

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию **Саганова Евгения Борисовича** «Разработка методов анализа термомеханического поведения элементов конструкций, содержащих сплавы с памятью формы, работающих на кручение», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела

В настоящее время происходит все более широкое использование в технических устройствах активных элементов, изготовленных из сплава с памятью формы (СПФ) и генерирующих деформации или усилия при изменении температуры за счет происходящего в них мартенситного превращения. С точки зрения эффективного использования материала лучше всего использовать проволочные элементы, работающие в режиме растяжения или трубчатые элементы – в режиме кручения. При этом режим кручения трубок отличается тем, что он позволяет эффективно осуществлять их охлаждение или нагрев путем пропускания сквозь трубку потока теплоносителя. Естественными техническими приложениями для использования трубчатых элементов являются устройства, призванные осуществить поворот какого либо узла конструкции: руля, закрылка, задвижки и т.п. Для успешной разработки подобных устройств необходимо иметь средства расчета функционально-механического поведения активного элемента. Именно этой **актуальной** задаче и посвящена диссертация Е.Б.Саганова.

Практическая значимость диссертации обусловлена тем, что в ней разработана методика расчета как зависимостей угла поворота от температуры и крутящего момента, так и полей напряжений и деформаций трубчатых и сплошных цилиндрических элементов из СПФ в различных режимах термомеханического нагружения: при задании предварительной деформации путем активного деформирования в мартенситном состоянии, путем охлаждения под нагрузкой через интервал температур прямого мартенситного превращения, при активном нагружении в псевдоупругом состоянии, а также на этапе генерации усилия при обратном превращении. Результаты, полученные автором, использованы при выработке рекомендаций по созданию и режимам эксплуатации приводов из СПФ в системах управления конструктивными подвижными узлами летательных аппаратов.

Результаты, полученные в данной работе, основаны на использовании модели функционально-механического поведения СПФ, разработанной А.А.Мовчаном, Л.Г.Сильченко, С.А.Казариной и соавторами. Следует отметить их качественное соответствие экспериментально наблюдаемому поведению СПФ, что устанавливает

применимость данной модели, для решения краевых задач в указанных режимах нагружения. Кроме того выводы автора диссертации выявляют особенности процессов накопления фазово-структурной деформации и ее возврата в условиях неоднородного поля напряжений. Эти обстоятельства обуславливают **фундаментально-научное значение** диссертации.

Научная новизна работы состоит в том, что анализ известных режимов термомеханического нагружения элементов из СПФ в ней выполнен применительно к неоднородному напряженному состоянию с использованием апробированной феноменологической модели поведения СПФ, при этом определены допустимые упрощения, сохраняющие применимость данной модели. Предложены и подробно описаны новые алгоритмы решения рассмотренных одномерных краевых задач, Получены закономерности возврата деформации в режимах нагрева в свободном и заневоленном состоянии. Важной особенностью диссертации является использование при расчетах безразмерных переменных, что позволило автору установить подобие задач о расчете деформаций и напряжений в трубчатых образцах различных размеров с различными характеристиками упругости и мартенситного превращения.

Важной особенностью диссертации является стремление автора получить, где можно аналитические формулы для расчета деформации при кручении трубчатых элементов и использование данных решений в качестве предельных случаев при определении правильности результатов численных расчетов.

Достоверность результатов, полученных в диссертации обеспечена использованием апробированной модели для описания функционально-механического поведения СПФ в различных условиях термомеханического нагружения, хорошим владением аккуратном проведении математическим аппаратом, аккуратным проведением вычислений, подробным анализом результатов, а также качественным соответствием найденных зависимостей деформации (угла закручивания) от крутящего момента и температуры известным экспериментальным данным.

Диссертация хорошо **апробирована**. Ее результаты доложены на ряде российских и международных научных конференций. Имеется достаточное число публикаций в журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация содержит **содержательный обзор** наиболее разработанных моделей поведения СПФ, свидетельствующий о глубоком знакомстве автора с предметом работы. Рассматриваются различные классы моделей, описывающих явления мартенситной неупругости, отмечены их достоинства и недостатки. Следует отметить четкий отбор материала в обзоре.

