

05;12

Использование материалов с эффектом памяти формы в качестве рабочего тела в мартенситных роторных двигателях

© А.Г. Манджавидзе,¹ В.А. Барнов,¹ С.В. Соболевская,¹ О.В. Маргвелашвили²

¹ Институт физики им. Э. Андроникашвили АН Грузии,
0177 Тбилиси, Грузия
e-mail: valeri@iphac.ge

² Институт механики машин им. Р. Двали АН Грузии,
0186 Тбилиси, Грузия

(Поступило в Редакцию 10 августа 2005 г.)

Разработан мартенситный роторный двигатель оригинальной конструкции. Исследованы физические свойства рабочего материала, определены силовые характеристики двигателя. Показано, что в результате циклирования температуры и деформации происходят изменения свойств рабочего элемента (витой пружины из никелида титана), снижающие эффективность работы двигателя.

PACS: 77.84.Dy

Использование материалов с эффектом памяти формы в качестве элементов тепловых двигателей, способных работать на низкопотенциальной тепловой энергии (геотермальные воды, бросовая горячая вода промышленных предприятий и теплоэлектрических станций и т.д.), давно привлекает внимание. В таких двигателях используются материалы с эффектом памяти формы (например, сплав титана и никеля — нитинол), которые запоминают форму, приобретенную в высокотемпературной (аустенитной) фазе, и полностью восстанавливают ее после перевода в эту фазу, если она в допустимых пределах деформации была изменена в низкотемпературной (мартенситной) фазе. При восстановлении формы материал может развивать напряжения, значительно превосходящие те, которые необходимы для изменения его формы (деформации) в низкотемпературной фазе. Именно разность этих напряжений (на самом деле, ее малая часть) используется для извлечения полезной мощности.

Существует много вариантов таких двигателей, защищенных патентами (см., например, [1,2]), однако ни один из них не дает мощности, перспективной для промышленного использования. Нами детально исследованы принципы и особенности работы нитиноловых двигателей, и на основе полученных знаний создано несколько лабораторных моделей оригинальной конструкции [3–5], которые свободны от многих недостатков, присущих существовавшим ранее моделям.

Известно, что исходные физические свойства ненагруженного рабочего материала (нитинола), такие как температуры начала и конца мартенситного (M_s и M_f) и аустенитного (A_s и A_f) переходов, а также зависимости „напряжение–деформация“ ($\sigma = f(\varepsilon)$), упругие свойства материалов и т.п. не могут быть реально использованы для их практического применения, так как в процессе циклирования деформации и температуры происходят существенные изменения состояния материала. При этом наблюдается смещение температур

фазовых переходов и соответственно изменение свойств материала в каждой температурной области [6,7].

В созданном нами мартенситном двигателе в качестве рабочего элемента использована пружина, изготовленная из нитинола следующего состава: Ni — 49%, Ti — 44.77%, Cu — 6.04%. Пружина имеет определенные преимущества, по сравнению с рабочим элементом из проволоки, поскольку позволяет получать большие деформации при незначительном изменении растягивающего усилия.

Пружина изготавливалась следующим образом: нитиноловая проволока диаметром $d = 0.85$ mm наматывалась на оправку диаметром $D = 4$ mm, в мартенситном состоянии средний диаметр пружины был равен $D_1 = 4.85$ mm, а коэффициент упругости $C = D_1/d = 5.7$. После фиксации концов пружины на оправке (с целью запоминания сжатой формы) она отжигалась в вакууме при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$ в течение 1 часа, а затем медленно охлаждалась в вакууме до комнатной температуры. Таким образом пружина „запоминала“ форму „виток к витку“.

