\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**7**

 **Мартенситные моторы и**

 **твердотельные тепловые насосы**

*Р.А. Антонов, М.А.Быбик, Р.М. Гречишкин, В.С. Калашиков, А.П. Каманцев, В.В. Коледов, Д.С. Кучин, Е.В. Морозов, А.В. Петров, С.Ю. Федотов,*

*С.В. Фон Гратовски*

Введение

Последняя глава книги посвящена главной идее всего издания. Эта идея заключается в том, что основное препятствие на пути широкого применения мартенситного перехода и ЭПФ в механических двигателях – низкий КПД – принципиально можно преодолеть, если приводить мартенситный мотор в движение потоками горячей и холодной теплообменной жидкости, полученными от очень эффективного теплового насоса. Как известно, коэффициент эффективности теплового насоса, согласно теореме Карно, существенно выше единицы.

Прежде всего, мы обсудим мартенситный мотор. На протяжении всей книги термоупругий мартенситный переход изучался, как физическое явление, но образец сплава с мартенситным переходом и ЭПФ, по существу, сам является двигателем, преобразующим в механическую работу тепловой поток, поступающий в него для превращения из мартенсита в аусетнит и отдающийся при переходе аустенита обратно в мартенсит.

В литературе имеется много предложений по созданию мартенситных моторов. Обзор патентов и статей на эту тему дан в [1]. Композитные микроинструменты с ЭПФ, подробно описанные выше в главе 4, 2-го тома данной книги, конечно, тоже относятся к мартенситным двигателям. В этой главе мы сделаем оценку принципиально достижимого КПД мартенситного мотора на основе сплава с ЭПФ. Из-за сравнительно малого температурного гистерезиса мартенситного перехода КПД – невелик, не более нескольких %. Это имеет место в согласии с теоремой Карно, и это подтверждается многочисленными исследованиями прототипов мартенситных моторов [1].

В то же время, твердые тела, которые мы в этой книге называем функциональными твердотельными материалами, при магнитных и структурных фазовых превращениях под действием внешних полей - магнитных и упругих полей - сами могут получать и отдавать значительную тепловую энергию, выполняя функцию рабочего тела теплового насоса или холодильника. Об этом читатель может подробно прочитать в 1 и 7 главах 1-го тома нашей книги. Мы здесь отметим только одно принципиальное обстоятельство - коэффициент эффективности процесса (КЭП) теплового насоса, вообще говоря, может существенно превышать 100%, в полном соответсвии с той же теоремой Карно [2].

**Соединив в единую систему тепловой насос и мартенситный мотор, в принципе, можно резко повысить КПД системы мотор – тепловой насос, приблизив его потенциально к 100%.** В результате, изменяется парадигма всего двигателестроения XX века, которая связана с убеждением, что высокий КПД двигателей, близкий к 100 %, возможно только путем повышения до значений порядка тысяч градусов температуры рабочего тела, как, например, у газовых турбин или ракетных двигателей.

7.1. Мартенситные моторы – преимущества и принципиальные ограничения на характеристики

7.1.1. Простейший мартенситный мотор

Рассмотрим схему на рис. 7.1. Образец с ЭПФ, например, быстрозакаленная лента сплава Ti2NiCu длиной *L* закреплена на подвесе и нагружена гирей весом P. Пусть температура окружающей среды наже температуры окончания прямого мартенситного перехода сплава - *Mf*. В исходном состоянии лента находится в мартенситной фазе. Тогда нагрев выше температуры окончания обратного перехода *Af* приведет к тому, что лента сократится по длине, преодолевая силу *P* и совершая механическую работу *А*. Если изменение длины образца сплава (рабочего тела мотора) при этом равно *ΔL*, то механическая работа, производимая в одном цикле равна:

