

УДК 621.8

РАЗРАБОТКА ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЭФФЕКТ СОХРАНЕНИЯ ФОРМЫ

Чернега Лина Андреевна, студентка¹ Королёвского колледжа космического машиностроения и технологии (Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет»)

Аннотация

Двигатель на основе материала с эффектом памяти формы (нитинол). Химическая форма нитинола NiTi, основные элементы сплава никель и титан, в процентном соотношении никеля 55%, титана 45%. Благодаря нитинолу возможно изготовить двигатель, в котором ремень из нитинола применяется в ременной передаче со шкивами одинаковых диаметров, то есть передаточным отношением, равным единицы. Далее эти шкивы через синхронизирующую передачу, которой можно выполнить цепной или зубчато-ременной связываются друг с другом, так что их передаточное отношение за счет этой жесткой цепи отличается от единицы. Если мы начнем подводить тепло, то у нас начинается ослабление одной ветви нитиноловой ленты при подводе тепла, а другая ветвь нитиноловой ленты будет натягиваться при отводе тепла. Благодаря этому возникает крутящий момент, и вся эта система приводится в движение – это принцип действия двигателя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловой двигатель, нитинол, эффект памяти формы, космическая техника, цикл Карно.

DEVELOPMENT OF THE HEAT ENGINE USING THE EFFECT OF SHAPE RETENTION

Chernega Leena Andreevna, student² of Korolyov college of Space Engineering and Technology (State Educational Institution of Higher Education of Moscow Region «University of technology»)

Abstract

The engine is based on material with shape memory (nitinol). Chemically nitinol is NiTi, the main elements of the alloy are nickel and titanium in a percentage of 55 % nickel, 45 % titanium. Due to the properties of nitinol it is possible to build an engine with the following features: a belt drive consisting of nitinol links pulleys of different diameters, that is, the gear ratio differs from 1. Further, these pulleys through the transmission of synchronization, which can be achieved by a chain or toothed belt, are connected to each other so that their ratio by this tight circuit is one to one. If we start to supply heat, then we start weakening one branch of nitinol ribbon, and the other branch of nitinol tape will stretch during heat removal. This results in torque and the whole system moves – this is the principle of engine operation.

KEYWORDS: heat engine, nitinol, shape memory effect, space technology, Carnot cycle.

Актуальность темы

Двигатель, использующий эффект памяти формы, при частоте вращения всего сотни оборотов в минуту, может иметь удельную массу в разы меньшую 1кг/кВт, что объясняется на несколько порядков более высокими напряжениями в рабочем теле по сравнению с давлениями рабочего тела в тепловых двигателях, использующих газовый цикл.

Двигатель, использующий эффект памяти формы, может использовать для своей работы низкопотенциальные источники теплоты и найти применение в самых различных

¹ Научный руководитель — Шкарупа С.О.

² Scientific adviser — Shkarupa S.O.

отраслях: от космоса до приводов вспомогательного оборудования водогрейных котельных. Его преимуществом может быть малая удельная масса при низкой частоте вращения, специальный подбор материала рабочего тела, обеспечивающий высокий КПД.

Актуальность определяется необходимостью создания легких тепловых безредукторных двигателей с высоким крутящим моментом, необходимых для средств транспорта, в том числе работающих на других планетах, и робототехники.

Анализ сплава нитинол

Нитинол – сплав титана и никеля, обладающий высокой коррозионной и эрозионной стойкостью. Процентное содержание титана – 45%, никеля – 55%, что соответствует формуле $TiNi$, то есть количества атомов равны. Необычно то, что данный сплав обладает свойством «памяти формы». Если деталь сложной формы подвергнуть нагреву до красного каления, то она «запомнит» эту форму. После остывания до комнатной температуры деталь можно деформировать, но при нагреве выше 40 градусов Цельсия она «вспомнит» свою первоначальную форму и восстановит её.

Такое поведение связано с тем, что, фактически, этот материал является не типичным сплавом, а интерметаллидом (интерметаллическое соединение – химическое соединение двух или более металлов; интерметаллиды, как и другие химические соединения, имеют фиксированное соотношение между компонентами; интерметаллиды обладают, как правило, высокой твёрдостью и высокой химической стойкостью, очень часто имеют более высокую температуру плавления, чем исходные металлы; почти все интерметаллиды хрупки, так как связь между атомами в решётке становится ковалентной или ионной, а не металлической), и при закалке взаимное расположение атомов упорядочивается, что приводит к запоминанию формы.

