

Утверждаю

ВРИО директора института прикладной механики

Российской академии наук

доктор технических наук, профессор

Яновский Юрий Григорьевич



2014 г.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Зенина Владислава Александровича «Исследование и разработка метода расчета активных элементов энергетических установок на основе сплавов с памятью для ФАР», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Одним из наиболее интересных и перспективных направлений применения сплавов с памятью формы (СПФ) является их использование в качестве рабочих тел устройств для преобразования тепловой энергии в механическую. Такие конструкции часто называются термомеханическими двигателями (в данной диссертации они называются энергетическими установками). Устройства такого типа обладают целым рядом преимуществ перед традиционными аналогами (возможность работы на низкокачественной "бросовой" тепловой энергии, использование твердых рабочих тел). Известно большое количество различных конструктивных схем таких установок. Некоторые из этих схем реализованы в качестве опытных демонстрационных образцов, подтверждающих саму реализуемость соответствующей идеи. Однако работающих моделей с уровнем мощности, достаточным для практического применения в настоящее время нет.

Значительно меньше уделяется внимания теоретическому изучению и описанию процесса работы таких установок, вопросам, связанным с их рациональным проектированием, повышению эффективности их работы. Во-

просы оптимизации активных элементов из СПФ чрезвычайно важны в связи с высокой стоимостью этих материалов. Решению этих актуальных проблем и посвящена рецензируемая диссертация.

В диссертации впервые поставлен и в определенном плане решен вопрос рационального проектирования, как отдельных активных элементов, так и термомеханического двигателя турбинного типа в целом. Предложен критерий оптимальности активного элемента, сводящийся, фактически, к требованию одновременного осуществления обратного термоупругого фазового превращения во всех точках рабочего тела и равных реактивных напряжений, развиваемых во всех этих точках. Сформулированы упрощенные варианты этих критериев. Получены простые и весьма полезные с прикладной точки зрения коэффициенты эффективности для рабочего тела в виде изгибаемой балки и закручиваемого или растягиваемого стержня.

Как следствие первого закона термодинамики сформулированы уравнения энергетического баланса, учитывающие не только приток тепла, производимую механическую работу и тепловые потери, но и поглощение латентного тепла фазового перехода при прямом термоупругом мартенситном фазовом превращении в активных элементах из СПФ.

Для описания механического поведения активных элементов используются определяющие соотношения в виде конечных зависимостей между напряжениями, деформациями и температурой. Хорошо известно, что в общем случае поведение СПФ адекватно описывается не конечными, а дифференциальными соотношениями между приращениями деформаций, напряжений, параметра фазового состава и температуры. Однако согласно известной теореме об активных процессах пропорционального нагружения, в определенных условиях, которые выполняются для задач, решаемых в диссертации, дифференциальные определяющие соотношения имеют интеграл, сводящийся как раз к конечным соотношениям. Тем самым, подход, примененный в данной диссертации можно считать обоснованным.



Весьма важную часть работы представляют собой проведенные экспериментальные исследования механического поведения простейшего активного элемента - проволоки из СПФ. Проведены экспериментальные исследования по обратному термоупругому фазовому превращению в проволоке из никелида титана, предварительно деформированной в мартенситном состоянии и нагретой за счет пропускания электрического тока через интервал температур обратного превращения. Отработан режим предварительной тренировки проволоки, стабилизирующей ее последующую работу. Для тренированного таким образом образца определена максимальная нагрузка, под действием которой при обратном превращении происходит полное восстановление формы, что необходимо для обеспечения многократного циклического срабатывания активного элемента в составе термомеханического двигателя. Удалось определить характерные температуры начала и окончания обратного фазового превращения в испытываемом СПФ, а также величину латентного тепла, поглощаемого при обратном фазовом превращении. Необходимо отметить, что для определения этих величин обычно используется весьма дорогостоящее оборудование (установки дифференциальной сканирующей калориметрии) с помощью которых удастся провести измерения только в отсутствие приложенных напряжений и еще более дорогие и мало доступные установки дифференциального термического анализа, с помощью которых соответствующие измерения удастся провести в присутствии механических напряжений. Диссертанту удалось получить вполне приемлемые результаты при наличии напряжений и без использования указанного выше оборудования. Использована авторская установка, описанная в диссертации. Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований приведены в тексте диссертации в виде таблиц и протоколов, весьма удобных для последующего анализа.

