

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 247–255.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 247–255.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.2955`24`26

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255

EDN: SVYNEO

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

**Евгений Олегович Винокуров, Анатолий Анатольевич Клопотов,
Юрий Афанасьевич Абзаев**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования метаматериалов обусловлена потребностью в создании материалов с принципиально новыми свойствами, не встречающимися в природе. Способность проявлять аномальные механические характеристики открывает широкие возможности применения таких материалов в различных отраслях. Разработка метаматериалов на основе интеллектуальных сплавов, в частности никелида титана с эффектом памяти формы, позволяет создавать конструкции, сочетающие уникальную геометрию с функциональностью, что особенно востребовано при создании имплантатов нового поколения, энергопоглощающих систем и адаптивных механических элементов.

Цель. Исследование механических свойств конструкций, изготовленных из сплава на основе никелида титана с эффектом памяти формы, проявляющих положительные и отрицательные значения коэффициента Пуассона, как элементов конструкции метаматериала.

Материалы и методы. Эксперимент включал испытания на сжатие двух видов проволочных конструкций из сплава Ti-51 ат.% Ni.

Результаты. Установлено, что в зависимости от конструкции образцы демонстрировали как положительный, так и отрицательный коэффициент Пуассона. Деформационные кривые показали практически полное восстановление формы обеих конструкций после снятия нагрузки, что подтверждено экспериментально.

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, сплавы с эффектом памяти формы, конструкция из сплава на основе никелида титана, метаматериалы, ауксетики, сверхэластичность

Для цитирования: Винокуров Е.О., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А. Механические свойства метаматериалов и конструкций на основе сплавов с эффектом памяти формы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

ORIGINAL ARTICLE

**MECHANICAL PROPERTIES OF METAMATERIALS
AND STRUCTURES BASED ON SHAPE MEMORY ALLOYS**

Eugeny O. Vinokurov, Anatoly A. Klopotov, Yuri A. Abzaev
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of research on metamaterials is driven by the need to create materials with fundamentally new properties not found in nature. The ability to exhibit anomalous mechanical characteristics opens up opportunities for breakthrough applications in various industries. The development of metamaterials based on intelligent alloys, particularly titanium nickelide with a shape memory effect, enables the creation of structures that combine unique geometry with functionality, which is especially in demand for next-generation implants, energy-absorbing systems, and adaptive mechanical components.

Purpose: To investigate the mechanical properties of structures made of titanium nickelide-based alloy with a shape memory effect, exhibiting both positive and negative Poisson's ratio values, as elements of metamaterial structures.

Methodology: The experiment involved compression tests of two types of wire structures made of Ti-51 at. % Ni alloy.

Research findings: It was found that, depending on the structure, the samples exhibited both positive and negative Poisson's ratios. The deformation curves showed almost complete shape recovery of both structures after load removal, which was confirmed experimentally.

Keywords: Poisson's ratio, shape memory alloys, titanium nickelide-based alloy structure, metamaterials, auxetics, superelasticity

For citation: Vinokurov E.O., Klopotov A.A., Abzaev Yu.A. Mechanical Properties of Metamaterials and Structures Based on Shape Memory Alloys. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

Введение

Использование мартенситных превращений берет начало в древнем ремесленном опыте, когда кузнецы эмпирически открыли операцию закалки стали, придающую изделиям высокую твердость и режущую способность. Как объект научного исследования закалка стали стала изучаться в XIX в., главным образом в трудах русских и немецких металлургов. В честь одного из них – А. Мартенса – особое структурное состояние закаленной стали, определяющее ее свойства, было названо мартенситом, а соответствующий фазовый переход – мартенситным превращением [1].

Долгое время мартенситное превращение рассматривалось как специфический процесс, характерный лишь для системы «железо – углерод». Однако начиная с 1930-х гг. круг материалов, в которых обнаруживались мартенситные превращения, существенно расширился. К сталям добавились безуглеродистые сплавы железа, сплавы на основе меди, титана, циркония, щелочных и благородных металлов [2]. В настоящее время установлено, что мартенситные и мартенситоподобные превращения присущи не только металлам, но и другим классам кристаллических материалов, включая сегнетоэлектрики, оксиды, молекулярные кристаллы и даже биологические объекты (например, белки у микроорганизмов) [3, 4].