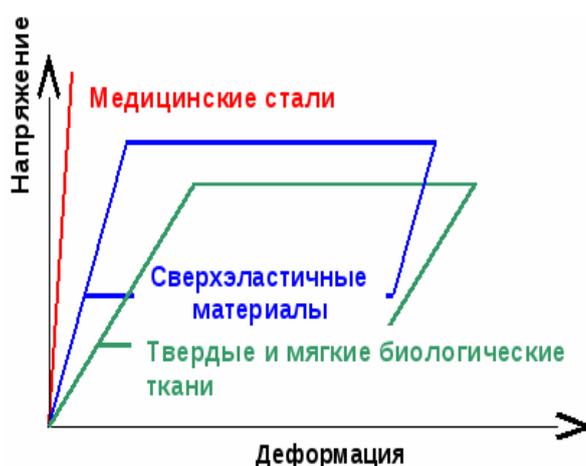


Рис. 1. Соотношение характеристик различных видов материалов

На рисунке 1 приведены диаграммы разных сплавов (по вертикали напряжение, по горизонтали удлинение – деформация).

Видно, что цикл может быть замкнут, при этом совершается работа, причем, нужно понимать, что на данный тепловой двигатель цикл Карно не распространяется, т.к. он был придуман именно для газа. Здесь все определяется теплоемкостью металла, т.е. если у нас диапазон температурного изменения узкий, то КПД может быть очень высокий, потому что основная потеря КПД происходит из-за того, что нужно нагревать металл, и вся тепловая энергия уходит в повышение температуры, то есть в теплоемкость.

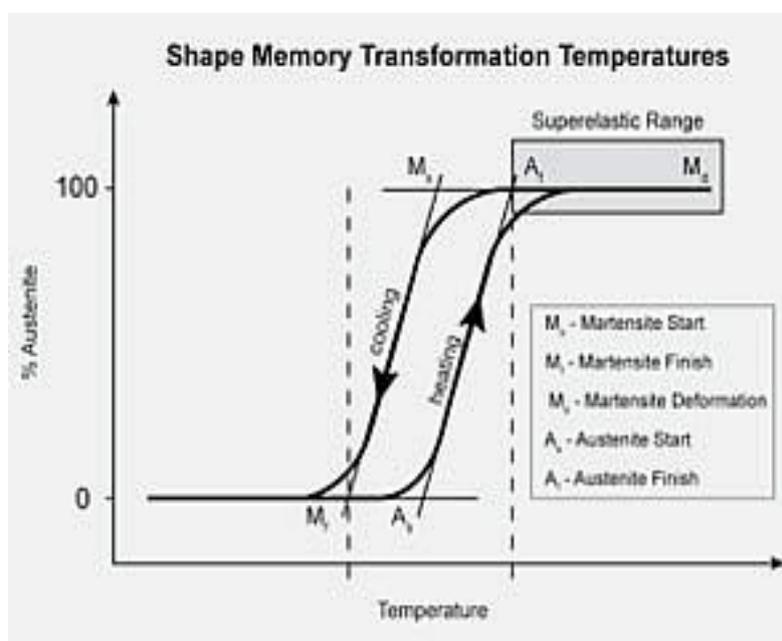


Рис. 2. Петля гистерезиса для сплава, обладающего памятью формы

На следующем рисунке изображен гистерезис металла с памятью формы. При высоких температурах сплав обретает взаимопроникающую, примитивную кубическую кристаллическую структуру, называемую аустенитом (также известную как исходная фаза). При низких температурах нитинол самопроизвольно меняет свою кристаллическую структуру на более сложную моноклинную, известную как мартенсит (дочерняя фаза). Температуру, при которой аустенит превращается в мартенсит, принято называть температурой фазового превращения. Точнее, существует 4 разные температуры фазового превращения. При охлаждении сплава, полностью состоящего из аустенита, начинает образовываться мартенсит – при так называемой температуре начала мартенситного превращения (температура M_n), а полное мартенситное превращение происходит при так называемой температуре конца мартенситного превращения (температура M_f). При нагревании сплава, полностью состоящего из мартенсита, начинает образовываться аустенит

при температуре начала аустенитного превращения (температура A_n), а полное аустенитное превращение происходит при температуре конца аустенитного превращения (A_c).

