

ОТЗЫВ

официального оппонента Рогового Анатолия Алексеевича
на диссертационную работу Думанского Станислава Александровича
«Решение задач устойчивости элементов из сплавов с памятью формы»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертация С.А. Думанского посвящена моделированию потери устойчивости элементами конструкций из сплавов с памятью формы (СПФ), вызванной фазовыми переходами, происходящими под действием постоянных внешних усилий с учетом взаимовлияния различных механизмов нелинейного деформирования, характерных для данных материалов. Моделирование основывается на теории, описывающей термомеханическое поведение СПФ, разработанной при определяющем участии Андрея Александровича Мовчана. Полученные результаты представляет как самостоятельный интерес, так могут быть полезными и с практической точки зрения.

Актуальность темы диссертации

Сплавы с памятью формы представляют собой класс функциональных материалов, в которых в результате размытого фазового перехода первого рода кристаллическая решетка одной симметрии переходит в кристаллическую решетку другой, более низкой, симметрии. Такой фазовый переход возникает в определенном интервале изменения температуры, который сдвигается при действии силового поля в соответствии с законом Клаузиуса-Клапейрона. Высокосимметричная высокотемпературная аустенитная фаза переходит в низкосимметричную мартенситную фазу при уменьшении температуры в интервале фазового перехода (прямой фазовый переход), что сопровождается возникновением фазовых деформаций (деформаций Бейна), и восстанавливается при увеличении температуры (обратный фазовый переход) при нагревании, но уже через другой температурный интервал, с полной или частичной аннигиляцией возникших фазовых деформаций.

Одним из представителей СПФ, имеющем большое практическое применение, является никелид титана, в котором объемцентрированная кубическая кристаллическая решетка аустенитной фазы переходит в базоцентрированную моноклинную решетку в мартенситной фазе. Группа симметрии (равноправности) O_A кубической решетки состоит из 24-х ортогональных тензоров $\mathbf{R}_i, i = 1, 2, \dots, 24$, переводящих куб в куб, а группа симметрии моноклинной решетки O_M , являющаяся подгруппой O_A , $O_M \subset O_A$, состоит из 2-х ортогональных тензоров, переводящих моноклинную решетку в себя. Преобразованию кубической решетки в моноклинную соответствует тензор деформаций Бейна \mathbf{U} . Т.к. эквивалентных кубических решеток 24, то и разных тензоров Бейна (разных вариантов мартенсита) может быть 24: $\mathbf{U}_i = \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{R}_i^T$, но независимых из них будет только 12, в силу неразличимости двух конфигураций моноклинной решетки. Каждый из 12 вариантов мартенсита имеет один и тот же тензор Бейна, отнесенный к собственным кристаллографическим осям, которые по-разному ориентированы в пространстве. Соотношение $\mathbf{U}_i = \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{R}_i^T$ приводит их к одному базису – кристаллографическим осям аустенитного состояния.

Фундаментальной кинематической величиной в механике сплошных сред является градиент места (градиент деформации). С помощью него определяются все деформационные и геометрические характеристики процесса, такие как меры и тензоры деформаций, элементарные объемы и поверхности. На границах раздела разных вариантов мартенсита (мидриб), а также мартенсита и аустенита (габитус) градиент места, являясь непрерывным тензором, может терпеть разрыв в нормальном к поверхности раздела направлении. Это положение описывается уравнением совместности Адамара, решение которого определяет как двойниковую структуру с согласованными вариантами мартенсита, так и согласование разных двойниковых мартенситных структур, а также согласование двойниковых мартенситных структур и аустенитной структуры. Процесс образования мартенситной структуры в аустените сопровождается возникновением в обеих фазах микронапряжений.

