

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию **Сафронова Павла Андреевича** «Описание процесса деформирования изгибаемых элементов из сплава с памятью формы с учетом разносопротивляемости материала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы диссертации. Диссертация посвящена расчету напряженно-деформированного состояния рабочих элементов, изготовленных из сплава с памятью формы (СПФ) и работающих в режиме изгиба, который позволяет получить большие перемещения при задании и возврате обратимой фазовой деформации. Это открывает новые возможности для создания мартенситных приводов и других технических устройств и, одновременно, требует наличия эффективных средств моделирования поведения изгибаемых элементов. Накопленные знания о функционально-механических свойствах СПФ, и уровень развития моделей для их расчета достаточны для их использования в решении краевых задач. Однако, степень разработанности методов решения таких задач явно недостаточна, ввиду сложности механизмов развития фазовой деформации, приводящей к таким эффектам, как сильная зависимость диаграмм деформирования от температуры, влияния напряжений на характеристики фазовых превращений, выделение скрытой теплоты превращения, асимметрия механических свойств СПФ по отношению к растяжению – сжатию. Сказанное позволяет сделать вывод об **актуальности** исследования, предпринятого в настоящей диссертации.

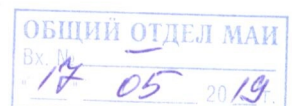
Практическая значимость диссертации очевидна: полученные результаты позволяют давать научно обоснованные рекомендации по выбору материала и размеров активных элементов приводов и силовых элементов, работающих в условиях изгиба, исходя из температурных и силовых условий их функционирования.

Фундаментально-научное значение. Диссертационное исследование выявляет влияние неоднородности поля напряжений на закономерности реализации фазовых переходов и развития деформации в СПФ.

Научная новизна. Впервые найдены распределения напряжений, деформаций и объемной доли мартенсита при изгибе балок и пластин с учетом различия процессов деформации СПФ при растяжении и сжатии, и различия модулей упругости.

Наиболее значительными являются следующие результаты.

Выполнен подробный анализ существующих макромоделей СПФ, и сделан важный вывод о неправильности использования единого потенциала текучести, с помощью которого достигается описание явления разносопротивляемости для двух различных механизмов накопления неупругих деформаций. Этот вывод указывает на пути поиска адекватных моделей для описания деформации СПФ.



Разработаны алгоритмы расчета эволюции полей напряжений, деформаций и объемной доли мартенсита в активных элементах технических устройств в форме балок и пластин, выполненных из СПФ и работающих на изгиб при их деформировании внешним моментом или в условиях охлаждения и нагрева при действии постоянного момента. Представленные алгоритмы могут быть использованы при решении краевых задач о прямом мартенситном превращении в несвязной и связной термомеханической постановке в балках и пластинках с учетом разносопротивляемости и/или разномодульности СПФ, из которых они изготовлены.

Показано, что зависимость кривизны балки от параметра фазового состава в процессе охлаждения должна быть линейной в случае изгиба балки и близкой к линейной при изгибе пластинки.

Выявлено, как асимметрия свойств СПФ по отношению к растяжению – сжатию влияет на накопление фазово-структурной деформации при изгибании балки или пластины, в мартенситном состоянии моментом или при ее охлаждении при действии постоянного момента, в частности, она приводит к значительному смещению нейтральной плоскости в сторону сжатых волокон. Найдены закономерности изменения положения нейтральной плоскости.

Детально описаны формулы и алгоритм расчета кривизны изгибаемой балки при увеличении момента. Подробно исследована задача нахождения координаты нейтральной линии при малых значениях момента. Выполненные расчеты показали, как разносопротивляемость влияет на диаграмму кривизна-момент.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечена использованием физически обоснованных моделей, описывающих механические свойства СПФ; аккуратностью использования апробированных математических методов; соответствием между полученными решениями и решениями для частных случаев, найденными другими методами; а также согласием с известными экспериментальными данными. Диссертация содержит **подробный обзор** теоретических и экспериментальных работ, посвященных решению задач об изгибе пластин из СПФ с различной степенью приближенности.

Апробация. Результаты исследования доложены на ряде авторитетных всероссийских научных конференций и всероссийских конференций с международным участием. Имеется достаточное число публикаций в журналах, рекомендованных ВАК.

Автореферат дает четкое представление о диссертации и в полной мере отражает ее содержание. Сама диссертация хорошо оформлена, написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций.