Особый практический интерес представляют превращения, протекающие по бездиффузионному механизму с кооперативной перестройкой кристаллической решетки, которые лежат в основе эффекта памяти формы (ЭПФ). Открытие ЭПФ относится к 1932 г., когда А. Оландер впервые наблюдал это явление в сплаве Au-Cd [5]. В 1950-х гг. эффект был обнаружен в медно-цинковых сплавах, а его механизм – обратимое термоупругое мартенситное превращение – был описан Г.В. Курдюмовым [6]. Наиболее широкое практическое применение нашел сплав на основе никелида титана (TiNi), сочетающий высокую обратимость деформации, коррозионную стойкость, прочность и биосовместимость [7, 20].

В последние десятилетия активно развивается направление, связанное с созданием метаматериалов – искусственных структур, свойства которых определяются не столько химическим составом, сколько их архитектурой [8, 9]. Комбинирование метаматериалов со сплавами, обладающими ЭПФ, открывает перспективы для проектирования конструкций с программируемыми механическими характеристиками, такими как отрицательный коэффициент Пуассона, регулируемая жесткость и адаптивность [10].

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы, обладающие уникальными, не встречающимися в природе свойствами. В основе работы этих материалов лежит использование физических явлений, которые проявляются за счет созданной специфической структуры со сложной архитектурой, а не за счет их химического состава [11–13]. Метаматериалы известны своими необычными механическими свойствами, такими как низкая плотность [14], отрицательный коэффициент Пуассона [15], отрицательная жесткость [15] и отрицательное тепловое расширение [16].

Коэффициент Пуассона ν относится к тем основным механическим параметрам материала, манипулирование которыми открывает широкие перспективы для создания современных материалов с улучшенными механическими характеристиками и многофункциональными возможностями. Основная масса материалов обладает положительными значениями коэффициента Пуассона. Например, при одноосном сжатии материал в продольном направлении уменьшается и расширяется в поперечном направлении. Все материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона ν называют ауксетичными. Для таких материалов характерно расширение в поперечном направлении при растяжении в осевом направлении [17].

Рассмотрим условия, при которых возможны значения $\nu < 0$. Согласно классическим соотношениям из теории упругости для изотропных тел [18], коэффициент Пуассона ν можно записать в виде

$$\nu = (3K - 2\mu)/(6K + 2\mu),$$

где μ , K – модули сдвига и объемной деформации соответственно, положительные для стабильных структур. Из этого уравнения следует, что отрицательные значения коэффициента Пуассона ν соответствуют условию, когда $\mu > 3/2K$. То есть когда модуль сдвига μ превышает модуль объемной деформации K более чем на 50 %. Эти значения коэффициента Пуассона ν в основном достигаются за счет архитектуры конструкции, а не за счет состава материала [19].

В исследовании [8] приведен обзор широко используемых механических метаматериалов и обсуждение их применения в области биомедицинской инженерии, в частности в инженерии костной ткани и сосудистых стентов. На рис. 1 наглядно показано, что сочетание реконфигурируемого и ауксетического поведения создает новую трубчатую структуру стента. Длина стента увеличивается при радиальном расширении, что позволяет охватить большее количество сосудов по сравнению с обычными стентами [8]. Данные рис. 1 наглядно демонстрируют, как материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона находят практическое применение.

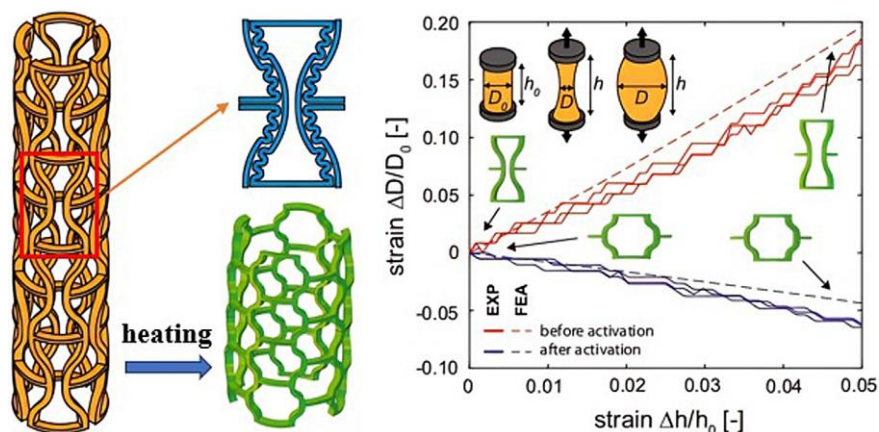


Рис. 1. Пример реконфигурируемого ауксетического сосудистого стента [8]

Fig. 1. An example of a reconfigurable auxetic vascular stent [8]

Для выполнения цели работы были изготовлены две проволочные конструкции из сплава Ti+51 ат.%Ni с диаметром проволоки 1 мм. Конструкция № 1 (рис. 2, а) содержит вогнутые проволочные элементы. При сжатии образца № 1 происходит продольное и поперечное сжатие конструкции. Эта конструкция обладает отрицательным значением коэффициента Пуассона ($\nu = -3,03$).

