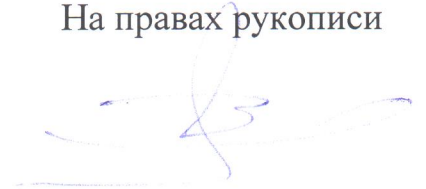


На правах рукописи



Зенин Владислав Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА АКТИВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ
СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ДЛЯ ФАР**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Крахин Олег Иванович

Официальные оппоненты: **Иванов Александр Сергеевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Основы проектирования машин», МГТУ
им. Баумана, г. Москва.

Гуревич Юрий Ефимович,
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Станки (Детали машин)» МГТУ «СТАНКИН»,
г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное Государственное бюджетное
учреждение науки Институт прикладной
механики РАН, г. Москва.

Защита состоится «26» ноября 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «__» __ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В авиастроении, космической и радиолокационной технике, как в производстве, так и в эксплуатации существуют большие потери энергии. Особенно большие потери энергии, которые составляют до 90% - в фазированных антенных решетках (ФАР). Наиболее эффективным способом снижения потерь является применение энергетических установок (ЭУ), способных рекуперировать тепловую энергию. Основными элементами ЭУ являются активные элементы (АЭ) из сплавов с памятью (СП).

Известно большое количество решений схем построения ЭУ на основе СП. В большинстве случаев процесс разработки ЭУ носит эмпирический характер, не позволяющий создать эффективно функционирующую ЭУ. Для того чтобы решить эту проблему необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку обоснованного метода проектирования АЭ для такого вида ЭУ.

Исходя из вышесказанного, следует, что тема диссертации является актуальной.

Цель работы заключается в разработке метода расчета и проектирования активных элементов, предназначенных для работы в энергетических установках, работающих в двух средах с уровнем мощности достаточной для практического использования.

Задачами исследования являются:

1. Определить требования, предъявляемые к сплавам с памятью, заготовкам и активным элементам, которые используются в энергетических установках, работающих в двух средах.

2. Разработать методику оценки и выбора типа АЭ с учетом энергоемкости. Провести сравнительный анализ типов АЭ с позиции энергоемкости.

3. Определить энергию мартенситных превращения в интервале температур A_H-A_K .
4. Определить энергию, затрачиваемую на совершение фактической механической работы в интервале температур A_H-A_K .
5. Разработать способ подготовки АЭ, для работы в составе энергетической установки, работающей в двух средах.
6. Разработать метод расчета АЭ для энергетической установки, работающей в двух средах.

Научная новизна

Установлено, что в интервале температур мартенситных превращений A_H-A_K повышенное потребление энергии связано с кристаллическим переходом мартенсит – аустенит и затратами энергии на фактически произведенную механическую работу.

2. На основе экспериментальных исследований определена энергия, затрачиваемая на превращение моноклинной структуры кристалла в объёмно–центрированную кубическую решётку.

3. Определена теплоемкость, соответствующая превращению моноклинной структуры кристалла в объёмно–центрированную кубическую решётку для сплавов системы Ni–Ti.

4. На основе экспериментальных исследований определена энергия, затрачиваемая на совершение фактической механической работы.

5. Определена теплоемкость соответствующая фактической механической работе для сплавов системы Ni–Ti.

6. На основе комплексного подхода, с учетом взаимодействия АЭ с окружающими средами, разработан метод расчета и проектирования АЭ для энергетической установки турбинного типа, работающей в двух средах.

7. На основе экспериментальных исследований разработан вариант подготовки АЭ к работе в составе ЭУ, для обеспечения стабильности механических характеристик, с коэффициентом восстановления деформации равным единице.

8. Показано, что энергоемкость является одним из важных показателей эффективной работы АЭ и зависит от распределения напряженно-деформированного состояния и температурного поля в объеме элемента.

9. Для одномерного АЭ показано, что энергоемкость определяется распределением напряжения во всех сечениях элемента и температурного поля по длине элемента. При выборе типа АЭ энергоемкость оценивается приближенно по отношению периметра сечения к его площади, которое должно быть наибольшим из всех возможных.

10. Определены основные требования к качеству сплава и заготовки для активных элементов, работающих в составе ЭУ.

Теоретическая и практическая ценность работы

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании активных элементов энергетических установок, работающих в двух средах. Результаты работы позволяют производить расчет АЭ для сплава системы Ni-Ti.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов обеспечивается корректным применением законов термодинамики и уравнений механики деформируемого твердого тела, математических методов, численных методов, современного программного обеспечения, а также результатами экспериментальных исследований и результатами экспериментальных исследований других авторов.