$A=PΔL.$(7.1)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Ϭm - максимальное преодолеваемое напряжение сплава с ЭПФ, | 500  МПа |
| εm – максимальная обратимая деформация сплава с ЭПФ, | 3% |
| ωm = Ϭm εm – максимальная энергетическая насыщенность сплава с ЭПФ, | 1,5 107 Дж/м3 |
| h – толщина ленты Ti2NiCu, | 40 мкм |
| b – ширина ленты, | 2 мм |
| L – длина ленты, | 0,3 м |
| ρ – плотность сплава Ti2NiCu, | 7000 кг/м3 |
| с – удельная скрытая теплоемкость сплава Ti2NiCu, | 0,5 кДж/кг К |
| λ – удельная скрытая теплота мартенситного перехода сплава Ti2NiCu. | 104 Дж/кг |
| **Рисунок 7.1.** Оценка КПД простейшего мартенситного мотора. |

Если обозначить S - площадь сечения ленты с ЭПФ, ε – относительное удлинение $ε=\frac{∆L}{L}$, ϭ – механическое напряжение в образце ленты, ω = $ϭε$*, f* – частота циклов работы мотора, *V* – объем ленты, то для работы за один цикл и мощности мотора *W* получим следующие выражения:

 $A=ϭεV=ωV, W=Af=ωVf.^{}$ (7.2)

Проделаем оценки, воспользовавшись конкретными значениями параметров ленты и приближенными значениями физических констант для Ti2NiCu из таблицы на рисунке 7.1. Физическую величину ω мы подробно обсуждали в главе 6 2-го тома, где мы сделали экспериментальную оценку максимальной энергетической насыщенности величины ωm, которая измеряется максимальным произведением многократной обратимой деформации εm на преодолеваемое механическое напряжение ϭm. Для данного расчета мы примем значение ωm = 1,5 107 Дж/м3, достижимое для быстрозакаленных лент сплава T2NiCu. Рекордные значения для сплавов с ЭПФ ωm = 1,5 108 Дж/м3 продемонстрированы нами на прутках сплава TiNi, обработанного методом интенсивной пластической деформации. Для примера, который проиллюстрирован на рис. 7.1, за 1 цикл механическая работа: A ~ 40 Н 10-2 м = 0,4 Дж.

7.1.2. Мощность простейшего мартенситного мотора

**Предельная частота циклов мартенситного мотора**

Еще одна важная характеристика мотора – частота циклов. О факторах, ограничивающих максимальную частоту рабочих циклов мартенситных моторов подробно рассказано ниже. Она ограничена временами, связанными с процессами теплообмена, механической инерции и характерными временами кинетики протекания мартенситного перехода.

Из формулы 7.2 очевидно, что мощность мартенситного мотора пропорциональна работе (A) производимой за один цикл и частоте циклов (f). В случае нашего простейшего мартенситного мотора, теплопроводность окружающего воздуха ограничивает частоту циклов величиной ~ 1 Гц. Для мощности мотора мы получаем W~ 0,4 Вт. При массе активного элемента m = 1,7 10-4 кг, W ~ 4 кВт/кг. Несмотря на простоту устройства, это значение удельной мощности вполне соответствует современному уровню двигателей внутреннего сгорания [2].

Рассмотрим схему на рис. 7.2 быстрозакаленная лента (1) сплава Ti2NiCu длиной *L* закреплена в трубке с проточной водой (2) и нагружена гирей (3) весом P. Под действием тока, подаваемого на образец, с помощью генератора управляемых импульсов (4) образец нагревается до температуры Af, что приводит к его сокращению. После окончания импульса проточная вода охлаждает образец ниже Mf. Данная система позволяет ускорить фазовый переход за счёт быстрой накачки тепла и быстрого удаления ее из образца. Таким образом, удалось достичь минимального период колебаний 7,5 мс. Это соответствует частоте колебаний 133 Гц. Результат превышает рекордное на сегодняшний день значение рабочей частоты для актюаторов с ЭПФ, которое продемонстрировали японские ученые из института материаловедения в Тсукубе [11].



**Рисунок 7.2.**

Измерения показали, что при усилии пружины 20 Н деформация ленты составляет до 3 мм. Сделана оценка для времени реакции ленты не более 7,5 мс. Производимая механическая работа за время 7,5 мс составляет 0,6 Дж, что отвечает удельной мощности 53,3 кВт/кг, при мощности 8 Вт, массе ленты 0,15 г, частоте срабатывания 130 Гц.

