

## 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»

Диссертационная работа посвящена разработке и применению методов расчета на устойчивость тонкостенных элементов конструкций, выполненных из сплавов с памятью формы (СПФ) в форме стержней и пластинок. Исследования поведения элементов СПФ при нагружении сжимающей нагрузкой показали, что применение классических методов анализа упругой устойчивости к элементам из СПФ может привести к кратному завышению значений критических параметров по сравнению с экспериментальными данными. Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что тема диссертации является **актуальной**.

Изложенные в диссертации методы анализа и полученные аналитические зависимости для определения критических параметров элементов из СПФ будут полезными для широкого круга специалистов-расчетчиков и могут быть рекомендованы для практического использования при проектировании элементов конструкций, выполненных из СПФ (актюаторов, предохранителей, манипуляторов, элементов робототехники, и т.д.), что определяет **практическую значимость** данной работы.

В диссертации, в отличие от большинства известных работ по устойчивости элементов из СПФ, где рассматриваются процессы активного изотермического нагружения этих элементов в режимах мартенситной неупругости или сверхупругости, акцент сделан на изучении неизотермической потери устойчивости, происходящей при термоупругих мартенситных фазовых переходах, происходящих под действием постоянных сжимающих нагрузок. Впервые исследовано влияние на явление потери устойчивости эффектов выделения и поглощения латентного тепла при термоупругих фазовых переходах в СПФ. Показано, что учет этого влияния существенно меняет значения критических параметров потери устойчивости элементов из СПФ.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объём диссертации составляет 96 страниц, включая 21 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 163 наименования.

Введение содержит изложение краткой истории открытия и исследования свойств СПФ, исследования явлений потери устойчивости в элементах из этих материалов. Там же

кратко описаны основные полученные в диссертации результаты, их актуальность, новизна, достоверность, методология проведенных исследований.

Первая глава содержит обзор термомеханических свойств СПФ, которые необходимо учитывать при анализе явления потери устойчивости элементов из этих материалов.

Во второй главе изложены основные положения и определяющие соотношения термомеханической модели поведения СПФ, которые использованы для решения задач устойчивости в диссертации. Приведены используемые при решении задач устойчивости значения материальных параметров и выражения для соответствующих материальных функций. Там же показано, каким образом эта модель описывает основные свойства СПФ при однородном напряженно-деформированном и температурном состоянии (накопление деформаций прямого термоупругого мартенситного превращения, эффект монотонной памяти формы, явление мартенситной неупругости).

Третья глава посвящена изложению основных концепций, постановок и допущений, в рамках которых исследовались задачи устойчивости элементов конструкций, выполненных из СПФ. Автором рассматривается несвязанная постановка, в рамках которой не учитывается дополнительный фазовый переход, происходящий при переходе в смежную форму квазистатического равновесия, и однократно связанная постановка, при которой этот дополнительный фазовый переход учитывается. Также сформулирована постановка задачи устойчивости для элемента из СПФ, в рамках которой учитывается не только этот дополнительный фазовый переход, но и связанное с этим фазовым переходом выделение или поглощение латентного тепла. Рассмотрен адиабатический случай, когда это латентное тепло не рассеивается в окружающую среду и не поглощается из этой среды. В той же главе изложены концепции фиксированной нагрузки, допускающая возможность не учитывать малые возмущения этой нагрузки, и противоположная концепция варьируемой нагрузки, в рамках которой такое возмущение учитывается.

В четвертой главе диссертации рассматриваются решение модельных задач устойчивости в рамках положений, описанных в третьей главе. Приводится аналитическое решение модельной задачи об устойчивости стойки Шенли на стержнях из СПФ при прямом и обратном термоупругом фазовом превращении в материале этих стержней. В рамках гипотез Бернулли-Эйлера получено аналитическое решение задач устойчивости стержня из СПФ, материал которого претерпевает прямое или обратное термоупругое фазовое превращение под действием сжимающих нагрузок. Приводится аналитическое решение задачи устойчивости квадратной и прямоугольной в плане пластинок из СПФ

при двустороннем обжатии постоянными внешними нагрузками. Построены границы зон устойчивости на плоскости внешних нагрузок и определено, как меняются эти границы при изменении постановки задачи устойчивости или концепции, в рамках которой решается эта задача. В случае задач о потере устойчивости при обратном термоупругом фазовом превращении исследовано влияние величины начальной фазово-структурной деформации, заданной перед обратным переходом, а также способа ее задания. Приведены результаты сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, обладающие качественным соответствием.

