экспоненциальными зависимостями.

Поверхности  $\gamma_{oc} = \varphi(N, \gamma_n)$  и  $\gamma_{об} = \varphi'(N, \gamma_n)$  представлены соответственно на рис. 2, а, б и имеют СКО от данных экспериментов менее 2 %.

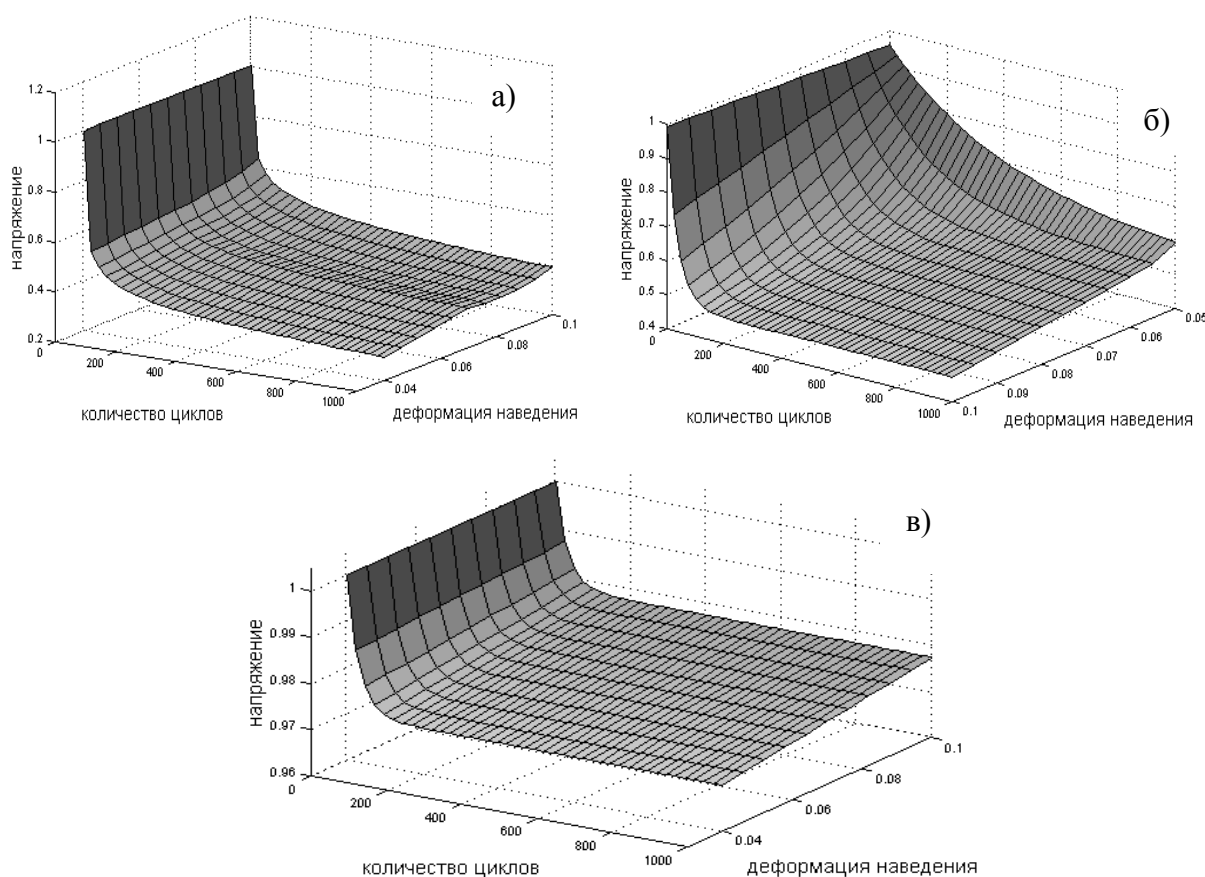


Рис. 1. Изменение максимальных напряжений наведения деформации и реактивных напряжений в процессе ТСЦ термочувствительных элементов:

а – наведение деформации в мартенситном состоянии; б – наведение деформации при реализации ЭПФ; в – реактивные напряжения

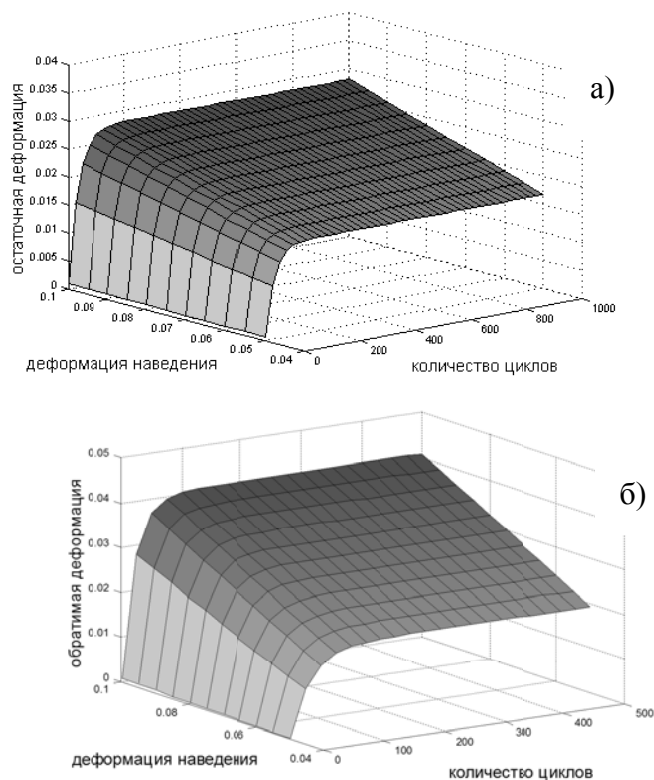


Рис. 2. Изменение суммарных деформаций ТЧЭ в процессе ТСЦ:  
а – остаточная деформация; б – обратимая деформация

## ВЫВОДЫ

Использование установленных зависимостей дает возможность по-новому оценивать воздействие термообработки и показать, что полученные экспериментальные результаты в большей степени определяются методикой исследования, т.к. следует иметь в виду, что однократное измерение параметров, характеризующих эффекты памяти, является циклом термомеханической тренировки.

Полученные зависимости определяют рациональные значения деформации наведения  $\gamma_n$  и необходимое количество термоциклов  $N$ , обеспечивающие стабилизацию характеристик пружинных ТЧЭ и формирование оптимизированных параметров эффектов памяти для заданных геометрических характеристик ТЧЭ, и позволяют осуществлять расчет и проектирование термосиловых приводов для технологических систем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полицук В. А. Проектирование термомеханических приводов для масляных систем СЭУ/В. А. Полицук. // *Кораблестроение: освіта, наука, виробництво: Матеріали Міжнар. конф: В 2 т.* – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – Т. II. – С. 78 – 79.
2. Полицук В. А. Удосконалення систем змащування суднових ГТД шляхом застосування функціональних термочутливих елементів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук./А. В. Полицук. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – 22 с.
3. Исследование влияния геометрических параметров на характеристики силовых элементов из сплавов с эффектом памяти формы/ Албантов А. К. [и др.] // *Зб. наук. пр. УДМТУ.– Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 1.– С. 46 – 52.*
4. Исследование влияния термической и термомеханической обработки на характеристики силовых элементов из сплавов с памятью формы/ Албантов А. К. [и др.] // *Зб. наук. пр. УДМТУ.– Миколаїв : УДМТУ, 2001. – № 1. – С. 54 – 60.*
5. Полицук В. А. Влияние различных факторов на скорость восстановления деформации силового элемента с ЭПФ/ Полицук В. А. // *Зб. наук. пр. УДМТУ.– Миколаїв: УДМТУ, 2000. – № 2. – С. 87 – 98.*