

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Думанского Станислава Александровича**  
**на тему: «Решение задач устойчивости элементов из сплавов с памятью**  
**формы»**  
**по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»**

**Актуальность исследования.** Результаты экспериментальных и теоретических исследований потери устойчивости элементами из сплавов с памятью формы (СПФ), вызванных фазовыми переходами, происходящими под действием постоянных напряжений, показывают, что упругий анализ устойчивости для данных процессов дает кратно завышенные значения критических нагрузок. Существующие аналитические решения задач устойчивости для аналогичных процессов термомеханического нагружения, полученные с использованием нелинейных моделей деформирования СПФ, проводились только в рамках однократно связанной постановки задачи устойчивости для систем определяющих соотношений, которые не учитывали взаимного влияния между фазовыми и структурными механизмами деформирования. Полученные таким образом решения задач устойчивости находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными до тех пор, пока гибкость элемента относительно велика, но при этом занижают уровень критических нагрузок для толстостенных элементов. Таким образом, задача разработки средств анализа устойчивости элементов конструкций из СПФ, несомненно, является актуальной.

**Новизна** работы состоит в применении для анализа устойчивости элементов из СПФ дважды термомеханически связанных объединенных моделей фазового и структурного деформирования, позволяющих описывать процессы нелинейного деформирования данных материалов с учетом

различных механизмов накопления неупругих кристаллографически обратимых деформаций и их взаимного влияния.

**Практическое значение.** Сплавы, близкие по составу к равноатомному никелиду титана, применяются во многих высокотехнологичных приложениях. Анализ устойчивости элементов из СПФ, часто выполняющих функции исполнительных механизмов, приводимых в действие в результате фазовых переходов, является неотъемлемой и критически важной частью процесса проектирования конструкций, содержащих такие элементы.

**Фундаментально-научное значение** диссертации состоит в расширении представлений о механизмах потери устойчивости в условиях, когда материал, из которого изготовлен элемент конструкции, испытывает деформации, связанные с протеканием мартенситного фазового превращения или переориентации мартенсита. На фундаментальность проведенных исследований указывает также тот факт, что эти работы проводились при поддержке двух грантов РФФИ.

**Достоверность** полученных в работе результатов подтверждается использованием классического аппарата механики сплошных сред и их согласованностью с теоретическими выводами и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Апробация результатов. Результаты, полученные в диссертаций доложены на ряде научных семинаров и конференций, в числе которых Научно-исследовательский семинар кафедры механики композитов механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский семинар кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, (г. Санкт-Петербург, 2023). Они опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах.

**Содержание диссертации** составляют: введение, четыре главы, заключение, три приложения и список литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, приводятся ссылки на работы других авторов, занимавшихся аналогичными проблемами, формулируются цели и задачи диссертации, а также обосновываются ее практическая значимость и достоверность приводимых результатов.

**В первой главе** дается краткое описание структурных особенностей равноатомного никелида титана, феноменологии процессов нелинейного кристаллографически обратимого деформирования данного интерметаллида, а также практических аспектов применения СПФ.

**Во второй главе** приводятся формулировки трех феноменологических термодинамически замкнутых систем определяющих соотношений, описывающих нелинейное фазовое и структурное деформирование СПФ, используемых в диссертации. Отличия между данными моделями заключаются в выборе соотношений, применяемых для описания эволюции деформаций, обусловленных структурными механизмами. В завершающем разделе главы при помощи данных определяющих уравнений проводится моделирование трех характерных для рассматриваемого класса материалов процессов нелинейного термомеханического деформирования, включающих прямой фазовый переход, происходящий под действием постоянных напряжений, деформирование в режиме мартенситной неупругости и обратный фазовый переход, происходящий под действием постоянных напряжений, результаты которого количественно правильно описывают наблюдаемые в экспериментах явления.

**Третья глава** посвящена краткому обзору основных подходов к анализу устойчивости механических систем и формулировке статического метода Эйлера, позволяющей выполнять исследование устойчивости элементов из СПФ при фазовых переходах, происходящих под действием постоянных или получающих бесконечно малые приращения внешних нагрузок. Для описания влияния внешних и внутренних связей, накладываемых на элемент из СПФ во время его перехода к смежной форме

равновесия, используются концепции и постановки, соответственно. Отличительной особенностью диссертации является использование дважды термомеханически связанной постановки задачи устойчивости, учитывающей выделение или поглощение латентного тепла и диссипацию энергии, происходящие в возмущенном процессе.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования потери устойчивости стойки Шенли на стержнях из никелида титана, стержня и пластины из никелида титана, вызванной фазовыми переходами, происходящими под действием постоянных напряжений, в несвязанной, однократно и дважды связанной постановках задачи устойчивости для концепций фиксированных и варьируемых внешних нагрузок. Для всех аналитических выражений, представляющих основные результаты работы, приводятся строгие математические выводы.