Сказанное выше относится к монокристаллу и соответствует в поликристаллическом материале одному зерну, кристаллографические оси которого в аустенитном состоянии имеют вполне определенное направление. Множество таких зерен с разной ориентацией осей образуют представительный объем, состоящий, в отсутствие внешнего силового воздействия и ориентированных микронапряжений при полностью завершеном фазовом переходе, из хаотично ориентированного сдвойникового мартенсита. Макродеформации такого представительного объема пренебрежимо малы. Силовое поле, приложенное к материалу в этом состоянии, приводит при достижении критической величины к раздвойникованию мартенсита (структурное превращение), росту степени его ориентированности и, соответственно, росту макроскопических деформаций (структурных деформаций), которые могут достигать значительной величины (6 – 10%). Силовое поле, приложенное к материалу в процессе прямого фазового перехода, ведет к образованию в мартенситной фазе только тех вариантов мартенсита, которые наиболее благоприятно ориентированы по отношению к этому полю. Такой процесс также сопровождается ростом макроскопических деформаций, которые тоже могут достигать значительной величины. При обратном фазовом переходе, происходящем при нагревании материала, и структурные, и фазовые деформации исчезают. Кроме того, приложенное внешнее силовое поле сдвигает характерные температуры прямого и обратного фазовых переходов, что описывается соотношением Клаузиуса-Клапейрона. К сказанному выше добавим, что, в соответствии с принципом Ле Шателье-Брауна, материал выделяет латентное тепло при прямом фазовом переходе, что тормозит процесс его охлаждения, и поглощает тепло при обратном, что тормозит его нагревание.

Описать такой сложный термомеханический процесс призвана феноменологическая теория, разработанная при определяющем участии Андрея Александровича Мовчана. В ряде публикаций продемонстрировано хорошее соответствие результатов, полученных в рамках этой теории, и экспериментальных данных. В рамках этой теории в настоящей работе моделируется потеря устойчивости элементов конструкций, выполненных из СПФ. Эта проблема рассматривалась во

многих публикациях, но задача ставилась, как несвязанная – фазовый состав, фазово-структурные деформации и температура при переходе к смежной форме равновесия считались неизменными. А.А.Мовчаным с сотрудниками было показано, что упругий анализ устойчивости элементов из СПФ, проводимый с использованием значений упругих констант, соответствующих полностью мартенситному состоянию, дает кратно завышенные значения критических нагрузок, и была осуществлена постановка однократно связанной задачи (учитывается влияние действующих напряжений и накопленных фазово-структурных деформаций на параметр фазового состава, а также дополнительное фазово-структурное деформирование. Температура предполагается фиксированной и равной своему значению в момент времени, предшествующий потере устойчивости). Настоящая работа является логическим продолжением однократно связанной постановки, дополняя ее учетом выделения/поглощения латентного тепла (дважды связанная постановка по определению автора). Сказанное выше позволяет констатировать, что тема диссертации, направленной на разработку методов моделирования потери устойчивости элементов конструкций из СПФ при прямом и обратном фазовых переходах в рамках однократно и дважды связанных постановок и решение конкретных задач является, несомненно, **актуальной**.

Цель диссертационной работы Думанского Станислава Александровича состоит в постановке задач устойчивости стержней и пластин, выполненных из никелида титана, при фазовых переходах, происходящих под действием постоянных нагрузок, и в построении для конкретных задач аналитических и численно-аналитических решений, учитывающих особенности нелинейного деформирования и однократно и дважды связанного термомеханического поведения СПФ.

Для достижения цели термомеханическое поведение никелида титана при однократно и дважды связанной постановках описывалось в рамках модели нелинейного термомеханического деформирования СПФ, предложенной Андреем Александровичем Мовчаном.

В диссертации использованы определяющие соотношения, сформулированные в рамках феноменологического подхода механики деформируемого твердого тела. При постановке задач устойчивости в малом применяется статический метод Эйлера, приводящий к решению обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных. Вычислительные алгоритмы реализованы в виде программ, написанных на языке C++. Для построения графиков используется библиотека Matplotlib языка программирования Python.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка используемой литературы. Последний содержит 163 наименования как отечественных, так и зарубежных авторов.