Апробация работы. Основные научные результаты докладывались на научно-технических конференциях 2008 – 2013 гг. В частности: 6-я молодежная научно-техническая конференция “Радиолокация и связь – перспективные технологии”, Москва, 2008 г.; 7-я международная конференция “Авиация и космонавтика - 2008”, Москва, 2008 г.; 3-я всероссийская научно-техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”, Москва, 2009 г.; 17-я международная конференция “спиновая электроника”, Москва (Фирсановка), 2009 г.; 19-я международная конференция “электромагнитное поле и материалы по спиновой электронике”, Москва (Фирсановка), 2011 г.; 20-я международная

конференция электромагнитное поле и материалы, Москва (Фирсановка), 2012 г.; 21-я международная конференция электромагнитное поле и материалы по спиновой электронике, Москва (Фирсановка), 2013 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 14 печатных работах, 2 из них научные работы в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ, в разделах 2 научных монографий, в двух патентах на изобретение, в патенте на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 86 наименований. Работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая ценность полученных автором результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 диссертации содержит аналитический обзор по материалам отечественных и зарубежных источников по тематике, связанной с проектированием активных элементов ЭУ.

Показаны фазовые состояния и фазовые переходы никелида титана, а также процесс преобразования тепловой энергии в механическую работу в ЭУ непрерывного действия.

Во **главе 2** рассмотрены требования к специальным свойствам сплавов, заготовкам и активным элементам при проектировании энергетических установок. Показаны способы получения активных элементов и даны рекомендации по их выбору с учётом максимальной энергоэффективности и технологичности.

Разработан способ технологической подготовки АЭ к работе в составе ЭУ непрерывного действия.

В главе 3, на основе экспериментальных исследований, приведенных в главе 4, определена энергия, затрачиваемая на превращение моноклинной структуры кристалла в объёмно-центрированную кубическую решётку и соответствующий ей удельный коэффициент теплоемкости, отнесенный к массе. На основе экспериментальных исследований определена энергия, затрачиваемая на совершение фактической механической работы и соответствующий ей удельный коэффициент теплоемкости, отнесенный к массе и к потенциальной энергии.

Нагрев АЭ условно делится на три участка:

(1) – нагрев до температуры A_H и выше температуры A_K , где подводимая энергия расходуется на нагрев АЭ и на потери;

(2) – нагрев в интервале температур $A_H - A_K$, без нагрузки, где подводимая энергия расходуется на нагрев АЭ, потери и преобразование кристаллической решетки;

(3) – нагрев в интервале температур $A_H - A_K$, под нагрузкой, где подводимая энергия расходуется на нагрев АЭ, потери, преобразование кристаллической решетки и на совершение фактической работы.

Уравнение термодинамического равновесия записывается следующим образом:

$$N_{ИТ} \cdot \Delta t_H = \left[\underbrace{c_m \cdot M \cdot \Delta T_i + \alpha_{П} \cdot F_{нов} \cdot \Delta T_i}_{(1)} + \underbrace{c_K \cdot M \cdot \Delta T_i}_{(2)} + \underbrace{c_P \cdot M \cdot \Delta T_i}_{(3)} \right] \quad (1)$$

где $N_{ИТ}$ – мощность источника тока [Вт]; Δt_H – время нагрева [с]; c_m - теплоемкость СП [Дж/кг $^{\circ}$ С]; M – масса АЭ [кг]; ΔT_i – интервал температур соответствующего участка [$^{\circ}$ С]; $\alpha_{П}$ – удельный коэффициент тепловых потерь [Дж/м 2 $^{\circ}$ С]; $F_{нов}$ – площадь поверхности АЭ [м 2]; Δt_K – время нагрева в интервале $A_H - A_K$ [с]; c_K – коэффициент, учитывающий затраты энергии на обратные мартенситные превращения [Дж/кг $^{\circ}$ С]; c_P – коэффициент определяющий энергию, затрачиваемую на совершение механической работы [Дж/кг $^{\circ}$ С].

Неизвестные коэффициенты (α_{II} , c_K и c_P) определяются экспериментально, определением функции $T=f(t)$ для ненагруженного элемента (холостой ход) и нагруженного (рабочий ход). Соответствующие графики показаны на рис.1. и рис.2.

На первом участке, в интервале температур $T_H - A_H$, из уравнения (1) определяется удельный коэффициент тепловых потерь α_{II} :

$$\alpha_{II} = \frac{U \cdot J \cdot \Delta t_H - c_m \cdot M \cdot \Delta T_i}{F_{нов} \cdot \Delta T_i} \approx 1300 \pm 140 \left[\frac{\text{Джс}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}} \right] \quad (8\%) \quad (2)$$

Рассчитанный по формуле (2) коэффициент тепловых потерь принимается равным на всех участках нагрева.