Конструкция № 2 (рис. 2, б) содержит проволочные элементы, выгнутые наружу относительно оси сжатия. При одноосной деформации сжатием наблюдается продольное сжатие конструкции с поперечным расширением элементов конструкции, и для этой конструкции $\nu = 0,71$.

Механические испытания по сжатию проволочных конструкций проведены на испытательной машине Instron № 3382.

Определение значений коэффициента Пуассона ν получено на основе измерений геометрических размеров конструкций до эксперимента, во время и после эксперимента.

В результате механических испытаний образцов № 1 и № 2 были получены деформационные кривые (рис. 3).

Из анализа деформационной кривой образца № 1 видно, что внешняя механическая сила (P) растет и достигает максимального значения при деформации $\varepsilon = 0,065$ (рис. 3, кривая 1, т. а), после которой деформация конструкции продолжается, но уже при меньших значениях приложенной механической

силы (рис. 3, кривая 1). Подобная зависимость в координатах « P от ϵ » наблюдается на деформационной кривой конструкции № 2 (рис. 3, кривая 2). На этой деформационной кривой максимум выражен менее остро, чем для образца № 1, и максимум на этой кривой приходится уже на значение деформации, равное 0,115 (рис. 3, кривая 2, т. б).

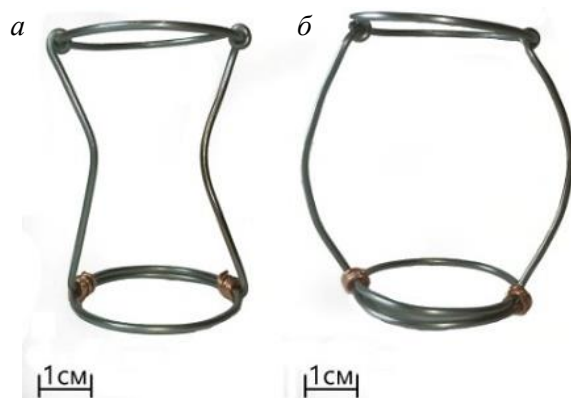


Рис. 2. Фотографии конструкций из сплава на основе никелида титана перед деформацией на сжатие:

a – конструкция № 1; b – конструкция № 2

Fig. 2. Photographs of titanium nickelide alloy structures before compressive strain:

a – structure 1; b – structure 2

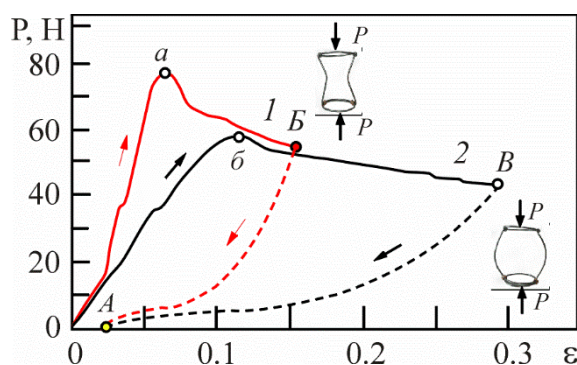


Рис. 3. Деформационные кривые на сжатие конструкций с отрицательным значением коэффициента Пуассона (конструкция № 1, кривая 1) и положительным (конструкция № 2, кривая 2), изготовленных из сплава Ti + 51 ат. % Ni

Fig. 3. Compressive strain curves for Ti + 51 at. % Ni alloy structures with negative Poisson's ratio (structure 1, curve 1) and positive (structure 2, curve 2)

Такой характер деформационных зависимостей исследуемых конструкций в координатах « P от ϵ » можно объяснить, основываясь на полученных деформационных кривых одноосного растяжения образцов сплава Ti + 51 ат. % Ni в координатах « σ от ϵ » (рис. 4) [7]. На начальной стадии, в зависимости $\sigma = f(\epsilon)$, происходит упругопластическая деформация до значений порядка 0,01 (рис. 4, участок $A-I$). По достижении значений напряжения около 400 МПа в процессе деформа-

ции под напряжением начинается мартенситный переход (МП), который проявляется в виде площадки в координатах « σ от ϵ » (рис. 4, участок 1–2) [7].