Цикл охлаждения/нагрева характеризуется тепловым гистерезисом. Ширина гистерезиса зависит от точного состава и обработки нитинола. Типичная ширина гистерезиса приблизительно соответствует интервалу от 20 К до 50 К (от $-253,2$ °С до $-223,2$ °С).

Определяющими для свойств данного никель-титанового сплава являются два ключевых аспекта этого фазового превращения. Во-первых, превращение является обратимым, то есть нагрев выше температуры фазового превращения ведет к обратному переходу кристаллической структуры к более простой, аустенитной фазе. Во-вторых, фазовое превращение происходит мгновенно в обоих направлениях.

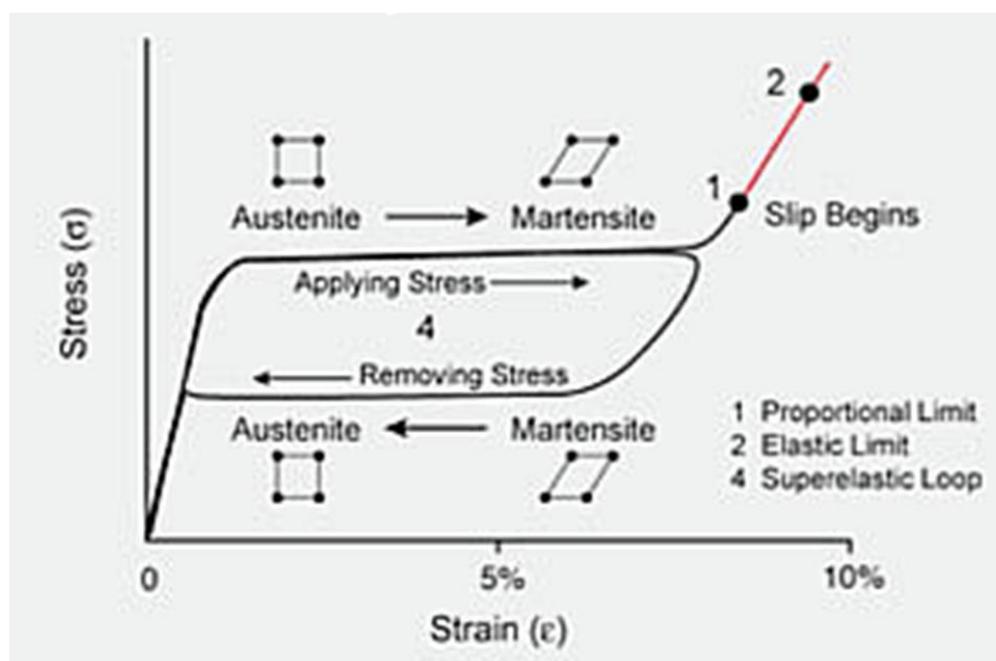


Рис. 3. Превращение аустенитного нитинола в мартенситный

Превращение аустенитного нитинола в мартенситный изображен на рисунке 3, здесь показано, как меняется геометрия кристаллической решетки.

Таблица 1. Сравнение свойств сплавов

Материал	Стой- кость к коррозии	Модуль упругости, ГПа	Предел упругос- ти, МПа	Макс. упругая дефор- мация, %
Нержаве- ющая сталь (316L)	х	200	1500	0,5
Нитинол (NiTi)	хх	220	1500	8
Пластик ист-0,8	хххх	220	1800	0,5

Таблица 1 показывает стойкость к коррозии и другие характеристики нитинола в сравнении с нержавеющей сталью и с одной из иностранных сталей (× – низкая коррозионная стойкость; ×× – средняя; ××× – хорошая).

Видно, что упругая деформация нитинола аномально большая (по сравнению с деформацией обычной стали) – 8%.