Краткий анализ содержания

Во **введении** в результате аналитического обзора научной литературы по изучаемой проблеме формулируется цель и обосновывается актуальность исследований, ставятся необходимые для достижения цели задачи, формулируются научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена описанию характерных особенностей поведения материала в прямом (аустенит – мартенсит) и обратном (мартенсит - аустенит) фазовых переходах при действии температуры и/или напряжения. В ней приведены сведения, аналогичные изложенным в предпоследнем абзаце раздела под названием **Актуальность темы диссертации** настоящего отзыва.

В главе 2 осуществлена математическая постановка задачи о термомеханическом поведении СПФ. Приведены соотношения феноменологической теории А.А.Мовчана (кинематические соотношения – деформации и их приращения, соотношения фазового состава, уравнение теплопроводности с дополнительными источниками), которые в общем случае являются связанными. Представлены материальные константы и функции для никелида титана. Коррект-

ность описания явления мартенситной неупругости проверяется на трех процессах термомеханического нагружения: прямом фазовом переходе, происходящем под действием постоянных напряжений, изотермическом нагружении из состояния хаотического мартенсита и обратном фазовом переходе, происходящем под действием постоянных напряжений.

В главе 3 приводится краткий обзор основных подходов к анализу устойчивости механических систем и дается формулировка статического метода Эйлера, в рамках которой можно проводить исследование устойчивости элементов конструкций из СПФ во время фазовых переходов, происходящих под действием постоянных нагрузок, с учетом их дважды термомеханически связанного поведения. Вводятся концепции фиксированных (ФН) и варьированных (ВН) внешних нагрузок и фиксированной (ФТ) и варьированной (ВТ) температуры. При использовании концепции Ф предполагается, что соответствующая величина не получает приращения при переходе к смежной форме равновесия, а в рамках концепции В, напротив, может получить некоторые приращения. Вводятся понятия несвязанной, однократно и дважды связанных постановок задач на устойчивость.

Глава 4 посвящена исследованию устойчивости элементов конструкций из СПФ во время прямых и обратных фазовых переходов, происходящих под действием постоянных напряжений. Исследовались стойка Шенли на стержнях из нитинола и отдельно стержень из нитинола в однократно и дважды связанных постановках для концепций ФН и ВН, пластина из СПФ при прямом фазовом переходе, происходящем под действием постоянных напряжений, в однократно и дважды связанной постановках для концепции ВН.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в работе.

Достоверность результатов, полученных при исследовании устойчивости элементов конструкций из СПФ, обеспечивается использованием апробированной, физически обоснованной и экспериментально подтвержденной модели

А.А.Мовчана, описывающей поведение таких материалов, и подтверждается качественным соответствием явлениям, наблюдаемым в реальности.

Научная новизна полученных результатов, авторскую формулировку которой я посчитал необходимым несколько отредактировать, заключается в следующем:

- впервые выполнен анализ устойчивости элементов конструкций из СПФ с использованием объединенных моделей фазового и структурного деформирования в дважды термомеханически связанной постановке для концепций фиксированной и варьированной нагрузок;
- предложена модификация объединенной модели фазового и структурного деформирования СПФ, в рамках которой приращение деформаций СПФ за счет фазовых механизмов зависит от девиатора тензора напряжений, а не от девиатора тензора активных напряжений;
- впервые непосредственно показано, что для рассматриваемых моделей деформирования СПФ, во время фазовых переходов, вызванных монотонным охлаждением или нагревом и происходящих при постоянных напряжениях, структурное деформирование не имеет места;
- дано теоретическое объяснение эффекта зависимости величин критических нагрузок от способа предварительной подготовки элемента в случае потери устойчивости при обратном фазовом переходе, происходящем под действием фиксированных напряжений.