На втором участке, в интервале температур $A_H - A_K$, при холостом ходе из выражения (1) определяется коэффициент c_K :

$$c_K = \frac{U \cdot J \cdot \Delta t_H - c_m \cdot M \cdot \Delta T_i - \alpha_{II} \cdot F_{нов} \cdot \Delta T_i}{M \cdot \Delta T_i} \approx 2200 \pm 280 \left[\frac{\text{Джс}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right] \quad (13\%) \quad (3)$$

На третьем участке, в интервале температур $A_H - A_K$ при рабочем ходе выражения (1) определяется коэффициент c_P :

$$c_P = \frac{U \cdot J \cdot \Delta t_H - c_m \cdot M \cdot \Delta T_i - \alpha_{II} \cdot F_{нов} \cdot \Delta T_i - c_K \cdot M \cdot \Delta T_i}{M \cdot \Delta T_i} \approx 300 \pm 30 \left[\frac{\text{Джс}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right] \quad (9\%) \quad (4)$$

Коэффициент c_P учитывает затраты энергии на совершение фактической работы, при постоянной нагрузке σ_c . Эта работа всегда меньше потенциальной. Затраты энергии на потенциальную механическую работу учитываются коэффициентом c_{PII} :

$$c_{PII} = \frac{c_P \cdot A_{AЭII}}{A_{AЭФ}} \approx 2000 \pm 400 \left[\frac{\text{Джс}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right] \quad (20\%) \quad (5)$$

где $A_{AЭII}$ – потенциальная работа, которую может произвести АЭ, $A_{AЭФ}$ - фактическая работа, которую может произвести АЭ (при постоянной нагрузке).

Потенциальная работа определяется из соотношения:

$$A_{AЭII} = \int_V dV \int_{\varepsilon_s} \sigma_{ip} \cdot d\varepsilon_s \quad (6)$$

где V – объем АЭ; σ_{ip} – интенсивность напряжения, которое генерирует АЭ; ε_6 - деформация восстановления.

Коэффициент c_K отнесен к массе, а коэффициент c_{PII} отнесен к массе и к потенциальной работе. Известно, что потребление энергии при теплообмене зависит от массы объекта. Поэтому можно предположить, что эти коэффициенты являются универсальными.

Расхождение между расчетными значениями и экспериментальными данными, которые опубликованы другим автором, не превышает 4%. Следовательно, полученное значение коэффициента $c_{MP II}$ так же как и c_{MK} , является универсальным для бинарных сплавов системы Ni-Ti и может быть использовано в дальнейшем при расчете АЭ, выполненных из этих сплавов.

Суммарная теплоемкость на участке A_H-A_K рассчитывается по формуле:

$$c_m'' = c_{PII} \cdot \beta_P + c_K + c_m; \quad (7)$$

где

$$\beta_P = \frac{A_{AЭФ}}{A_{AЭП}}. \quad (8)$$

Расчет теплового поля АЭ в интервале температур A_H-A_K определяется путём решения уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями:

$$\rho c_m'' \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \right) + q, \quad (9)$$

где ρ – плотность материала АЭ; j_x, j_y, j_z – составляющие теплового поля в активном элементе (в декартовой системе координат); q – источники тепла в АЭ.

Оценка энергоэффективности типа АЭ осуществляется на основании критерия энергоёмкости, который показывает наиболее полное использование термомеханического потенциала заложенного в АЭ и позволяет одновременно оценить динамические и тепловые свойства АЭ. Энергоёмкость активного элемента определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{AЭ} = k_{AЭ} \cdot \mathcal{E}_{СП} \quad (10)$$

где $\mathcal{E}_{СП}$ – энергоёмкость сплава с памятью, $k_{AЭ}$ – коэффициент энергоёмкости активного элемента.

$$\mathcal{E}_{СП} = \frac{\int_{\varepsilon_{\infty}}^{\varepsilon_u^{\max}} \sigma_a(\varepsilon) d\varepsilon - \int_0^{\varepsilon_u^{\max} + \varepsilon_y} \sigma_m(\varepsilon) d\varepsilon}{\rho}; \quad (11)$$

где $\sigma_a(\varepsilon)$, $\sigma_m(\varepsilon)$ – зависимость напряжения от деформации соответственно в аустенитной и мартенситной фазах; ρ – плотность.

$$k_{AЭ} = \frac{\iiint N(x, y, z) T(x, y, z) dx dy dz}{N_{\max} T_{\max} V} \quad (12)$$

где $N(x, y, z)$ – распределение напряжений σ , τ по объёму АЭ в зависимости от вида деформации элемента; $T(x, y, z)$ – температурное поле АЭ.