Ясно, что мартенситный мотор имеет свои достоинства: высокий уровень мощности на единицу массы и, потенциально, очень маленькие габаритные размеры, вплоть до микро- и наномасштаба, как нами было показано выше, в 3 главе 2-го тома. По существу, все устройство состоит из рабочего тела. Нет массивных станин и цилиндров, поршней, лопаток, как у двигателей внутреннего сгорания и турбин. Резервы повышения удельной мощности традиционных двигателей внутреннего сгорания сегодня конструкторы ищут на пути повышения температуры и давления рабочего тела [2]. В случае мартенситного мотора, повышение мощности также возможно, как мы видели в в моем дипломе. При принудительном охлаждении потоком жидкости ленты сплава с ЭПФ частоту удается поднять до значений *f* ~ 10-100 Гц. Удельная мощность при этом увеличивается пропорционально частоте до значений ~10-100 КВт/кг, существенно, опережая традиционные двигатели! Однако, на пути практического применения мартенситного двигателя остается еще много проблем, среди которых самая важная - КПД.

**7.1.3. Оценка КПД простейшего мартенситного мотора**

Как и всякий механический двигатель, мартенситный мотор имеет КПД ƞ, который определяется формулой:

$ƞ=\frac{A}{Q}.$(7.3)

Здесь *A* – механическая работа, производимая мотором за 1 цикл, Q – теплота от внешнего источника, затрачиваемая на ее производство. Чтобы оценить необходимую теплоту, запишем выражение Q с учетом двух вкладов: первый, пропорционален скрытой теплоте перехода 1-го рода из мартенсита в аустенит– λ, а второй вклад, пропорционален произведению разности температур ΔT, необходимой для осуществления мартенситного перехода и теплоемкости сплава *с*:

*Q = λm +cm ΔT,* (7.4)

Выше, в главе 3 1-го тома мы уже обсуждали размытие мартенситного термоупругого перехода, вызванное воздействием внешнего механического напряжения. Для описания эффекта сдвига температуры перехода 1-го рода при воздействии внешнего механического напряжения применяется формула Клапейрона-Клаузиуса:

*ΔT* = $\frac{Tσε}{λρ}$. (7.5)

С применением этой формулы, подставляя $ϭε= ω$, получаем:

$ƞ= \frac{ω}{λρ+\frac{сTω}{λρ}}$. (7.6)

Удобно ввести следующие обозначения: $ƞ\_{1}= \frac{ω}{λρ}$, $ƞ\_{2}= \frac{λ}{сT}$. , тогда

$ƞ= \frac{1}{\frac{1}{ƞ\_{1}}+ \frac{1}{ƞ\_{2}}}$. (7.7)

Количественные оценки по данным таблицы на рисунке 7.1 дают: ƞ1 = 20%, ƞ2 = 7%, ƞ = 5 %. Отметим, что приведенный расчет очень грубый и имеет оценочный характер, однако его результаты вполне согласуются с оценкой верхней границы КПД, которая дается теоремой Карно ƞK= ΔT/T . При T = 300 K, ΔT = 15 К, ƞK = 5 %. Несмотря на то, что даже идеальный мартенситный мотор по КПД, принципиально уступает традиционным двигателям, например двигателям внутреннего сгорания, все же, следует отметить достоинства именно этой простейшей конструкции. Как раз из-за простоты конструкции и высокой степени обратимости всех процессов в мартенситном двигателе, он, вероятно, может быть построен с параметрами, весьма близкими к предельно достижимому фундаментальному пределу ƞK. . Отметим, также потенциально высокую технологичность, экологичность, бесшумность (следствие малого ΔT), и, при необходимости, миниатюрность. Все это заставляет серьезно отнестись к поискам подходов к повышению КПД мартенситного мотора.