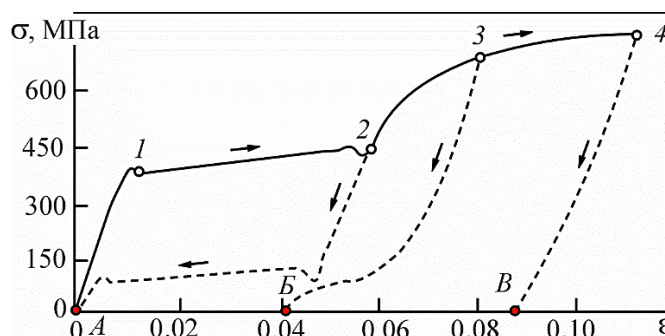


Рис. 4. Влияние степени деформации на сверхэластичное поведение сплава Ti + 51 ат. % Ni. В т. 2 и 3 нагрузка снималась. Штриховая кривая 2 – A соответствует полному возврату деформации после снятия нагрузки; штриховые кривые 3 – B, 4 – B соответствуют неполному возврату деформации после снятия нагрузки [7]

Fig. 4. Stress-strain curves for superelastic behavior of Ti + 51 at. % Ni alloy. The load is removed at points 2 and 3. Dashed curve 2 – A and curves 3 – B, 4 – C indicate to respectively complete and incomplete strain recovery after load removal [7]

На стадии МП после снятия внешней нагрузки происходит полный возврат деформации (рис. 4, кривая 2 – A). При дальнейшей деформации в образце в локальных местах материала достигается предел текучести (рис. 4, участок 2 – 3 – 4), и в деформацию вносит вклад пластическая составляющая. После снятия нагрузки на этой стадии возврат деформации происходит не полностью (рис. 4, кривые 3 – B, 4 – B). Для исследуемых конструкций после снятия нагрузки происходит почти полный возврат деформации (рис. 4, кривые B – A, B – A). Это явление мы наблюдали экспериментально. Конструкции после снятия нагрузки почти полностью восстанавливали форму.

Таким образом, в исследуемых конструкциях первая стадия деформации от 0 до максимума на кривых в координатах « P от ϵ » связана с упругопластическими деформациями в материале. На следующей стадии уменьшение нагрузки P после максимума на кривых « P от ϵ » связано с мартенситными переходами под напряжением.

Вывод

Установлено, что ключевым фактором, обеспечивающим функциональность конструкций, является сверхэластичный отклик материала основы, обусловленный обратимыми мартенситными превращениями. Полученные результаты открывают перспективы для разработки нового поколения функциональных материалов и конструкций, которые можно использовать в качестве биомедицинских имплантатов с адаптивными механическими характеристиками [8, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартенситные превращения / под ред. В.Д. Садовского. Свердловск : УФ АН СССР, 1980. 215 с.

2. Горячев О.А., Утевский Л.М. Мартенситные превращения в сплавах железа. Москва : Металлургия. 1986. 184 с.
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why It Forms and How It Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford : Oxford University Press, 2003. 196 p. DOI: 10.1093/oso/9780198509349.001.0001
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys // Journal of the American Chemical Society. 1932. V. 54. P. 3819–3833. DOI: 10.1021/ja01349a004
6. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали. Москва : Metallurgizdat, 1960. 255 с.
7. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Клопотов А.А. Никелид титана: медицинский материал нового поколения. Томск : МИЦ, 2006. 296 с.
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A review on the mechanical metamaterials and their applications in the field of biomedical engineering // Frontiers in Materials. 2023. V. 10. P. 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942. EDN: NDLKSF
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic mechanical metamaterials // RSC Advances. 2017. V. 7. P. 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E. EDN: YEALQG
10. Tang Y., Yin J. Design of cut unit geometry in hierarchical kirigami-based auxetic metamaterials for high stretchability and compressibility // Extreme Mechanics Letters. 2017. V. 12. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Шилько С.В. Аномально упругие материалы как компоненты адаптивных систем // Перспективные материалы. Витебск : УО ВГТУ, 2009. С. 419–448.
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue properties of 3D-printed polymeric metamaterials: A review // Smart Materials in Manufacturing. 2025. V. 3. P. 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-nanostructured mechanical metamaterials // Advanced materials. 2012. V. 24. I. 36. P. 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644. EDN: RMGSZB
14. Zheng X., et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials // Science. 2014. V. 344. № 6190. P. 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A., et al. Double-negative mechanical metamaterials displaying simultaneous negative stiffness and negative Poisson's ratio properties // Advanced materials. 2016. V. 28 (46). P. 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., et al. Light weight mechanical metamaterials with tunable negative thermal expansion // Physical Review Letters. 2016. V. 117. P. 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., et al. Auxetic fixation devices can achieve superior pullout performances compared to standard fixation concepts // Smart materials and Structures. 2024. V. 33. № 6. P. 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94. EDN: WLLMUY
18. Love A.E.H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., et al. Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials // Materials Horizons. 2018. V. 5. № 1. P. 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Сысолятин П.Г., Темерханов Ф.Т., Пушкарев В.П., Клопотов А.А. и др. Сверхэластичные имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии, ортопедии и нейрохирургии. Томск : ТГУ, 1995. 224 с.