Рассматривается влияние динамических и тепловых факторов на величину энергоёмкости АЭ по отдельности.

Напряженно–деформированное состояние АЭ. Для оптимизации АЭ по критерию энергоёмкости должно выполняться условие:

$$k_{аэ}^N = \frac{\int N(V) dV}{N_{\max} V} \rightarrow \max \quad (13)$$

где $N(V)$ – распределение напряжений σ , τ по объёму АЭ; N_{\max} – максимальное значение напряжения σ , τ .

Для следующих видов напряженно-деформированного состояния АЭ определены оптимальные формы поперечного сечения:

- Растяжение–сжатие: стержень с любой формой поперечного сечения, $k_{AЭ}^N = 1$, (наиболее благоприятный вариант работы АЭ);
- Кручение: труба круглого сечения, $k_{AЭ}^N$ – более 0,75;
- Изгиб: стержень прямоугольного сечения, $k_{AЭ}^N$ – 0,75. Труба круглого сечения, $k_{AЭ}^N$ – более 0,72.

Температурное поле. Для оценки влияния теплового фактора на энергоёмкость АЭ определяется температурное поле активного элемента $T(V)$. Условие оптимизации АЭ по критерию энергоёмкости имеет следующий вид:

$$k_{\text{аз}}^{\text{т}} = \frac{\int T(V)dV}{T_{\text{max}} V} \rightarrow \max \quad (14)$$

где $T(V)$ – тепловое поле активного элемента в рассматриваемый момент времени; T_{max} – максимум температуры в АЭ в рассматриваемый момент времени t , не превышающий значение $A_{\text{к}}$.

Величина теплового потока, подводимого к АЭ, и, соответственно, скорость активации элемента прямо зависит от величины площади бокового сечения АЭ. Поэтому при определении рациональной формы поперечного сечения АЭ при конвекционном нагреве предложено пользоваться критерием:

$$k_g = \frac{p}{F} \quad (15)$$

где p , F – периметр и площадь сечения соответственно.

Из соотношения (15) следует, что круглое сечение обладает меньшим значением критерия k_g чем прямоугольное.

Температурное поле АЭ всегда неоднородно (при любых граничных условиях). Поэтому тип АЭ следует выбирать по критерию напряженно-деформированного состояния.

В главе 4, представлены результаты экспериментальных исследований образца в режиме холостого и рабочего хода, подготовки образца к работе и зависимость коэффициента восстановления от приложенной нагрузки. Измерения производились на образцах из СП ВСП-1, работающих на растяжение, что обеспечило максимально однородное напряженно деформированное состояние. Нагрев осуществлялся путем пропускания через образец электрического тока. Испытывались образцы в виде проволоки, диаметром 0,6 мм, длиной 0,2 и 0,3 м.

На рис.1. показан аппроксимированный график зависимости температуры от времени для холостого хода.

Из графика следует, что при нагреве образца в режиме холостого хода, в интервале температур $A_{\text{н0}}-A_{\text{к0}}$, участок более пологий (скорость нагрева $\approx 1,4$ °C/сек), чем на остальных участках (где скорости нагрева примерно

одинаковы ≈ 3 °C/сек). Это связано с тем, что на участке $A_{H0}-A_{K0}$ тепловая энергия дополнительно затрачивается на мартенситные превращения.

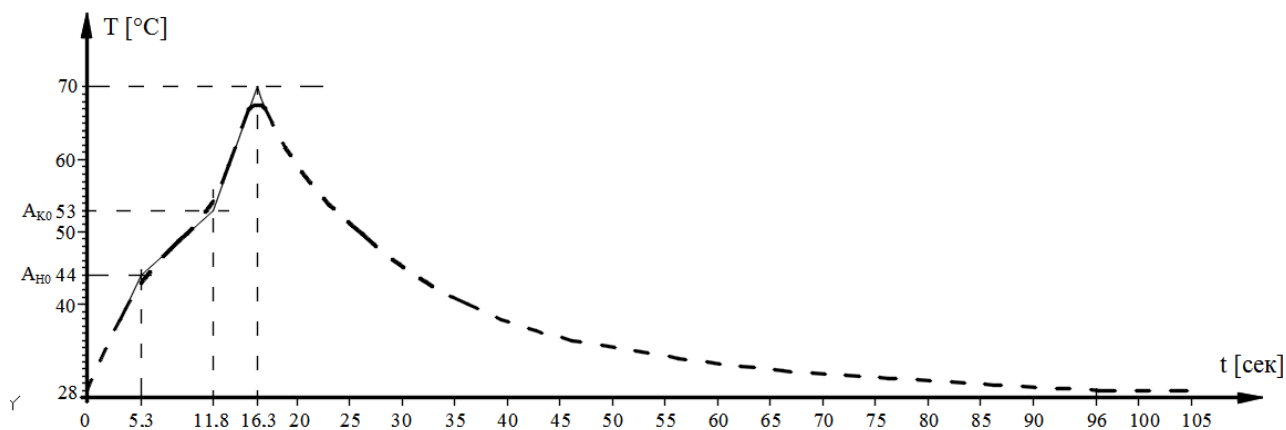


Рис. 1. Зависимость $T=f(t)$. Холостой ход.

