

О РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ БЕЗМОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

И. А. ИСАЧЕНКО, А. С. КУРБАТОВ, С. И. ЖАВОРОНОК

Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва

Одним из возможных эффективных вариантов практического применения сплавов с эффектом памяти формы (СПФ) являются демпферы и виброгасители различной конфигурации, в том числе тонкостенные оболочки-сильфоны [1], позволяющие использовать способность СПФ к диссипации механической энергии при фазово-структурных переходах [2]; другим ключевым направлением является создание на базе СПФ сосудистых стентов в форме цилиндрических сетчатых оболочек [3]. В то же время известно [4, 5], что не только тонкостенные, но и нетонкие конструктивные элементы, выполненные из СПФ, склонны к потере устойчивости тривиальной формы равновесного состояния в процессе фазового превращения между объемно-центрированной аустенитной фазой и гранецентрированной мартенситной фазой [4, 5] под действием механических нагрузок и изменяющихся во времени полей температуры либо структурного перехода между сдвойникованным или раздвойникованным мартенситом при нагружении [6]. Данный эффект исследован недостаточно; большинство работ посвящены прямолинейным стержням, для которых получены решения как в линейной одномерной, так и в нелинейной трехмерной постановках [7] на базе метода конечных элементов и феноменологической модели термоупругих фазово-структурных превращений [5]. Количество работ, посвященных устойчивости оболочек из СПФ, крайне незначительно [4, 8], более того, отсутствует и в должной мере разработанная теория оболочек с памятью (исключение составляют работы [4, 8] и исследования [9, 10], посвященные толстостенным оболочкам с памятью). Одной из трудностей при формулировке теории оболочек является необходимость обращения инкрементальных определяющих соотношений, которые связывают приращение девиатора деформации, порождаемой фазовым или структурным переходом, с приращениями напряжений и температуры [6]. С другой стороны, постановка задачи канонической теории тонких оболочек в усилиях и моментах, сводящаяся к уравнениям статики и совместности, позволяет избежать данного затруднения [11–13]. В частном случае безмоментного напряженного состояния уравнения статики интегрируются, и решение задачи о деформировании оболочки при фазовых и структурных переходах сводится к решению инкрементальных определяющих уравнений на шаге нагружения относительно приращений компонента тензора деформации [14, 15], при этом представляется возможным учесть некоторые ключевые особенности поведения сплавов с памятью, в частности, зависимость точной верхней грани деформаций фазового и структурного перехода и некоторых других материальных констант от параметра вида напряженного состояния [16–18]. Данный эффект в тонких оболочках, особенно в процессе структурного перехода, является ярко выраженным, и в большинстве случаев пренебречь разнотензионностью материала тонкой оболочки с памятью без недопустимой погрешности не представляется возможным. Ниже на базе модели [11–13] рассмотрены решения ряда задач о деформировании тонкостенных оболочек вращения с памятью, находящихся в безмоментном напряженном состоянии и претерпевающих фазовые либо структурные превращения, при различном сочетании нагрузок и форме образующей. Построены зависимости параметра фазового состава и деформаций, порожденных фазовыми переходами, от действующей нагрузки (внутреннего или внешнего давления, осевой силы) и температуры, а также деформаций структурного превращения от амплитуды давления. Приведен пример деформирования оболочки при неоднородном поле внутренних сил и неоднородном, достаточно гладком для существования безмоментного частного решения, поле температуры.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПРИМ РАН (№ 1023032300192-8-2.3.2).

Список литературы

1 Dynamic behavior of single-stage bellows of Titanium-Nickel shape memory alloy under cyclic loading / H. Semba [et al.] // International Journal of Modern Physics. – 2006. – Vol. 20, no. 25–27. – P. 3944–3949.

2 Calim, F. Numerical investigation on the effect of different shape memory alloys' material characteristics on energy dissipative cushions / F. Calim, A. Gullu, F. Yuksel // 3rd European Conference on Earthquake Engineering & Seismology. – 2022. – Bucharest, Romania. – P. 1598–1605.