Диссертация содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает ее чтение. **Автореферат** дает четкое представление о диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

По тексту диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Диссертация посвящена решению краевых задач для тел из СПФ, однако в обзоре примеры таких решений отсутствуют.
2. На с.16 в порядке критики модели К.Танаки высказано утверждение "Очевидно, что в рамках соотношения (1.7) деформация, накапливаемая за процесс ПМП, не зависит от величины приложенного напряжения". Это неверно, так как тензоры Θ и Ω могут зависеть от напряжения.
3. На с.5. сказано, что "наиболее перспективными устройствами с точки зрения величины обратимой деформации являются механизмы, работающие на кручение". Это – явное преувеличение. Многие успешные приложения используют элементы, работающие на растяжение.
4. Кривые $s(\gamma)$ на рис.2.2 – 2.7 при одинаковом значении g_M не должны зависеть от σ_0 , поскольку σ_0 входит в формулу 2.12 (по которой строятся эти кривые) только через соотношение $g_M = G_M / \sigma_0$. Поэтому, расхождение зависимостей $s(\gamma)$, построенных при одинаковых G_M мало и ощутимо только при больших напряжениях. Нужно было это явно отметить в тексте, а вместо 6-ти графиков привести 2, показывающих зависимость кривых $s(\gamma)$ от α .
5. Не удивительно, что рисунки 2.11, 2.14, 2.17 в точности совпадают (то же самое относится к группам рисунков 2.12, 2.15, 2.18 и 2.13, 2.16, 2.19), поскольку именно для этого и вводятся безразмерные переменные. Можно было бы сразу сказать об этом и не приводить излишние рисунки.
6. Влияние вида распределения F_1 стоило бы показать на зависимостях $\gamma(\mu)$ при $q=1$, но такие графики не приведены.
7. На с.52 при исследовании зависимости решения от функции $f(q)$ варьировали только параметр f_c , а f_a и f_c не варьировались. Тем не менее, сделан вывод, что влияние функции $f(q)$ незначительно. Но это только при данных значениях f_a и f_c .
8. В разделе 4.1 исследуется процесс обратного превращения при постоянном напряжении, которое совпадает с напряжением, действовавшим при предшествующем прямом превращении. При этом утверждается, что данный процесс моделирует рабочий ход активного элемента привода. На самом деле, часто напряжение, действующее при нагреве, больше того, которое действовало ранее при охлаждении (тогда привод совершает работу больше, чем ранее

затраченная). При нагреве в таких условиях наблюдается немонотонная зависимость деформации от температуры. В диссертации такое явление не моделируется и не обсуждается.

9. На с.114 утверждается: "Так как в случае изотермического нагружения образца из СПФ в режиме сверхупругости справедливо положение об АППН, то соотношения (5.6-5.8) можно представить в виде конечного алгебраического уравнения, которое имеет следующий вид: $\gamma^{phst} = \rho_d q F_1(\sqrt{3}\tau)$ ". Однако, из предыдущих рассуждений ясно, что данная величина представляет собой $\int d\gamma^{ph}$, тогда как она должна равняться $\int (d\gamma^{ph} + d\gamma^{st})$. Таким образом, автор фактически пренебрегает здесь вкладом структурного перехода, а учитывает только фазовый.
10. Не выдержана единая система обозначений. Например, t_0 в формулах (4.53), (4.64) обозначает разные величины, а на с. 123 имеет уже третий смысл. На с. 21 в формуле (1.30) символ Δ означает в разных случаях то приращение, то лапласиан, причем дальше следует неверное разъяснение, что ΔT это "градиент температуры".
11. В диссертации часто используется термин "актуатор". Это чистая калька с английского. Вместе с тем в русской литературе уже имеется принятый термин "привод".
12. Имеется очень большое количество опечаток, неточностей и недостатков оформления. Наиболее значительными являются следующие.
 - (а) неудачные выражения: "двоеточие – суммирование по повторяющемуся индексу" (с.15), "внешнее напряжение" (с. 4, 15, 41, 109, и т.д.), "нейтральная линия" (цилиндра) (с.49, 58, 65, и т.д.), нейтральная ось стержня (с.55, 80),
 - (б) в работах [92-94] описаны не микромеханические (как утверждается в тексте), а макроскопические модели (с.14);
 - (в) " μ соответствует упругой крутке крайнего волокна" - крутка относится ко всей трубке, а не к какому-то волокну (с.42)
 - (г) на с.46 встречается термин "тензор структурных деформаций", хотя модель не допускает разбиение тензора фазово-структурных деформаций на отдельные тензоры фазовых и структурных деформаций;
 - (д) опечатки в формулах (2.10), (5.4);
 - (е) «Как видно из рисунков 3.18, 3.19...» - из рис. 3.18 вообще ничего не видно, а из рис.3.19 почти ничего не видно, к тому же не указана последовательность следования эпюр (с.52);
 - (ж) "Однако решение в предположение о равномерном распределении параметра фазового состава по сечению стержня может быть использовано для

