



Рисунок 1 – Упрощенная архитектура CNN-GRU модели

Модель начинается с входного слоя для изображений 256×256 пикселей, затем проходит через CNN сеть из четырех сверточных блоков с пулингом для извлечения пространственных признаков и уменьшения размерности до $16 \times 16 \times 256$, после чего данные преобразуются в последовательность и обрабатываются двумя слоями GRU для выявления временных зависимостей. Завершается классификацией Dense слоя с Dropout для предотвращения переобучения и выходным слоем с сигмоидальной активацией для предсказания наличия дефекта. На текущем этапе точность определения наличия дефекта составляет 90 %. Далее планируется увеличить этот показатель для более точного определения наличия или отсутствия дефектов с помощью улучшения модели. Среди преимуществ стоит отметить способность улавливать пространственно-временные зависимости, устойчивость к переобучению и шуму, а также гибкость и настраиваемость. Впоследствии имеется возможность адаптировать эту модель для исследования повреждений объектов железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, была рассмотрена гибридная CNN-GRU модель с точностью определения дефектов в 90 %, которая в перспективе может использоваться для исследований объектов железнодорожной инфраструктуры.

Список литературы

- 1 Холодилов, О. В. Использование нейронных сетей в неразрушающем контроле деталей подвижного состава / О. В. Холодилов, Д. В. Шкороедов // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомельский гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – Ч. 1. – С. 164–167.
- 2 An Edge AI System Based on FPGA Platform for Railway Fault Detection / W. Zhou, M. Li, X. Li [et al.] // arXiv preprint arXiv:2408.15245. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2408.15245> (date of access: 10.08.2025).
- 3 Combined CNN and RNN Neural Networks for GPR Detection of Railway Subgrade Diseases / W. Zhou, M. Li, X Li [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 12. – P. 5383. – DOI: 10.3390/s23125383.
- 4 Иванов, Д. А. Обзор подхода к обработке данных ультразвукового неразрушающего контроля с помощью машинного обучения / Д. А. Иванов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 6. – С. 29–33.

УДК 539.3

НЕКОТОРЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БЕЗМОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК ИЗ Ni–Ti СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

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

Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Усовершенствование технологий производства сплавов с эффектом памяти формы и изделий из них, в том числе аддитивных методов производства [1], дает возможность разрабатывать новые конструктивные элементы адаптивных систем, опирающиеся на эффект памяти. Одним из исследу-

емых прикладных направлений является создание «тепловых насосов» и систем охлаждения на базе эластокалорического эффекта [2, 3], связанного с выделением и поглощением латентного тепла фазового перехода [4]. Проведенные исследования показывают, что наибольший эффект теоретически достигается при использовании в качестве рабочего элемента регенератора тонкостенных труб из сплава с памятью [5], претерпевающего циклические фазовые превращения «аустенит-мартенсит-аустенит» при нагрузке-разгрузке (т. н. режим сверхупругости [4]). Однако существенной проблемой при практической разработке такой системы является склонность тонкостенных элементов из сплава с памятью к потере устойчивости в процессе фазового перехода при аномально низких амплитудах напряжений [6–8], оценить которые на базе упругого решения при минимальной величине модуля упругости невозможно. Эффект наблюдается как при прямом фазовом переходе аустенита в мартенсит [6, 8], так и при обратном превращении мартенсита в аустенит при наложении кинематических связей и развитии реактивных напряжений [7], а также в режиме мартенситной неупругости при структурном переходе сдвойникового мартенсита в раздвойникованный [9] и существенно зависит от латентного тепла фазового перехода [10]. Ключевым элементом решения задачи о потере устойчивости является определение докритического напряженно-деформированного состояния, для оболочек обычно являющегося безмоментным или близким к безмоментному. В общем случае безмоментное решение может быть рассмотрено как частное решение задачи моментной теории оболочек [11] и дополнено краевыми эффектами.

Предложенная ранее безмоментная теория выполненных из бинарного сплава с памятью тонких оболочек с произвольной гладкой срединной поверхностью [12, 13], основанная на редукации пространственной размерности трехмерной однократно связанной модели термоупругих фазовых и структурных переходов [4], дополнена зависимостью материальных констант и функций модели от параметра вида напряженного состояния [13] и латентного тепла фазового перехода. Учет влияния вида напряженного состояния позволяет описать эффект разносопротивляемости сплава с памятью формы [4, 14], весьма заметный в случае тонких оболочек [13], особенно при структурных превращениях в режиме мартенситной неупругости [15]. Разносопротивляемость тонкой оболочки с памятью, в каждой точке которой напряженное состояние является плоским, в силу отрицательных величин параметра вида напряженного состояния [16] при двухосном растяжении оболочки и, наоборот, положительных при двухосном сжатии проявляется в развитии существенно больших фазовых и структурных деформаций в состоянии сжатия, например, при нагружении оболочки внешним давлением [15] по сравнению с внутренним наддувом. Данный эффект может играть решающую роль при потере устойчивости равновесного состояния оболочки.

Получены некоторые новые решения задач для оболочек вращения различной гауссовой кривизны, демонстрирующие влияние вида напряженного состояния на амплитуду фазовых и структурных деформаций, а также решение для цилиндрической оболочки, претерпевающей сверхупругий фазовый переход при однопараметрическом осевом сжатии и наддуве с учетом латентного тепла фазового превращения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПРИМ РАН (регистрационный номер темы 121112200124-1).

Список литературы

- 1 **Van Humbeeck, J.** Additive Manufacturing of Shape Memory Alloys / J. Van Humbeeck // Shape Memory and Superelasticity. – 2018. – Vol. 4. – P. 309–312.
- 2 **Aaltio, I.** A Perspective on Elastocaloric Effect in Ti–Ni-Based Shape Memory Alloys / I. Aaltio, T. Fukuda, T. Kakeshita // Shape Memory and Superelasticity. – 2019. – Vol. 5. – P. 230–234.
- 3 **Mañosa, L.** Elastocaloric Effect in Shape-Memory Alloys / L. Mañosa, A. Planes // Shape Memory and Superelasticity. – 2024. – Vol. 10. – P. 89–98.
- 4 **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.
- 5 Development of a tube-based elastocaloric regenerator loaded in compression: A Review / S. Dall’Olio, Ž. Ahčin, A. Žerovnik [et. al] // Shape Memory and Superelasticity. – 2024. – Vol. 10. – P. 99–118.
- 6 **Сильченко, Л. Г.** Устойчивость цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы при сжатии и кручении / Л. Г. Сильченко, И. А. Мовчан // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 489–496.
- 7 **Малухина, О. А.** Устойчивость сферических сегментов с эффектом памяти формы / О. А. Малухина, М. А. Хусайнов // Вестник Новгородского гос. ун-та. – 2013. – Т. 2, № 75. – С. 103–104.
- 8 **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.