В тексте диссертации приведено описание и анализ работы мартенситного двигателя весьма оригинальной конструкции с рабочими телами в виде очень тонких лент из никелида титана. Тем самым решена весьма важная тех-

ническая проблема увеличения скорости нагрева, и, особенно, охлаждения активных элементов из СПФ. В результате удалось существенно повысить скорость вращения ротора двигателя.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В тексте диссертации (например, в таблице на стр. 75) приведено чрезвычайно низкое значение модуля упругости никелида титана  $E=1800$  МПа. На самом деле величины, обозначаемые в тексте диссертации как  $E$  и  $G$  модулями упругости не являются. Это просто коэффициенты аппроксимаций нелинейных кривых деформирования СПФ типа (3.51), к модулям упругости никакого отношения не имеющие. Более того, используя приведенные в диссертации экспериментальные данные (таблица 4.3 на стр. 84) можно вычислить модуль разгрузки мартенсита  $E=28000$  МПа, что соответствует известным экспериментальным данным других авторов и подтверждает достоверность полученных в диссертации экспериментальных результатов.

2. Для моделирования движения активных элементов в жидкой среде и выборе формулы для сопротивления их движению необходимо было провести анализ, основанный на значениях числа Рейнольдса. Такой анализ в тексте не описан.

3. В тексте диссертации принят странный порядок изложения. Сначала в главе 3 описан процесс моделирования, и потом, только в главе 4, описан сам эксперимент, который моделируется. Это очень не удобно, поскольку содержание главы 3 трудно понять, не прочитав предварительно главу 4.

4. В тексте диссертации в нескольких местах используется необычный термин "Потенциальная работа". Следовало бы объяснить, что под этим понимается.

5. В тексте диссертации учитывается процесс поглощения латентного тепла фазового перехода при обратном термоупругом фазовом превращении. Определена даже величина этого латентного тепла по изменению наклона графика зависимости температуры от времени для процесса обратного превращения. Однако нигде не упоминается о выделении латентного тепла



фазового перехода при прямом термоупругом фазовом превращении. На кривых охлаждения никаких изменений наклона соответствующих графиков не обнаруживается.

6. Формула (3.57) на стр. 59 совершенно не понятна. Смысл последнего слагаемого правой части не ясен.

7. Формулы (2.5) и (3.89) содержат одинаковые обозначения для, вообще говоря, совершенно разных величин, которые совпадают между собой лишь при равномерном распределении температуры.

8. Вопросы связаны с предлагаемым критерием оптимизации, требующим равномерного распределения температуры по рабочему телу активного элемента. На деле равномерно должно быть распределение по материалу значения параметра фазового состава. Но параметр фазового состава зависит не только от температуры, но и от действующих напряжений. Поэтому при неравномерном распределении напряжений оптимальное распределение температуры также является неравномерным.

Отмеченные замечания не снижают положительного мнения о диссертационной работе.

Актуальность и прикладная ценность диссертации сомнений не вызывают. В ней получен ряд новых научных результатов. Достоверность полученных в работе данных подтверждается:

- использованием законов термодинамики, уравнений механики деформируемого твердого тела;
- соответствием полученных и известных результатов экспериментальных исследований.

Основные научные положения работы достаточно полно отражены в опубликованных диссертантом печатных работах.

Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Диссертация Зенина В. А. является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой и содержит решение важной проблемы разработки метода расчета и проектирования активного элемента для термоме-

ханического двигателя. Она соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Автор работы Зенин Владислав Александрович достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Доклад Зенина В.А. по диссертационной работе заслушан и обсужден на семинаре "Сплавы с памятью формы" ФГБУН ИПРИМ РАН. Отзыв по результатам обсуждения диссертации утвержден на заседании Ученого Совета ФГБУН ИПРИМ РАН 21.10.2014 протокол № 06/14

Докт. физ.-мат. наук,  
в.н.с. ФГБУН ИПРИМ РАН



Данилин А.Н.

*Подпись А.Н. Данилина удостоверяю*  
Ученый секретарь ФГБУН  
ИПРИМ РАН



Карнет Ю.Н.