Анализ полученных решений позволяет сделать вывод, что решение задач устойчивости элементов из СПФ без учета специфических особенностей термомеханического поведения этих материалов может привести к кратному превышению значений критических параметров по сравнению с экспериментальными данными.

Сформулированные в диссертации положения и выводы получены в рамках классических подходов механики деформируемого твердого тела и прикладной математики и являются обоснованными. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с опубликованными экспериментальными данными других авторов, а также аналитическим характером полученных результатов.

По диссертации имеются замечания.

1. Одним из характерных функциональных свойств элементов конструкций выполненных из СПФ является возможность существенно деформироваться. Согласно диссертации «Начальные и конечные конфигурации моделируемых тел предполагаются мало отличающимися друг от друга». Такое ограничение, используемое в работе, существенно сужает область практического применения результатов. Не совсем уместно и уточнение, что «В данной работе используется Лагранжев подход к описанию сплошной среды», так как, при таком допущении Лагранжев и Эйлеров подходы к описанию движения среды совпадают.

2. В работе рассматривается несколько постановок, определяемых как несвязанная, однократно связанная, дважды связанная модели. В результатах, в частности, отмечается, что «...для стойки фиксированной длины существуют напряжения, при которых согласно дважды связанной постановке она не теряет устойчивость, а согласно однократно связанной теряет...». Оппонент считает, что в этом случае вносится ненужная сумятица и неоднозначность в процесс анализа устойчивости конкретных конструкций.

3. В работе отмечается, что «определяющие соотношения должны содержать параметры вида напряженно-деформированного состояния, которые в общем случае являются функциями от тензоров напряжений и деформаций». Однако остается неясным

как данное положение использовать при решении задач отличных от модельных, в которых параметр  $\mu_s$  аналогичный параметру Лоде при расчетах принимался равным « - 1 » и не изменялся.

4. В диссертации отмечается «Область допустимых напряжений выбирается таким образом, чтобы пластическое деформирование не имело места». Данная формулировка вступает в противоречие с известным принципом расчета по предельным состояниям, согласно которому в отличие от принципа расчета по допускаемым напряжениям возможно возникновение пластических деформаций.

5. В разделе 2.3.1. на страницах 26 и 27 отмечается: «Пластический предел текучести предполагается не зависящим от фазового состояния и равным 400 МПа». Известно, однако, что для никелида титана пластический (т.е. дислокационный) предел текучести в аустенитном состоянии в той области температур, в которой могут существовать оба эти состояния, несколько превосходит эту же величину, характерную для мартенситного состояния.

6. В используемых в диссертации формулах для описания трансляционного упрочнения (2.13) и (2.15) кинематический параметр упрочнения  $g$  не зависит от величины интенсивности напряжений. Таким образом, можно правильно описать только линейное трансляционное упрочнение. Однако, согласно экспериментальным данным, диаграммы обратного нагружения никелида титана в режиме мартенситной неупругости имеют нелинейный характер.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного мнения о работе.

#### **Общее заключение по работе.**

Диссертация представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к диссертационным работам, представляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

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

Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 7 из которых опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых в международных

базах Web of Science, Scopus и RSCI, 3 опубликованы в сборниках трудов международных конференций, включенных в международные базы Scopus, 1 в прочих изданиях.

Автореферат достаточно подробно и правильно отражает содержание диссертации.

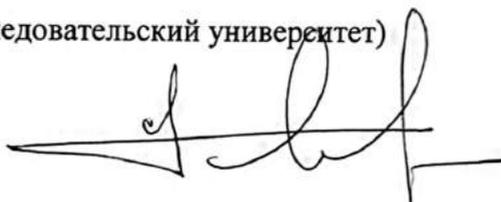
Соискатель **Думанский Станислав Александрович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой Компьютерные системы автоматизации производства ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)



Гаврюшин Сергей Сергеевич

«26» ноября 2023 г.