На рис.2. показан аппроксимированный график зависимости температуры от времени для рабочего хода, под нагрузкой $\sigma_c = 71,5$ МПа.

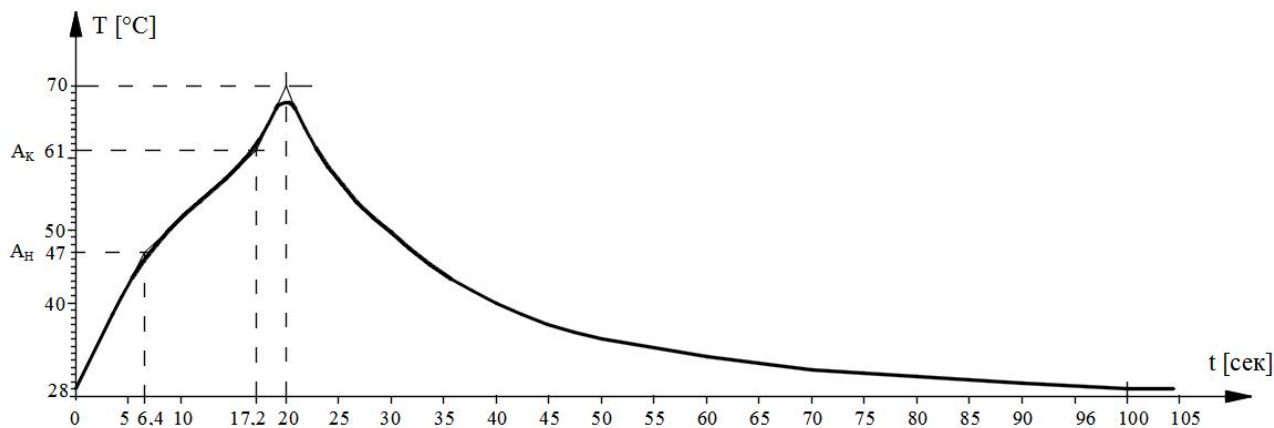


Рис. 2. Зависимость $T=f(t)$; рабочий ход; нагрузка $\sigma_c = 71,5$ МПа

Из графика следует, что при нагреве образца в режиме рабочего хода, в интервале температур A_H-A_K , график зависимости температуры от времени так же более пологий (скорость нагрева $\approx 1,3$ °C/сек), чем на других участках (где скорости нагрева примерно одинаковы ≈ 3 °C/сек).

Из сравнения графиков на рис.1. и рис.2. следует, что при нагрузке в интервале A_H-A_K , кроме дополнительной энергии на мартенситные превращения, часть энергии затрачивается на совершение фактической механической работы.

Таким образом, получена количественная оценка энергии затрачиваемой в интервале температур A_H-A_K .

В главе 5, разработан метод расчета активного элемента энергетической установки турбинного типа, работающей в двух средах.

Установка турбинного типа состоит из трех основных частей: статора, ротора и активных элементов.

Последовательность расчета АЭ включает следующие этапы:

1. Определение типа и размера АЭ

1.1. Определение геометрических параметров энергетической установки.

По заданным габаритам ЭУ определяется диаметр и ширина ротора, диаметр статора, длина и рабочий ход АЭ. Для баланса весовых нагрузок относительно оси ротора АЭ размещаются между ротором и статором попарно.

Максимальное количество АЭ определяется размерами и схемой построения установки. Увеличение количества АЭ обеспечивает более плавное вращение ротора; уменьшает аэродинамическое и гидродинамическое сопротивление за счет взаимного затенения элементов, но усложняет режим охлаждения. Минимальное количество АЭ должно быть не менее трех пар.

1.2. Определение интервала температур превращения.

По схеме построения ЭУ определяются участки прохождения АЭ (рис.3.), и требования к интервалам характеристических температур СП, при которых достигается максимальная величина движущего момента.