Среди **наиболее важных достижений** следует отметить следующие. Исследовано влияние способа подготовки элементов перед началом обратного фазового перехода. Установлено, что критические нагрузки зависят как от величин и знака фазово-структурных деформаций, накопленных перед началом обратного фазового перехода, так и от способа получения данных деформаций.

Установлено, что во время потери устойчивости, вызванной прямым фазовым переходом, дополнительное структурное деформирование не может происходить, тогда как при решении задачи устойчивости при обратном термоупругом фазовом превращении необходим учет возможности дополнительного структурного превращения.

Теоретический анализ для всех типов элементов подтверждает эмпирически установленный факт, что с уменьшением гибкости элемента влияние дополнительного фазового перехода на процесс потери устойчивости элемента существенно возрастает.

**Замечания.** Все замечания имеют характер пожеланий или касаются недостатков в изложении материала или оформления.

1. Модели 2 и 3 обе предполагают наличие комбинированного (изотропного и трансляционного) упрочнения при структурной деформации. Не указано, в чем преимущества и ограничения каждой из этих моделей.
2. В диссертации недостаточно ясно объясняется, когда и почему при обратном превращении под нагрузкой происходит также преобразование структуры (переориентация) мартенсита.
3. В модели для расчета деформации при переориентации мартенсита использована поверхность течения Мизеса, (формулы (2.8)) в то время как свойства изменения деформации при структурной перестройке различны для напряжения и сжатия. Не объясняется, почему не используется другая поверхность течения, учитывающая влияние первого и/или третьего инварианта тензора напряжений.
4. С.23, 24. Не указано, по каким переменным берется максимум в формулах (2.12) и (2.14).
5. С.25: «функции, содержащие в качестве переменной гидростатическое давление, такие как трехосность, не подходят в качестве параметров вида напряженного состояния для данных материалов.» Однако, в формулу (2.19) входит гидростатическое давление.
6. В пункте 2.3.1 диссертации приведены таблицы, содержащие значения материальных констант для равноатомного никелида титана. В тексте не указан источник, из которого взяты эти значения.
7. Имеются случаи неточного использования терминов, нераскрытые обозначения и опечатки. Среди них стоит отметить следующие.
  - а. С.10. Есть термин "ромбоэдрическая фаза", но нет термина "ромбоэдрический переход".
  - б. Термин «структурные превращения» не совсем удачен, поскольку термин "превращение" обычно связывают с фазовым превращением.
  - в. С.12: «три основных механизма эволюции кристаллической решетки мартенситных структур [126; 149; 153]: раздвойникование,

переориентация и скольжение». Неудачное использование слова «эволюция», поскольку при каждом из этих процессов кристаллическая решетка не изменяется.

- г. С.15. В подписи к рис.1.6 не указано, какие данные представляют точки и кривые 1 и 2.
- д. Не указано, для каких сплавов построены диаграммы мартенситной неупругости. В частности, из-за этого неясно, почему диаграмма на рис.1.7 сильно отличается от такой же диаграммы на рис.1.6а.
- е. Правильнее говорить «переменные состояния» вместо «параметры состояния».
- ж. Соотношения Дюамеля – Неймана задают термические и упругие деформации, а не только термические.
- з. С.22. Не разъяснено обозначение  $\rho_D^f$  в формуле 2.5.
- и. С.25. Не указано, что такое  $\Delta T$  в формуле (2.19).
- к. Подпись к рис.2.2 не дает возможности понять его, не обращаясь к тексту.
- л. С.15: «Согласно результатам экспериментов, проведенных в работах [53; 54], эволюция фазово-структурных деформаций, накапливаемых в режиме мартенситной неупругости и зависящих от вида напряженно-деформированного состояния рис. 1.6». Предложение не закончено.

Данные замечания не влияют на положительную оценку диссертации, которая отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного

университета имени М.В.Ломоносова. Опубликованные соискателем по теме диссертации печатные работы содержат достаточно полное описание полученных результатов и методов их получения.

Таким образом, соискатель Думанский Станислав Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теории упругости  
Санкт-Петербургского государственного университета

Волков Александр Евгеньевич

28.11.2023

Контактные данные:

тел.: +7 812 428-69-89, e-mail: [a.volkov@spbu.ru](mailto:a.volkov@spbu.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Адрес места работы:

199034, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, д. 7/9  
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет,

кафедра теории упругости

Тел.: +7 812 428-69-89; e-mail: [a.volkov@spbu.ru](mailto:a.volkov@spbu.ru)