На рис. 1 приведены зависимости осевой силы F натяжения пружины от величины деформации ε . Кривые 1–4 относятся к аустенитной фазе, 5–7 — к мартенситной. В аустенитной фазе ($T = 95^\circ\text{C}$) линейная область зависимости $F(\varepsilon)$ (кривая 1) имеет ширину $\varepsilon = 0$ –80%. При дальнейшем увеличении растягивающего усилия наблюдается отклонение этой зависимости от линейности. С началом этого отклонения появляется невосстанавливаемая деформация ε_{irr} , которая медленно увеличивается с ростом растягивающего усилия, а при $\varepsilon = 120\%$ резко возрастает, т.е. начинается область пластического течения, о чем свидетельствует резкое увеличение невосстанавливаемой деформации после снятия нагрузки (кривая 2). На рис. 1 также показано влияние циклирования температуры и деформации на зависимость $F = f(\varepsilon)$ (кривые 3 и 4). При циклировании происходит деградация материала, уменьшается угол

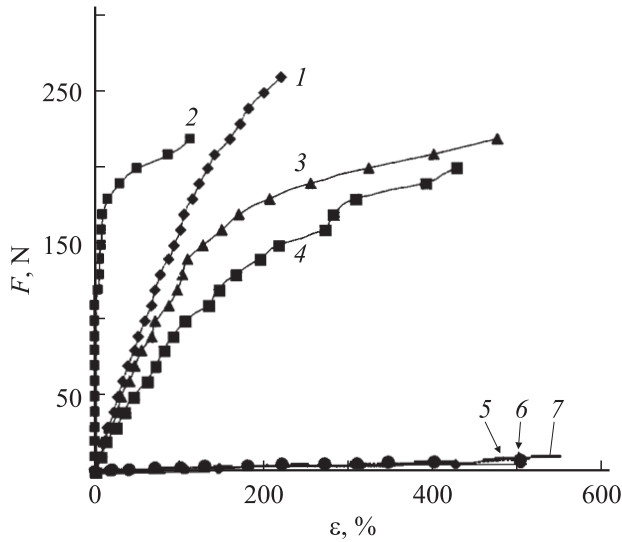


Рис. 1. Зависимости осевой силы F натяжения пружины от величины ее деформации ε . Кривая 1 — „свежая“ пружина в аустенитном состоянии; 2 — невозстанавливаемая деформация; 3 — после 100 циклов деформации и температуры; 4 — после 10 000 циклов. Кривые 5–7 — соответствуют мартенситному состоянию пружины; 5 и 6 — для отработанной пружины; 7 — для „свежей“.

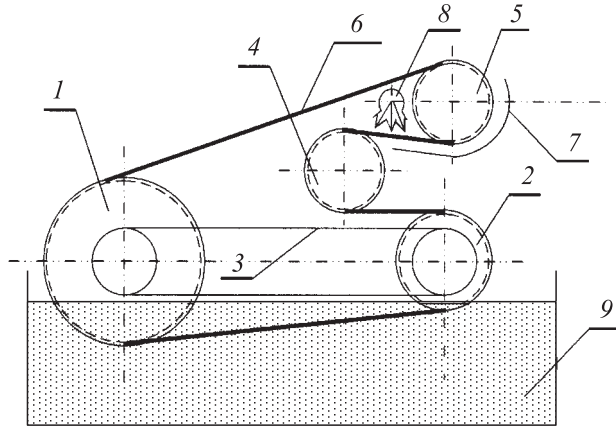


Рис. 2. Схематическое изображение мартенситного роторного двигателя.

наклона кривой в аустенитной фазе. Кроме того, как видно из рис. 1 (кривые 1–3), с увеличением числа циклов уменьшается разность сил, соответствующих аустенитной и мартенситной фазам, тогда как зависимости $F = f(\varepsilon)$ при циклировании в мартенситной фазе не претерпевают существенных изменений.

В мартенситной фазе ($T = 25^\circ\text{C}$) пластическая деформация начинается при сравнительно малых величинах $\varepsilon \leq 20\%$. С ростом ε зависимость $F = f(\varepsilon)$ становится почти линейной. При снятии растягивающего усилия в мартенситной фазе деформация полностью восстанавливается (кривые 5–7).