Устройство двигателя

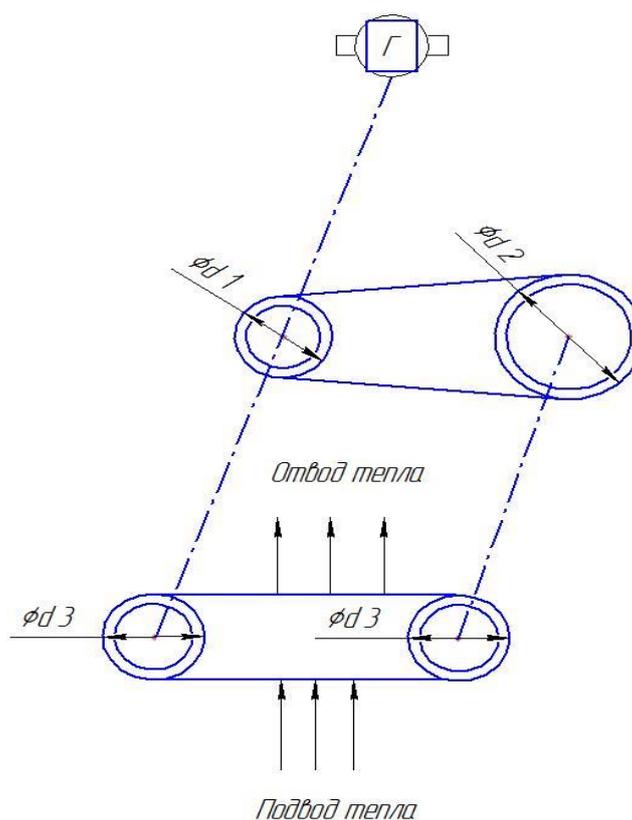


Рис. 4. Кинематическая схема двигателя

Судя по данным таблицы 1, отличие шкивов не должно составлять более 8% по диаметру; далее эти шкивы через синхронизирующую передачу, которую можно выполнить цепной или зубчато-ременной, связываются друг с другом так, что их передаточное отношение за счет этой жесткой цепи составляет один к одному, а шкивы, выполненные из нитинола, должны отличаться на 8 процентов. Если мы начнем подводить тепло, то у нас начнется ослабление нитинола наверху: допустим, если он расширяется. Внизу будет происходить сжатие (где нитинол охлаждается), поэтому возникает крутящий момент, и вся эта система приводится в движение – таков принцип действия двигателя.

На самом деле вариантов двигателей может быть много, на рисунке 4 изображен классический двигатель на нитиноле для пояснения принципа действия.

Достоинством этого двигателя является то, что мы можем при малой частоте

вращения иметь большой крутящий момент, и таким образом получить большую мощность при малой частоте вращения за счет того, что напряжение в нитиноле на порядок превышает давление в цилиндре поршневых двигателей: там счет идет на десятки кг/см, а здесь на десятки кг/мм, поэтому мы можем сделать очень легкий двигатель.

Недостатком является то, что (по данным, которыми я обладаю) пока достигнуто допустимое число циклов 10000 – это означает, что если двигатель будет работать при 200 об./мин., то общее время его работы составит 50 мин. Тем не менее, для задач ракетно-космической отрасли этого вполне достаточно. Например, ракета-носитель выводится в космос в течение 10 мин., поэтому для одноразовых систем такой двигатель может быть применен уже сейчас.

Задача моего дальнейшего исследования – внимательно изучить структуру и подобрать составы не только нитинола, но других сплавов с памятью формы, рассматривая их с точки зрения достижения высокого КПД и длительности цикла до выполнения конкретной технической задачи.

Литература

1. Бродовой А.В., Бунчук С.Г. Изменение фазового состава бинарных сплавов Ti-Ni с помощью неоднородного магнитного поля // Журнал технической физики: том 81, вып. 7, 2011 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/jtf/2011/07/p155-158.pdf>, свободный.
2. Сеньковский Б.В. Электронная энергетическая структура сплавов Ti-Ni и TiNi-Cu. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://spbu.ru/disser/%7Bzashiti_disser___id%7D/avtoref-Senkovskij.pdf, свободный.
3. Нитинол // Слесарное дело [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://slesario.ru/metalli-i-splavi/nitinol.html>, свободный.
4. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. — М.: Машиностроение, 1981.
5. Бюллетень по Атомной Энергии: №8, 2008.
6. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. Обратимая пластичность кристаллов. — М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1991.