REFERENCES

1. Sadovsky V.D. (Ed.) Martensitic Transformations. Sverdlovsk: UF AN SSSR, 1980. 215 p. (In Russian)
2. Goryachev O.A., Utevsky L.M. Martensitic Transformations in Iron Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1986. 184 p. (In Russian)
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why it Forms and How it Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford: Oxford University Press, 2003. 196 p.
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. *Journal of the American Chemical Society*. 1932; 54: 3819–3833.

6. Kurdjumov G.V. Phenomena of Steel Hardening and Tempering. Moscow: Metallurgizdat, 1960. 255 p. (In Russian)
7. Gunther V.E., Khodorenko V.N., Klopotov A.A. Titanium Nickelide: Medical Material of New Generation. Tomsk: MIC, 2006. 296 p. (In Russian)
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A Review on the Mechanical Metamaterials and their Applications in the Field of Biomedical Engineering. *Frontiers in Materials*. 2023; 10: 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic Mechanical Metamaterials. *RSC Advances*. 2017; 7: 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E
10. Tang Y., Yin J. Design Of Cut Unit Geometry in Hierarchical Kirigami-Based Auxetic Metamaterials for High Stretchability and Compressibility. *Extreme Mechanics Letters*. 2017; 12: 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Shilko S.V. Anomalous Elastic Materials as Components of Adaptive Systems. In: *Advanced Materials*. Vitebsk, 2009. Pp. 419–448. (In Russian)
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue Properties of 3D-printed Polymeric Metamaterials: A Review. *Smart Materials in Manufacturing*. 2025; 3: 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-Nanostructured Mechanical Metamaterials. *Advanced Materials*. 2012; 24 (36): 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644
14. Zheng X., Lee H., Weisgraber T.H., Shusteff M., DeOtte J., Duoss E.B., et al. Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials. *Science*. 2014; 344 (6190): 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A.M., Alderson K.L., Alderson A., Scarpa F. Double-Negative Mechanical Metamaterials Displaying Simultaneous Negative Stiffness and Negative Poisson's Ratio Properties. *Advanced Materials*. 2016; 28 (46): 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., Jackson J.A., Ge Q., Hopkins J.B., Spadaccini C.M., Fang N.X. Lightweight Mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion. *Physical Review Letters*. 2016; 117: 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., Gleadall A., Al Obaidi H., Wang K., Abo Saleh K., Kormakov S., et al. Auxetic Fixation Devices can Achieve Superior Pullout Performances Compared to Standard Fixation Concepts. *Smart Materials and Structures*. 2024; 33 (6): 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94
18. Love A.E.H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., Lietaert K., Pouran B., Meynen A., Van Grunsven W., Weinans H., et al. Rationally Designed Meta-Implants: A Combination of Auxetic and Conventional Meta-Biomaterials. *Materials Horizons*. 2018; 5 (1) 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Sysolyatin P.G., Temerkhanov F.T., Pushkarev V.P., Klopotov A.A., et al. Superelastic Shape Memory Implants in Maxillofacial Surgery, Orthopedics and Neurosurgery. Tomsk: TSU, 1995. 224 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Винокуров Евгений Олегович, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, eugenevinockuroff@yandex.ru

Клопотов Анатолий Анатольевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, klopotova@tsuab.ru

Абзаев Юрий Афанасьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, abzaev@tsuab.ru

Authors Details

Evgeny O. Vinokurov, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, eugenevinockuroff@yandex.ru

Anatoly A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, klopotovaa@tsuab.ru

Yury A. Abzaev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, abzaev@tsuab.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.09.2025
Одобрена после рецензирования 30.09.2025
Принята к публикации 30.09.2025

Submitted for publication 25.09.2025
Approved after review 30.09.2025
Accepted for publication 30.09.2025