

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.913

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.007

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Al_2Ni_3 , АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПРИ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Устина Ильдусовна Янковская¹, Михаил Дмитриевич Старостенков²,
Александр Сергеевич Нарасеев³, Ольга Геннадьевна Комиссаренко⁴,
Павел Васильевич Захаров⁵

^{1, 3, 4, 5} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д.29 литера Б, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, г. Санкт-Петербург, 195251.

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, проспект Ленина, д. 46, г. Барнаул, 656038.

¹ zalaevau@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6434-0747>)

² genphys@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>)

³ narseev.as@mail.ru

⁴ komissarenko.og@edu.spbstu.ru

⁵ zaharov_pv@spbstu.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>)

Аннотация. Легкие интерметаллические соединения, такие как алюминиды никеля, сочетают в себе высокую теплопроводность и механическую стабильность, особенно при высоких температурах. Данные интерметаллиды нашли широкое применение в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Тем не менее, алюминиды никеля имеют низкую вязкость разрушения и не высокую пластичность. В данном исследовании в качестве армирующего элемента для интерметаллических матриц предлагаются углеродные нанотрубки (УНТ) из-за их высоких механических свойств. Исследованы влияние температуры окружающей среды и объемной доли УНТ в композите на механические свойства интерметаллида Al_2Ni_3 . В рамках настоящей работы методом молекулярной динамики изучено изменение модуля Юнга и предела прочности композита для температур от 300 до 1700 К и объемной доли УНТ от 2% до 6%. Получено, что при высоких температурах у композитов, содержащих УНТ более 2% Модуль Юнга увеличивается на 28%. Однако полученные результаты показывают, что предел прочности интерметаллида Al_2Ni_3 снижается при внедрении УНТ. Существенное снижение отмечается при внедрении 1-2 УНТ, однако, для модели с 4 УНТ получено небольшое улучшение данного показателя на высоких температурах.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, армирование, моделирование, механические свойства, метод молекулярной динамики, интерметаллид, предел прочности, одноосная нагрузка, композит, LAMMPS

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-20038 (<https://rscf.ru/project/24-22-20038/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20038.

Для цитирования: Янковская У.И., Старостенков М.Д., Нарасеев А.С., Комиссаренко О.Г., Захаров П.В. Механические свойства композита Al_2Ni_3 , армированного углеродными нанотрубками, при одноосной деформации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 2. С. 194-200. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.007.

Original article

MECHANICAL PROPERTIES OF Al_2Ni_3 COMPOSITE REINFORCED WITH CARBON NANOTUBES UNDER UNIAXIAL DEFORMATION

Ustina I. Yankovskaya¹, Michael D. Starostenkov², Alexander S. Naraseev³,
Olga G. Komissarenko⁴, Pavel V. Zakharov⁵

^{1, 3, 4, 5} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Saint Petersburg, Russia

² Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656038, Barnaul, Russia

¹ zalaevau@gmail.com (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6434-0747>)

² genphys@mail.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>)

³ narseev.as@mail.ru

⁴ komissarenko.og@edu.spbstu.ru

⁵ zaharov_pv@spbstu.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>)

Abstract. Lightweight intermetallic compounds such as nickel aluminides combine high thermal conductivity and mechanical stability, especially at high temperatures. These intermetallic compounds have found wide application in the aerospace and automotive industries. However, nickel aluminides have low fracture toughness and low ductility. In this study, carbon nanotubes (CNTs) are proposed as a reinforcing element for intermetallic matrices due to their high mechanical properties. The effects of ambient temperature and CNT volume fraction in the composite on the mechanical properties of the Al_2Ni_3 intermetallic compound are investigated. In the present work, the change in the Young's modulus and the tensile strength of the composite for temperatures from 300 to 1700 K and a volume fraction of CNTs from 2% to 6% was studied using the molecular dynamics method. It was found that at high temperatures, the Young's modulus of composites containing more than 2% CNTs increases by 28%. However, the obtained results show that the tensile strength of the Al_2Ni_3 intermetallic compound decreases with the introduction of CNTs. A significant reduction is observed with the introduction of 1-2 CNTs, however, for the model with 4 CNTs, a slight improvement in this indicator was obtained at high temperatures.