Петля из пружины с указанными свойствами была использована для проведения испытаний созданного мар-

тенситного двигателя, схематически представленного на рис. 2 [5]. Двигатель содержит ведущий (большой) 1 и ведомый (меньший) шкив 2. Между шкивами осуществляется дифференциальная связь 3 (на рис. 2 показана в виде ремня 3). Обводные ролики 4 и 5 расположены таким образом, чтобы, во-первых, обеспечивать максимально возможные углы обхвата рабочим элементом шкивов и, во-вторых, чтобы нитиноловый рабочий элемент 6 (замкнутая пружина) на участке охлаждения от ролика 5 до шкива 1 располагался с некоторым наклоном по направлению своего движения. Благодаря такому расположению, а также поддону 7 подводимая патрубком 8 охлаждающая рабочий элемент вода, не попадает в ванну 9 с горячей водой. Узлы двигателя смонтированы на плате. На каждом из рабочих шкивов 1 и 2 расположены по три металлических шпильки под углом 120° между ними.

Достоинством данной конструкции двигателя является возможность использования произвольного числа расположенных параллельно друг другу рабочих элементов (пружин), охватывающих многоручевые шкивы и обводные ролики.

Длина недеформированной пружины, намотанной „виток к витку“, выбиралась такой, чтобы начальная деформация позволяла двигателю работать в желаемой области деформации, обеспечивающей максимальную разность сил между мартенситной и аустенитной фазами.

Результаты проведенных исследований силовых характеристик двигателя с одной, двумя, тремя и четырьмя пружинами (рабочими элементами) представлены на рис. 3. Как и ожидалось, увеличение числа пружин повышает мощность двигателя. В результате экспериментов получены следующие значения отношения максимальных мощностей: $N_2^{\max}/N_1^{\max} = 2.47$; $N_3^{\max}/N_1^{\max} = 3.44$;

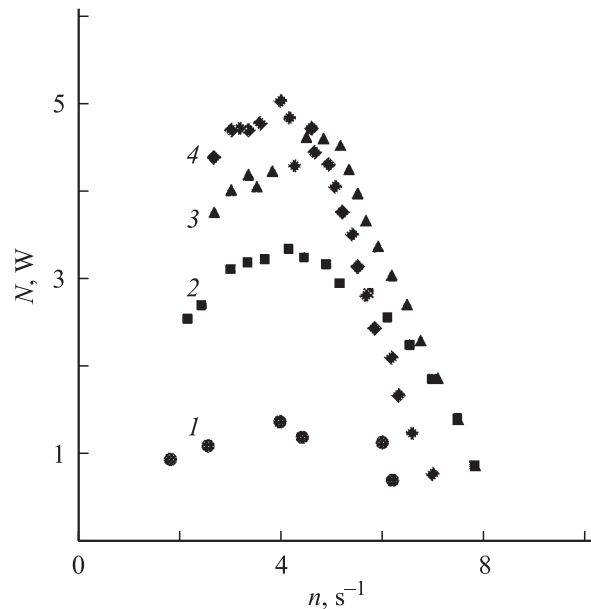


Рис. 3. Силовые характеристики двигателя с одной, двумя, тремя и четырьмя рабочими элементами (пружинами).

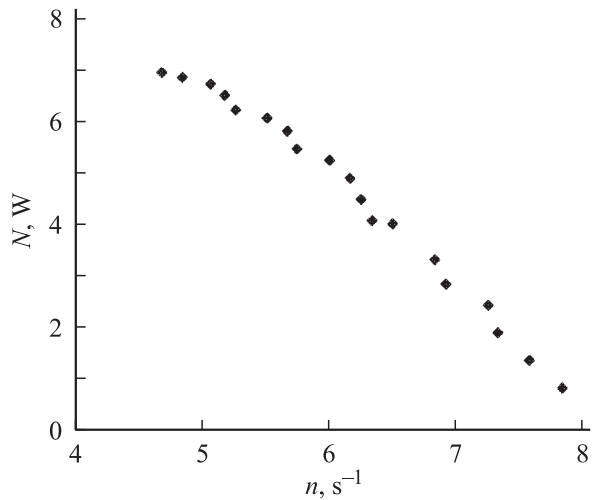


Рис. 4. Зависимость мощности мартенситного роторного двигателя от числа оборотов рабочего шкива для случая четырех пружин.