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

1. Говоря о разномодульности аустенита и мартенсита необходимо указывать, какой модуль имеется в виду. Если определять модуль никелида титана по начальному участку диаграммы деформирования на стадии **нагрузки**, то модуль мартенсита получится в 2.5 – 3

раза меньше модуля аустенита. Если же определять модуль по начальному участку диаграммы деформирования при **разгрузке**, то модуль мартенсита окажется даже несколько больше модуля аустенита. Тот же результат получится, если определять значение модуля динамическим методом, измеряя квадрат частоты резонансных колебаний образца.

2. В разделе 2.1 про величину σ_0 сказано только, что это – «некоторое характерное напряжение». Однако, затем используются разные значения этой величины для сжатия и растяжения, причем никак не разъясняется, как следует выбирать это значение. Более того утверждается, что «Наибольшее влияние на поведение рассматриваемой зависимости оказывают параметры материала: максимальная деформация ρ_d и параметра σ_0 ». Таким образом, параметр σ_0 рассматривается уже не просто как некоторое характерное напряжение, но как материальная константа.
3. Вывод 3 на с.23: «Необходимо учитывать тот факт, что диаграмма накопления неупругих деформаций по механизму структурного перехода в случае растягивающей нагрузки чувствительна к виду напряженного состояния, а в случае сжимающей нагрузки – к виду деформированного состояния» – недостаточно подкреплён фактами, изложенными в разделе 1.1.
4. Не исследован вопрос, насколько корректно можно рассматривать задачу о консольном изгибе при наличии перерезывающей силы (разделы 2.2, 2.3), в предположении, что касательные напряжения равны нулю.
5. В работе явно не сказано, какая может быть ошибка при оценке максимальных напряжений из-за не учета разносопротивляемости материала по отношению к растяжению – сжатию.
6. Имеются замечания по использованию терминов, оформлению и стилю изложения.
 - (а) Подписи к рисункам слишком схематичны, их невозможно понять без чтения текста, который иногда располагается далеко от рисунка.
 - (б) На с. 13 говорится о том, что в работах [5,61-74] рассматривали нагружение образцов из СПФ **монокристаллической структуры в мартенситном состоянии**. Однако, даже монокристалл аустенита превращается в мартенсит посредством различных вариантов деформации Бейна, что порождает домены мартенсита с разноориентированными кристаллографическими осями.
 - (в) В пояснениях к формулам (2.32) не сказано, хотя и можно догадаться, что η есть безразмерный прогиб.
 - (г) С.32: «Принимаются обычные **кинематические** гипотезы Бернулли-Эйлера (касательные и поперечные нормальные напряжения считаются малыми)». Кинематические гипотезы касаются компонент деформации, а не компонент напряжений.

(д) Аббревиатура АППН впервые встречается на с.9, а расшифровывается только на с.10. Явное определение этого понятия в диссертации вообще отсутствует, несмотря на важность положений об АППН для данной работы.

(е) На с.37 введена величина $\alpha = \varepsilon_0/kh$, про которую сказано, что это безразмерное положение нейтральной плоскости, отсчитываемое от плоскости симметрии. Однако, из формулы (2.9) при $\varepsilon=0$ следует: $z/h = -\varepsilon_0/kh$.

(ж) На диаграммах деформирования силовую характеристику (момент на рис. 2.6) принято откладывать по оси ординат.

(з) Формула (2.41) на с.56 записана дважды.

(и) Имеется ряд опечаток, например, на с. 30(строка 5 снизу), с.36 (строка 11), и др.

Сделанные замечания относятся, в основном, к оформлению работы и не изменяют общую положительную оценку диссертации, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Результаты представляют несомненный интерес для проектирования рабочих тел приводов в технических устройствах, так и для фундаментальной науки. Проблемы, решению которых посвящена данная работа, актуальны, полученные результаты достоверны. Все полученные результаты являются новыми. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Полученные результаты достаточно полно описаны в публикациях автора. Таким образом, работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Сафронов Павел Андреевич обладает необходимой квалификацией и заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. – механика деформируемого твердого тела.

Профессор кафедры теории упругости

Санкт-Петербургского Государственного Университета

д.ф.-м.н.


14.05.2019

Волков Александр Евгеньевич

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7-9

a.volkov@spbu.ru

Тел. +7 (812) 4287079