Keywords: carbon nanotubes, reinforcement, modeling, mechanical properties, molecular dynamics method, intermetallic, tensile strength, uniaxial load, composite, LAMMPS.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-22-20038 (<https://rscf.ru/project/24-22-20038/>) and the St. Petersburg Science Foundation grant No. 24-22-20038.

For citation: Yankovskaya U.I., Starostenkov M.D., Naraseev A.S., Komissarenko O.G. & Zakharov P.V. (2025). Mechanical properties of Al_2Ni_3 composites reinforced with carbon nanotubes under uniaxial deformation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(2), 194-200. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.007.

Введение

Интерметаллиды семейства Al-Ni обладают высокой твердостью, износостойкостью и прочностью по сравнению с чистым алюминием и никелем [1, 2] из-за их меньшего веса, более низкой стоимости и высокой прочности при высоких температурах. Эти свойства данных композитов привлекли внимание аэрокосмической и автомобильной промышленности.

Благодаря свойствам углеродных нанотрубок (УНТ), таким как модуль Юнга 1 ТПа и предел прочности на разрыв 150 ГПа [3], они нашли широкое применение в качестве армирующего материала в полимерных [4], керамических [5] металлических [6] и интерметаллических матрицах [7].

Однако основное внимание в научных исследованиях NiAl уделяется получению оптимального состава NiAl, который демонстрирует сниженную пластичность и вязкость разрушения при комнатной температуре, сохраняя при этом свои уникальные интерметаллические свойства, такие как низкая плотность, термическая стабильность, высокая теплопроводность и стойкость к окислению [8]. Несколько исследователей, таких как у Амери и соавторов [9], включили УНТ в матрицы алюминиды никеля для улучшения механических свойств с помощью механического легирования. Результаты показывают значения микротвердости 5,6 ГПа с соответствующим увеличением вязкости разрушения. В работа [10] приведено исследование о влиянии углеродных нанотрубок в качестве армирующего элемента, в результате пока-

зано, что добавление УНТ может привести к более высокому упрочнению композита на основе металлической матрицы. Авторами [11] показано, что внедрение 2% УНТ в композит Ni_3Al увеличивает модуль Юнга на 42%, а предел прочности более, чем на 50%. Так же в данной работе изучено влияние углов ориентации углеродных нанотрубок на механические свойства интерметаллида Ni_3Al . Показано, что ориентированные вдоль приложения нагрузки УНТ дают наибольший армирующий эффект.

В рамках данного исследования изучено влияние объемной доли УНТ на механические свойства интерметаллида Al_2Ni_3 при различных температурах методом молекулярной динамики. Данный метод широко используется для изучения поведения и свойств материалов на молекулярном уровне при различных условиях,

таких как температуры, давления и химические воздействия [12, 13].

Материалы и методы

Имитационная модель. В данной работе для выполнения моделирования методом молекулярной динамики использовался крупномасштабный атомно-молекулярный параллельный симулятор (LAMMPS) [14]. Визуализация результатов осуществлялась с помощью программного обеспечения OVITO [15]. На рисунке 1 приведена модель интерметаллида Al_2Ni_3 , которая содержит внедренные углеродные нанотрубки типа «зигзаг» с хиральными индексами (8, 0).

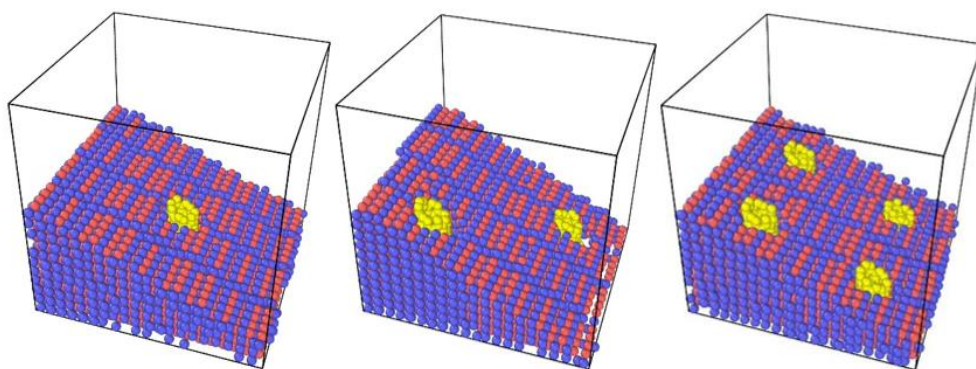


Рис.1. Модель Al_2Ni_3 с внедренными углеродными нанотрубками «типа зигзаг», хиральными индексами (8, 0).