 **7.2. Тепловые насосы с высоким КЭП – путь повысить КПД мартенситного мотора**

Основную идею повышения КПД мартенситного мотора легко понять из схемы на рис. 7.3. Для приведения в действие, в него необходимо подавать потоки холодного и горячего теплоносителя с температурами прямого и обратного мартенситного перехода. Рабочему телу для этого удобно придать форму трубки. Подачу теплообменной жидкости можно осуществить используя жидкость из холодного и горячего теплового резервуаров, которые подключены к действующему тепловому насосу. Величина эффективности теплового насоса характеризуется коэффициентом эффективности процесса (КЭП). КЭП реального теплового насоса не может превышать КЭП обращенного цикла Карно: КЭПК = $\frac{T}{∆T}$. Однако, коэффициент эффективности цикла Карно, принципиально больше 100% . На сегодняшний день тепловые насосы на основе рабочего тела из фреонов (легко испаряющихся фтор содержащих углеводородов) имеют реальный КЭП = 300-400% [3]. Очевидно, что на современном уровне техники, используя паро-газовые тепловые насосы, результирующий КПД системы мартенситный мотор – тепловой насос, этим способом, может быть повышен, по крайне мере, в несколько раз.

Теперь вернемся к рассмотренным в главе 5 1-го тома и главе 4 2-го тома схемах твердотельных тепловых насосов, основанных на магнетокалорическом и эластокалорическом эффектах (МКЭ и ЭКЭ) в твердотельных функциональных материалах. (На сегодняшний день нам не известны описания в литературе практических прототипов тепловых насосов с высоким КЭП, выполненных на основе твердотельных функциональных материалов.) За КПД системы мартенситный мотор - тепловой насос (см. рис. 7.3) мы принимаем отношение:

ȠS = $\frac{A\_{2}}{A\_{1}}$ , (7.8)

где A2 – работа мартенситного мотора, A1 – работа на входе теплового насоса. Тепловой насос перекачивает тепло из резервуара с горячим (Т1 > Af) в резервуар с холодным (Т2 < Mf) теплоносителем.

|  |
| --- |
|  |
| **Рисунок 7.3.** Схема системы мартенситный мотор – тепловой насос. |

Если бы оба устройства, и мартенситный мотор, и тепловой насос были идеально обратимыми, а механические и тепловые потери не ухудшали общий результат, тогда вся система имела бы идеальный КПД, равный 100%.

Воспользуемся результатами главы 7 1-го тома, и запишем выражение для КЭП эластокалорического теплового насоса:

КЭП = $\frac{ΔQ}{A\_{2}}$ = $\frac{cT}{λ}$ = $\frac{1}{ƞ\_{2 }}$ ~ 15. (7.9)

Объединив оценку (7.8) и (7.9) мы получаем для КПД системы тепловой насос – мартенситный мотор:

 ȠS = $\frac{1}{1+\frac{ƞ\_{2}}{ƞ}\_{1}}$ ~ 0,75 . (7.10)

Получена оценка КПД системы, которая, примерно, отвечает КПД современных электромоторов. Подчеркнем еще раз принципиально оценочный характер приведенных расчетов. Не учтены многочисленные источники потерь и необратимости циклов в моторе и тепловом насосе. Это неизбежно на сегодняшнем этапе исследования функциональных материалов: их исследования ведутся очень широким фронтом, однако, методы для их изучения, не учитывают специфики функциональных эффектов. В результате, как уже указывалось в главе 2 1-го тома, не смотря на огромную литературу по холодильникам с МКЭ, а прототипов таких холодильников исследовано десятки (см. приведенную в главе 5, 1-го тома литературу), ни для одного из них не приводятся данных о КЭП. Очевидно, на пути создания реальных тепловых наосов еще много трудностей, однако разработка новых надежных и информативных методов исследования функциональных материалов, не менее актуальна, чем разработка и новых материалов и новых конструкций и систем на их основе.