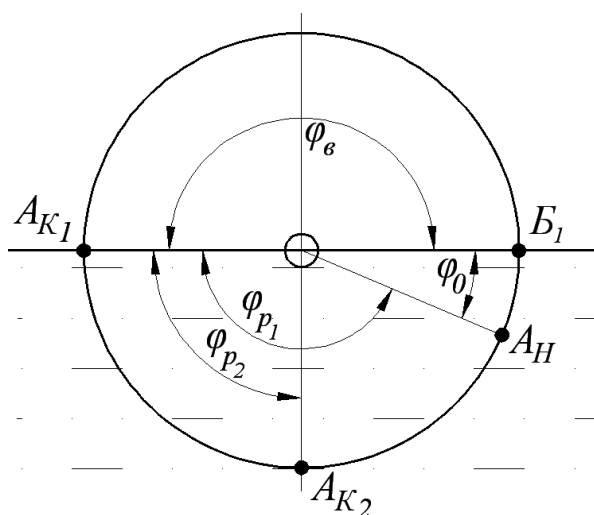


Рис. 3. Области нагрева и охлаждения АЭ

φ_0 – мертвый ход (нагрев АЭ от начальной температуры T_H до A_H).
 φ_p – рабочий ход, в пределах которого АЭ создает движущий момент (нагрев в интервале $A_H - A_K$ или выше).
 φ_e – участок охлаждения, АЭ приводится в исходное состояние (охлаждение в интервале $A_K - T_H$).

1.3. Расчет движущего момента и усилия развиваемого АЭ.

Усилие, развиваемое АЭ, определяется движущим моментом ротора ЭУ, который связан с заданной мощностью и угловой скоростью соотношением:

$$M_{\text{ЭУ}} = \frac{N_{\text{ЭУ}}}{\omega} = \frac{30 \cdot N_{\text{ЭУ}}}{\omega \cdot \pi \cdot n} \quad (16)$$

где $N_{\text{ЭУ}}$ – мощность ЭУ [Вт]; ω – угловая скорость ротора [рад/с]; n – частота вращения ротора [об/мин]; $M_{\text{ЭУ}}$ – движущий момент ЭУ [Нм].

Движущий момент определяется заданием нескольких значений скоростей n_1, n_2, \dots, n_n , и затем выбирается оптимальный. Для учета сил сопротивления значение момента принимается с коэффициентом запаса 1,5.

Затем строится функция $M=f(\varphi)$ в пределах оборота для АЭ, определяется требуемое усилие и производится проектный расчет АЭ. Пример функции $M=f(\varphi)$ представлен на рис.4.

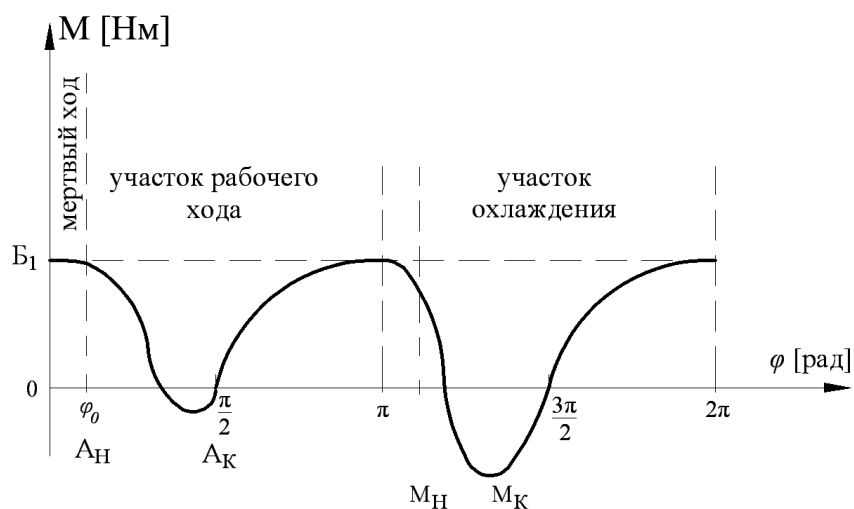


Рис. 4. Зависимость момента от угла поворота ротора для одного АЭ

Для оценки работоспособности ЭУ накладываются графики моментов от всех остальных АЭ, со сдвигом по фазе $2\pi/m$ и строится суммарный момент, который позволяет оценить работу ЭУ (m - число АЭ).

2. Термомеханический расчет

По схеме построения ЭУ определяются условия работоспособности, как правило, они следующие:

- на участке φ_0 АЭ нагревается от начальной температуры T_H до A_H ;
- на участке φ_p АЭ нагревается до температуры A_K или выше;
- на участке φ_v АЭ охлаждается до температуры T_H .