Модель имеет 4 вариации: чистый Al_2Ni_3 , с одной (1,02 % об.д.), двумя (2,02 % об.д.) и четырьмя (6 % об.д.) УНТ. Сначала была создана модель металлической матрицы Al_2Ni_3 , затем были вырезаны отверстия по всей высоте кристалла и в центр внедрены УНТ. Число моделируемых атомов для изучаемых моделей составляло от 15100 до 15800 атомов. Диаметр отверстия подбирался исходя из диаметра углеродной нанотрубки, для уравнивания сил Ван-дер-Ваальса, к диаметру нанотрубки прибавлялись 3 Å. Постоянная одноосная нагрузка прикладывалась вдоль направления [001], угол ориентации УНТ по отношению к прикладываемой нагрузке составлял

0°. Вдоль всех направлений использовались периодические граничные условия.

Выбор потенциалов взаимодействия. Выбор потенциала межатомного взаимодействия играет важную роль в точности результатов моделирования. В данном случае полная энергия интерметаллида, армированного углеродными нанотрубками, состоит из трех частей [12]:

$$E_{total} = E_{M-M} + E_{C-C} + E_{M-C}$$

В данном исследовании использовано три межатомных взаимодействия:

- (1) Взаимодействие между атомами углерода в УНТ (CC) описывался с помощью потенциала AIREBO [16].
- (2) Взаимодействие между атомами металлической матрицы (Ni-Al) описывался разработан-

ным Мишиным потенциалом метода внедренных атомов (EAM) [17].

(3) Взаимодействие между углеродом и атомами металлической матрицы (C-Ni и C-Al) описывается с помощью потенциала Леннарда-Джонса [18].

Результаты и обсуждение

Как известно, температурные колебания являются важным фактором, существенно влияющим на изменения прочностных характеристик материала.

Для рассматриваемого интерметаллида Al_2Ni_3 были рассчитаны кривые напряжение/деформация для чистого кристалла и композитов Al_2Ni_3 , армированных различным количеством УНТ, при одноосном растягивающей нагрузке. Результаты полученных измерений при температурах от 300 К до 1700 К представлены на рисунке 2.

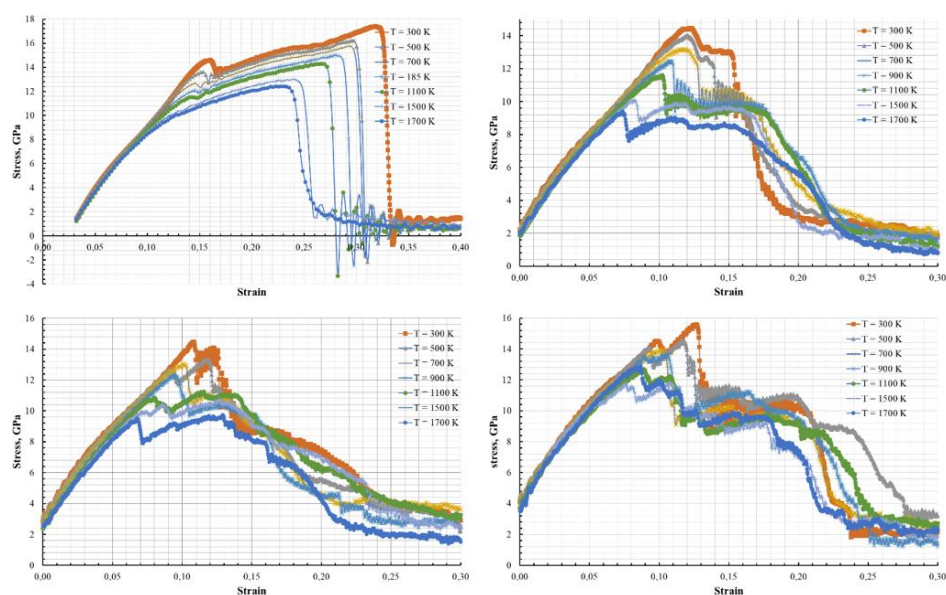


Рис. 2. Кривые напряжения-деформации для композитов Al_2Ni_3 и Al_2Ni_3 -CNT при различных температурах.