Практическая значимость работы состоит в наиболее общей постановке задач устойчивости элементов конструкций из СПФ, претерпевающих прямые и обратные фазовые переходы, учитывающей все, наиболее существенные, особенности поведения таких уже широко используемых в промышленности материалов, что позволяет более точно смоделировать их поведение в разных ситуациях.

Тема диссертации и ее содержание **соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».**

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Замечания по существу работы

1. Во втором пункте приведенной выше научной новизны говорится о модификации модели за счет использования девиатора тензора напряжений вместо девиатора тензора активных напряжений. В работе я не увидел каких-либо теоретических обоснований этому и не понял, что в результате это дало.
2. Я переформулировал третий пункт приведенной выше научной новизны, который в авторской редакции начинался так: «Впервые установлено ...». Я полагаю, что все отмеченное далее в этом пункте, заложено в модель А.А.Мовчана, а автор диссертации это непосредственно продемонстрировал и, наверное, впервые.
3. Как я понимаю, потеря устойчивости стойки Шенли – это возникновение ненулевого угла α ? Такое может происходить или за счет разных осевых деформаций стержней из СПФ, или за счет разной формы их изгиба, или за счет первого процесса в одном стержне и второго в другом. То есть существуют несколько механизмов потери устойчивости, но в работе рассматривается только первый из этого списка. Далее, в следующем разделе, рассматривается устойчивость стержня из СПФ по изгибному механизму и на стр. 63 и 64 отмечается, что качественно полученные для стержня решения полностью согласуются с результатами анализа устойчивости стойки Шенли на стержнях из СПФ. Как это понять, ведь в этих задачах действуют разные механизмы потери устойчивости?
4. Можно было попробовать получить сдвиг температур (соотношения (2.17), (2.18)) из термодинамики, построив уравнение Клаузиуса-Клайперона.
5. Тензоры во всех соотношениях представлены в прямоугольной декартовой системе координат в компонентном виде. Лучше использовать более общую тензорную форму представления.

Редакционные замечания

1. В конце Введения следовало бы указать, что список сокращений и условных обозначений, использованных в работе, приведен в конце диссертации. Не зная этого, читателю приходится часто догадываться, что означает та или другая величина, не описанная непосредственно в тексте.
2. Полагаю, что на графиках рис. 1.4, построенных по результатам испытаний на растяжение или сжатие (одноосное напряженное состояние, но не одноосное деформированное), приведена осевая деформация.
3. Под соотношением Дюамеля-Неймана понимают, помимо (2.3), закон Гука, учитывающий температурные деформации.
4. Обозначения, использованные в выражении (2.19), могут вызвать у читателя путаницу: одно Δ есть оператор Лапласа (ΔT), а другое - приращение соответствующей величины (ΔU).
5. В формуле (2.20) есть m , но не m_c .
6. Имеются замечания относительно орфографии и пунктуации. В отличие от других работ, их немного и при дополнительной вычитки текста автор, надеюсь, их сам найдет.

Высказанные замечания не носят принципиального характера и несколько не умоляют ценности работы.

Заключение

Диссертация Думанского Станислава Александровича, выполненная на тему «Решение задач устойчивости элементов из сплавов с памятью формы», является научно-квалификационной работой, вносящей существенный вклад в исследование вопросов устойчивости конструкций, содержащих элементы из СПФ. Основные положения ее опубликованы в ведущих российских журналах и докладывались на многих международных и всероссийских конференциях. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание дис-

сертации 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. Работа оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
доктор физико-математических наук, профессор по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела,
главный научный сотрудник лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН

Роговой Анатолий Алексеевич

22 ноября 2023

Контактные данные:

тел.: +7(912)4866001, e-mail: rogovoy@icmm.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Адрес места работы:

614018, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН

Тел.: +7 912 486 60 01; e-mail: rogovoy@icmm.ru

Подпись Рогового Анатолия Алексеевича удостоверяю:

Специалист по кадрам Л.А. Ушакова

22 ноября 2023