Для обеспечения условий работоспособности ЭУ производится термомеханический расчет теплового режима в среде охлаждения и нагрева. В основе расчёта лежит уравнение теплового баланса (9). Для обеспечения условий работоспособности ЭУ изменяется площадь поверхности АЭ, скорость принудительного воздушного потока, степень погружения ротора в жидкость.

3. Динамический расчет

Определяется сумма моментов всех сил, действующих на ротор относительно оси вращения:

$$M_{cp} - \Phi^{\varepsilon} \cdot R \cdot m - F_{Гидро} \cdot R \cdot \frac{m}{2} - F_{АЭРО} \cdot R \cdot \frac{m}{2} = 0 \quad (17)$$

где M_{cp} – средний движущий момент от m АЭ, полученный графоаналитическим методом, путем накладывания графиков моментов, создаваемых всеми АЭ, со сдвигом по фазе $2\pi/m$; Φ^{ε} - вращательные силы инерции; $F_{Гидро}$, $F_{АЭРО}$ – гидродинамическая и аэродинамическая сила сопротивления; R – радиус ротора.

Решением уравнения (17) является функция $\omega=f(\varphi)$. Средняя величина функции $\omega=f(\varphi)$ на участке от 0 до $2\pi/m$ является средней фактической скоростью ротора (ω_{cp}). Фактическая угловая скорость приводится в соответствие с угловой скоростью определенной в п.1.3.

В работе приведен пример расчета АЭ энергетической установки, с шестью модулями, каждый из которых включает по четыре АЭ в форме ленты длиной 134 мм, шириной 2,5 мм и толщиной 0,3 мм. Предполагаемая мощность установки составляет 0,3 кВт. Габаритные размеры установки: диаметр ротора 450 мм, длина ротора 134 мм. Скорость ротора 500 об/мин.

Основными показателями эффективности, при выборе типа АЭ, является масса и стоимость изделия. Это определяется энергоемкостью АЭ, которая характеризует полноту использования нагрузочной способности АЭ. В качестве примера рассмотрен АЭ, работающий на кручение, выполненный в виде круглой трубки, и АЭ работающий на изгиб, выполненный в виде плоской пластины. При условии, что АЭ имеют одинаковый рабочий ход, вращательный

момент (7,3 Нм) и выполнены из сплава системы Ni–Ti. В таблице 1 приведены расчетные формулы и параметры АЭ обеспечивающие заданный момент.

Таблица 1.

	Изгиб пластины	Кручение трубки круглого сечения
Момент [Нм]	$M_u = \frac{I_x^* E}{h^m} (\varepsilon_{исх} - \varepsilon_\epsilon)^m$ <p>E – модуль упругости; $\varepsilon_{исх}$ – исходная деформация; ε_ϵ – деформация восстановления; h – толщина пластины; $m = 1/3$.</p>	$M_k = \frac{G \cdot I_x^*}{(0,5 \cdot d_2)^m} (\gamma_u - \gamma_\epsilon)^m$ <p>$G = \frac{E}{3}$ – модуль упругости при сдвиге; γ_u – исходная деформация сдвига; γ_ϵ – деформация сдвига при восстановлении; $\gamma = \varepsilon \cdot \sqrt{3}$; d_2 - внешний диаметр трубки.</p>
Момент инерции сечения [М ^{m+3}]	$I_x^* = \frac{b \cdot h^{m+2}}{(m+2) \cdot 2^{m+1}}$	$I_{кр}^* = 2\pi \frac{\left(\frac{d_2}{2}\right)^{m+3}}{m+3} (1 - k^{m+3})$ <p>$k = d_1/d_2$; d_1 - внутренний диаметр трубки.</p>
Размеры АЭ [мм]	толщина $h = 3,8$; ширина $b = 10$; длина $l = 100$.	внешний диаметр трубки $d_2 = 7,9$; толщина стенки $0,35$; длина $l = 60$.
Масса АЭ [г]	24	3,1

Расчеты показали, что масса АЭ в форме трубки круглого сечения почти в восемь раз меньше чем масса АЭ форме пластины. Это доказывает, что с позиции эффективного использования материала выгодней использовать АЭ, который работает на кручение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Установлено, что в интервале температур мартенситных превращений A_H - A_K повышенное потребление энергии связано с кристаллическим переходом мартенсит – аустенит и затратами энергии на фактически произведенную механическую работу.

2. На основе экспериментальных исследований определена энергия, затрачиваемая на превращение моноклинной структуры кристалла в объёмно-центрированную кубическую решётку.

3. Определена теплоемкость, соответствующая превращению моноклинной структуры кристалла в объёмно-центрированную кубическую решётку для сплавов системы Ni-Ti.