Fig. 2. Stress-strain curves for Al_2Ni_3 and Al_2Ni_3 -CNT composites at different temperatures.

При растяжении чистого Al_2Ni_3 в области $0,13 < \epsilon < 0,15$ на кривой появляется скачок напряжения, свидетельствующий о начале пластической деформации. Для композитов с 2 и 4 УНТ это диапазон смещается в область $0,07 < \epsilon < 0,1$. Первоначальное небольшое падение напряжения означает, что вся структура превзошла предел текучести. Это снижение напряжения соответствует фазе текучести интерметаллида Al_2Ni_3 , которая возникает из-за деформации растяжения определенных атомов, окружающих УНТ.

Предел прочности определялся как наибольшее значение напряжения на кривых представленных на рисунке 2. Падение предела прочности с внедрением УНТ при растягивающей нагрузке обусловлено

наличием дополнительных напряжений в кристалле, возникающих в месте контакта металла и нанотрубки, что приводит к появлению дислокаций при меньших деформациях. Но определяющим фактором является методика эксперимента, т.е. периодические граничные условия, это не обеспечивает сохранение объема, и при растяжении свободный объем локализуется вблизи нанотрубок, уменьшает их роль как армирующего элемента, ослабляя композит. Модуль упругости рассчитывался путем регрессионного анализа. Результаты для всех моделей композита Al_2Ni_3 приведены на рисунке 3.

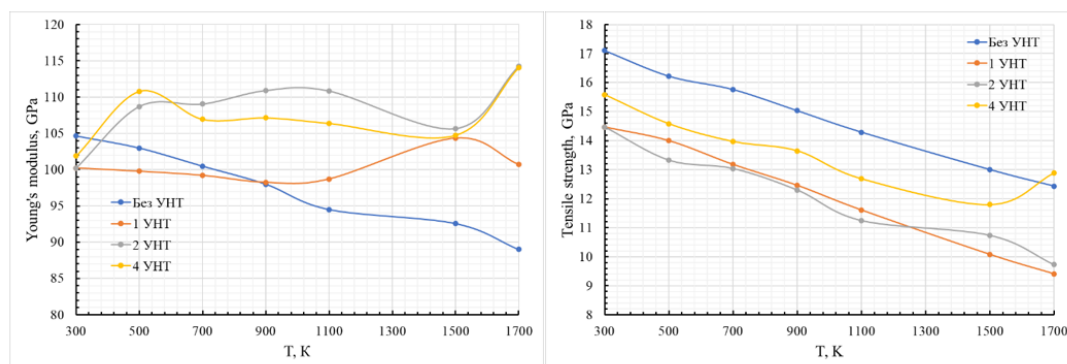


Рис. 3. Механические свойства интерметаллида Al_2Ni_3 без УНТ и с различным количеством УНТ в диапазоне температур 300К-1700К: а) модуль Юнга; б) предел прочности.

Fig. 3. Mechanical properties of the intermetallic compound Al_2Ni_3 without CNTs and with different amounts of CNTs in the temperature range of 300K-1700K: a) Young's modulus; b) tensile strength.

Отмечается, что внедренные УНТ повлияли на увеличение модуля упругости: для модели с одной УНТ видим повышения на 11%, для модели с четырьмя УНТ на 28%. С увеличением температуры модуль Юнга имеет тенденцию к уменьшению, хотя для некоторых отдельных точек фиксировался рост в композите. Также стоит отметить, что температура оказывает меньшее влияние на модуль Юнга в композите Al_2Ni_3 -УНТ, чем в чистом интерметаллиде. Для такой механической характеристики как предел прочности отмечается снижение значение с увеличением температуры. Так же отмечается, что данная характеристика для всех моделей с УНТ имеет значение ниже, чем в модели чистого кристалла. Модели с 1 и 2 УНТ имеют близкие значения, на 5% выше значения имеет модель с 4 УНТ.