- 3 Численно-экспериментальное исследование деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии / Д. В. Нуштаев [и др.] // Труды МАИ. – 2015. – № 82. – С. 9.
- 4 Сильченко, Л. Г. Устойчивость цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы при сжатии и кручении / Л. Г. Сильченко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 489–496.
- 5 Мовчан, А. А. Материалы с памятью формы как объект механики деформируемого твердого тела: экспериментальные исследования, определяющие соотношения, решение краевых задач / А. А. Мовчан, С. А. Казарина // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 105–116.
- 6 Устойчивость стержней из никелида титана, нагружаемых в режиме мартенситной неупругости / А. А. Мовчан [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. – № 3. – С. 72–80.
- 7 Nushtaev, D. V. Abnormal buckling of thin-walled bodies with shape memory effects under thermally induced phase transitions / D. V. Nushtaev, S. I. Zhavoronok // Advanced Structured Materials. – 2019. – Vol. 110. – P. 493–524.
- 8 Хусайнов, М. А. Анализ выпучивания сферических сегментов с памятью формы / М. А. Хусайнов, О. А. Малухина // Современные проблемы прочности : материалы 3-го Междунар. симпозиума им. В. А. Лихачева. – 1999. – Новгород, 1999. – С. 185–189.
- 9 Машихин, А. Е. Краевые задачи термомеханики для цилиндра и сферы из сплава с памятью формы / А. Е. Машихин, А. А. Мовчан // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 3. – С. 113–128.
- 10 Мовчан, А. А. Деформации кругового цилиндра из сплава с памятью формы при структурном переходе или прямым фазовым превращении / А. А. Мовчан, А. Е. Машихин // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 235–247.
- 11 Zhavoronok, S. I. Constitutive relations and compatibility equations for thin shape memory alloy shells / S. I. Zhavoronok // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2611. – P. 100004.
- 12 Zhavoronok, S. I. On the incremental constitutive relations and compatibility equations for thin shape memory alloy shells undergoing non-isothermal phase transitions / S. I. Zhavoronok // Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal. – 2023. – Vol. 14, is. 1. – P. 1–27.
- 13 Kurbatov, A. S. On the theory of shape memory membrane shells undergoing thermoelastic phase transitions / A. S. Kurbatov, S. I. Zhavoronok // Lobachevskii J. of Mathematics. – 2023. – Vol. 44, no.6. – P. 2326–2335.
- 14 Курбатов, А. С. О метода программной реализации решения некоторых задач безмоментной теории оболочек с памятью / А. С. Курбатов, И. А. Исаченко, С. И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : сб. тр. 12-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского, 15–17 ноября 2022 г. – М. : Сам Полиграфист, 2022. – С. 177–186.
- 15 Курбатов, А. С. Некоторые задачи безмоментной теории оболочек с эффектом памяти формы / А. С. Курбатов, С. И. Жаворонок, И. А. Исаченко // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : сб. тр. 13-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского. – М. : Сам Полиграфист, 2023. – С. 68–76.
- 16 Курбатов, А. С. О решении некоторых задач статики безмоментных оболочек с памятью формы при неизотермических фазовых переходах / А. С. Курбатов, И. А. Исаченко, С. И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 402–423.
- 17 Kurbatov, A. S. On the strain differential effect in the theory of shape memory membranes / A. S. Kurbatov, S. I. Zhavoronok // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 533. – P. 02024.
- 18 Kurbatov, A. S. On the incremental intrinsic equations for thin shape memory alloy shells undergoing austenite-to-martensite and martensite-to-austenite thermoelastic phase transitions / A. S. Kurbatov, S. I. Zhavoronok // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3030. – P. 080003.

УДК 539.375

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОПРОЧНОЙ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЯ ДЛЯ ТОРМОЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРОДОЛЬНОГО СДВИГА

Н. М. КАЛАНТАРЛЫ

Азербайджанская государственная академия физической культуры и спорта, г. Баку

Как известно, медленно растущую трещину можно затормозить засверловкой отверстия в ее вершине [1]. Задачи о влиянии кругового и эллиптического отверстия в кончике трещины на ее развитие рассматривались в работах [2, 3]. Целесообразно проводить засверловку отверстия оптимальной формы. Решение задачи оптимального проектирования по определению формы отверстия позволит на стадии проектирования выбрать оптимальные геометрические параметры тела, обеспечивающие эффективное торможение трещины. В [4] рассматривалась задача о влиянии отверстия с минимальной концентрацией напряжений на остановку трещины продольного сдвига. Представляет интерес определение равнопрочной формы отверстия для торможения медленно растущей трещины. В некоторых случаях для определения формы отверстий, на которых технологически неизбежная концентрация напряжений была бы сведена к минимуму, необходимо решать задачу теории упругости с неизвестной границей.