4. На основе экспериментальных исследований определена энергия, затрачиваемая на совершение фактической механической работы.

5. Определена теплоемкость соответствующая фактической механической работе для сплавов системы Ni-Ti.

6. На основе комплексного подхода, с учетом взаимодействия АЭ с окружающими средами, разработан метод расчета и проектирования АЭ энергетической установки турбинного типа, работающей в двух средах.

7. На основе экспериментальных исследований разработан вариант подготовки АЭ к работе в составе ЭУ, обеспечивающий стабильность механических характеристик, с коэффициентом восстановления деформации равным единице.

8. Показано, что энергоёмкость является одним из важных показателей эффективной работы АЭ и зависит от распределения напряженно-деформированного состояния и температурного поля в объёме элемента.

9. Для одномерного АЭ показано, что энергоёмкость определяется распределением напряжения во всех сечениях элемента и температурного поля по длине элемента. При выборе типа АЭ энергоёмкость оценивается приближенно по отношению периметра сечения к его площади, которое должно быть наибольшим из всех возможных.

10. Определены основные требования к качеству сплава и заготовки для активных элементов, работающих в составе ЭУ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Зенин. В.А., Крахин О.И., Фатьянов С.А. Термомеханические двигатели и энергетические установки на основе сплавов с памятью. Вестник МАИ; М. 2010 г.

2. Зенин. В.А., Крахин О.И., Кузнецов А.П. Применение сплавов с памятью в приводных устройствах. Вестник МАИ; М. 2012 г.

Научные монографии, в которых автор принимал участие:

1. Крахин О.И., Кузнецов А.П., Сплавы с памятью и их применение в технике, Москва: Янус-К, 2010. – 212 с. (подразделы 2.2 и 2.3).

2. Крахин О.И., Кузнецов А.П., Расчеты конструкций из сплавов с памятью, Москва: Янус-К, 2011. – 308 с. (подразделы 2.2 и 4.2)

Патенты на изобретение и авторские свидетельства:

1. Патент РФ на изобретение RU 2465114 "Способ управления деформированием и восстановлением активного элемента из сплавов с памятью, используемого в качестве исполнительного механизма".

2. Патент РФ на полезную модель RU 116 192 U1 "Устройство для соединения трубы и концевой арматуры".

3. Патент РФ на изобретение RU 2511075 "Способ автоматического управления тепловым состоянием и функциональными параметрами технических устройств".

Публикации в других изданиях:

1. Зенин. В.А., Крахин О.И. Теплоэнергетическая установка для ФАР. Труд 6-й молодежной научно-технической конференции "Радиолокация и связь – перспективные технологии", Москва, 16-17 октября 2008 г.

2. Зенин. В.А., Крахин О.И. Энергетическая установка на основе элементов из сплавов с памятью. Труд 7-й международной конференции "Авиация и космонавтика - 2008", Москва, 20-23 октября 2008 г.

3. Зенин. В.А., Крахин О.И. Теплоэнергетическая установка для ФАР. Труд 3-й всероссийской научно-технической конференции "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 26-30 октября 2009 г., Т.2.

4. Зенин. В.А., Крахин О.И. Теплоэнергетическая установка для ФАР. Тр. 17-й Международной конференции по спиновой электронике (Секция Международной конференции по Гиромагнитной электронике и электродинамике.) - Москва (Фирсановка), Россия, 20-22 ноября 2009 г., Т.1.

5. Зенин. В.А., Крахин О.И., Фатьянов С.А. Термомеханические двигатели и энергетические установки на основе сплавов с памятью. Тр. VI-й Международной научной конференции “Прочность и разрушение материалов и конструкций”- Оренбург, Россия, 20-22 октября 2010 г.

6. Зенин. В.А., Крахин О.И. Свойства сплавов с памятью, используемых в термомеханических энергетических установках для крупногабаритной аппаратуры. Тр. 19-й Международной конференции электромагнитное поле и материалы по спиновой электронике (Секция физика сложных систем) - Москва (Фирсановка), Россия, 18-20 ноября 2011 г.

7. Зенин. В.А., Крахин О.И., Кузнецов А.П. Исследования активных элементов из сплавов с памятью энергетических установок для ФАР. Тр. 20-й Международной конференции электромагнитное поле и материалы. - Москва (Фирсановка), Россия, 16-18 ноября 2012 г.

8. Зенин. В.А., Крахин О.И. Применение сплавов с памятью в энергетических установках для ФАР. Тр. 21-й Международной конференции электромагнитное поле и материалы по спиновой электронике (Секция физика сложных систем) - Москва (Фирсановка), Россия, 20-24 ноября 2013 г.