$N_4^{\max}/N_1^{\max} = 3.74$, где индексы 1, 2, 3 и 4 соответствуют количеству рабочих элементов. Здесь $N_4^{\max} = 5.05 W$.

Указанные измерения были проведены со шкивами, обтянутыми гладкой резиной. При работе двигателя наблюдалась пробуксовка пружины на шкивах тем сильнее, чем больше по величине была нагрузка, что существенно снижало эффективность работы двигателя. Для исключения пробуксовки шкивы обтягивались зубчатой резиной, в результате чего удалось увеличить мощность до $N_4^{\max} = 6.97 W$. Однако в процессе работы двигателя зубчатая резина стиралась, что приводило к уменьшению мощности. Поэтому резина была заменена тремя металлическими шпильками на ободу шкива, что обеспечило надежное сцепление рабочего элемента со шкивами, максимальное же значение мощности двигателя с четырьмя пружинами было порядка $7 W$ (рис. 4).

В результате многократного циклирования температуры и деформации ($\sim 10^5$ циклов) обнаружено аномальное поведение рабочего элемента. Пружина приобрела новые свойства в мартенситной фазе, т.е. произошло запоминание удлиненной формы вместо первоначальной „виток к витку“, которая начинает проявляться при переходе через начало мартенситного превращения M_s . Удлинение пружины составило $\sim 24\%$, что вызвало уменьшение первоначальной деформации от 600 до 169%. Такая деформация близка к своему значению в начале пластического течения в аустенитной фазе. Таким образом, в результате длительной работы двигатель сам выбирает ту величину начальной деформации, при которой исчезает невосстанавливаемая деформация в аустенитной фазе.

Правильный выбор конструкции мартенситного двигателя и рабочего элемента в виде витой пружины позволили получить мощность двигателя $\sim 7 W$, а проведенные исследования физических свойств свежих и отработанных пружин из нитинола позволили выявить причину возникновения новых свойств материала,

отрицательно действующих на эффективность работы двигателя.

Установлено, что для нормальной работы двигателя необходимо выбрать такой режим термообработки рабочего материала, при котором разность сил между мартенситной и аустенитной фазами была бы максимальной, а линейный участок на зависимости $F = f(\epsilon)$ был бы как можно длиннее. При таком подходе предполагается, что рабочий материал не будет приобретать свойства, которые отрицательно действуют на эффективность работы мартенситного двигателя.

Другая возможность повышения удельной мощности заключается в оптимизации условий теплообмена между нагревателем и рабочим элементом, а также между холодильником и рабочим элементом.

Список литературы

- [1] Hochstein P.A. // Proc. of the Nitinol Heat Engine Conf., Silver Spring, Maryland, 1978.
- [2] Schiller E.H. // Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University for a degree of Master of Science. Blacksburg; VA, 2002. 72 p.
- [3] Манджavidze А.Г., Маргвелашивили О.В., Саралидзе З.К. и др. АС. 7237 „Роторный двигатель“ в „Грузпатенте“. 2003.
- [4] Манджavidze А.Г., Маргвелашивили О.В., Саралидзе З.К. и др. АС. 7175 „CapMap“ в „Грузпатенте“. 2003.
- [5] Манджavidze А.Г., Маргвелашивили О.В., Саралидзе З.К. и др. АС. 7162 „Качающийся двигатель“ в „Грузпатенте“. 2003.
- [6] Brinson L.C. // Journ. of Intelligent Material Systems and Structures. 1993. Vol. 4. P. 229–242.
- [7] Zhang X.D., Rogers C.A., Ziang C. // Journ. of Intelligent Material Systems and Structures. 1997. Vol. 8. P. 353–362.