**7.3. Заключение. «Теплая» энергетика, твердотельные моторы и 6-й технологический уклад в XXI веке**

Обобщив изложенные в книге идеи об изучении и применении твердотельных материалов, можно высказать гипотезу о том, что разработка новых функциональных материалов, которая в последние годы идет по экспоненциальному, взрывному закону, в самом недалеком будущем позволит решить задачи создания надежных, рекордных по удельной мощности и по миниатюрности мартенситных механических двигателей, а также тепловых насосов, близких по эффективности к фундаментальному пределу, который установлен теоремой Карно.

Еще одно важное обстоятельство: на поверхности Земли мы окружены «теплой энергией». Любая, казалось бы, незначительная разность температур в природе приводит к энергетическим потокам – ветер, океанические течения. Не меньший ресурс тепла скрыт в толще земной коры. В работе [4] описаны системы обогрева жилищ на основе внешнего подземного контура и теплового насоса (см. рис. 7.4). В такой системе фреоновый тепловой насос обеспечивает обогрев помещения с КЭП 300% - 500%.

|  |
| --- |
| Рисунок 7 |
| **Рисунок 7.4**. «Теплая» энергетика «интеллектуального» дома. |

Очевидно, что мартенситный мотор, если бы оправдались наши оптимистические оценки, смог бы использовать, не только тепло, запасенное в земной коре, но и в атмосфере, причем, как в жаркую, так и в морозную (!) погоду, для получения электроэнергии в достаточном количестве.

Таким образом, мартенситные моторы и твердотельные тепловые насосы, в случае если подтвердится возможность получения высокого КЭП и КПД, близкого к фундаментальному пределу, установленному теоремой Карно, откроет новые далеко идущие перспективы. В механике и, особенно, в микромеханике, будут побиты рекорды компактности и миниатюрности. Экологичность энергетических систем с малой разностью температур между горячим и холодным резервуаром сделает их незаменимыми в «интеллектуальных» домах будущего. Такой дом будет не просто меньше потреблять, а будет использовать связь с внешней энергетической системой, в основном, для аварийных ситуаций или даже для «продажи» избытков энергии.

Мы надеемся, что в XXI веке массовое применение «теплой» энергетики может коренным образом изменить картину энергетического производства и потребления, превратив, отчасти, человеческое жилье в природный элемент, не столько потребляющий ресурсы или даже нарушающий равновесие, а, скорее, в элемент экологической системы, стабилизирующий и пополняющий природное равновесие и запасы.

Обычно, применительно к современному состоянию технологий используют термин 5-й Технологический уклад. Для него характерен вклад информатики, компьютерной и телекоммуникационной технологий. На пороге следующий – 6- уклад. Что же будет характерно для него?

Мы предлагаем следующий ответ на этот вопрос: новые технологии и, конечно, новые функциональные материалы, смогут внести в глобальную техносферу и в социальную структуру общества принципиально новые, непривычные пока сочетания: повышение качества и одновременное снижение цены; повышение энергетической насыщенности и снижение затрат ресурсов, особенно невосполнимых; и наконец, роль человека изменится, из потребителя продуктов и ресурсов, человек начнет превращаться в ответственного, сознательного члена живой единой самоорганизованной эко- и техносферы. Потреблять невосполнимых материальных ресурсов человек будет меньше, а его роль, как сознательного активного члена общества и субъекта организации техно- и социокультуры, резко возрастет.

Литература к Главе 7

1. В.А.Лихачев. Материалы с памятью формы. Справочное издание. СПб.: Изд. НИИХ СПбГУ, 1997-1998. - в 4-х томах.
2. А.М. Архарова, В.Н.Афанасьева. Теплотехника. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 712 с.
3. В.А. Коноваленко. Двигатели высокой удельной мощности. СПб., 2011. - 50 с. <http://att-vesti.narod.ru/DVIGATEL.PDF> .
4. B. Sanner, C. Karytsas, D .Mendrinos, L. Rybach. Current status of ground heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics. 2003. V. 32. P. 579-588.

Введение и литература к каждой главе (при наличии)

Шрифт основного текста -11Times New Roman

 Заголовки параграфов 14 и 11 Arial Black

Между абзацами 6 пт, без красной строки