Выводы

Методом молекулярной динамики были изучены механические характеристики интерметаллида Al_2Ni_3 , армированного углеродными нанотрубками, при одноосной нагрузке при температурах 300К – 1700 К. Полученные результаты показали, что температура имеет существенное влияние на изменения изучаемых характеристик при растягивающей нагрузке. При низких температурах (300 К) влияние армирования УНТ не отмечается. При высоких

температурах (> 300 К) отмечали повышение модуля упругости по сравнению с чистым кристаллом Al_2Ni_3 . Наибольший эффект достигается для модели с двумя УНТ. Что касается предела прочности, то внедренные УНТ оказали отрицательное влияние на композит, как при низких, так и при высоких температурах. Определяющим фактором является формирование дефектных структур в виде пор вблизи контакта металла и УНТ ввиду методики эксперимента с периодическими граничными условиями, накладываемыми на модель. Также важную роль играет слоистая структура металлической матрицы для данных направлений нагружения.

Список литературы

1. Yamanoglu Y., Karakulak E., Zeren M., Koc F.G. Effect of Nickel on Microstructure and Wear Behaviour of Pure Aluminium Against Steel and Alumina Counterfaces // International Journal of Cast Metal Research. 2013. V. 26. P. 289-295.
2. Zhang Z., Akiyama E., Watanebe Y., Katada Y., Tsuzaki K. Effect of A-Al/Al₃Ni Microstructure on The Corrosion Behaviour of Al-5.4 wt% Ni Alloy Fabricated by Equal-Channel Angular Pressing // Corrosion Science. 2007. V. 49. P. 2962-2972.
3. Thostenson E.T., Ren Z., Chou T.W. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review // Compos. Sci. Technol. 2001. V. 61. P. 1899-1912.
4. Haggennmueller R., Gommans H., Rinzier A., Fischer J.E., Winey K. Aligned single-wall carbon nanotubes in composites by melt processing methods // Chem. Phys. Lett. 2000. V. 330. P. 219-225.

5. Peigney A., Flahaut E., Laurent C., Chastel F., Rousset A. Aligned carbon nanotubes in ceramic-matrix nanocomposites prepared by high-temperature extrusion // *Chem. Phys. Lett.* 2002. V. 352. P. 20–25.

6. Suarez S., Lasserre F., Mücklich F. Mechanical properties of MWNT/Ni bulk composites: influence of the microstructural refinement on the hardness // *Mater. Sci. Eng., A*. 2013. V. 587. P. 381–386.

7. Pang L.-X., Sun K.-N., Ren S., Sun C., Fan R.-H., Lu Z.-H. Fabrication and microstructure of Fe3Al matrix composite reinforced by carbon nanotube // *Mater. Sci. Eng., A*. 2007. V. 447. P. 146–149.

8. Bochenek K., Basista M. Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications // *Prog. Aersp. Sci.* 2015. V. 79. P. 136–146.

9. Ameri S., Sadeghian Z., Kazeminezhad I. Effect of CNT addition approach on the microstructure and properties of NiAl-CNT nanocomposites produced by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Intermetallics*. 2016. V. 76. P. 41–48.

10. Esawi A., Morsi K., Sayed A., Taher M., Lanka S. Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites // *Compos. Sci. Technol.* 2010. V. 70. P. 2237–2241.

11. Янковская У.И., Захаров П.В. Молекулярно-динамическое моделирование одноосной нагрузки на композит при различных углах ориентации УНТ // *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях*. 2024. с. 38-39.

12. Янковская У.И., Старостенков М.Д., Медведев Н.Н., Захаров П.В. Методы моделирования композитов, армированных углеродными нанотрубками: обзор и перспективы // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2024. т. 16. № 5. с. 1143-1162.

13. Yankovskaya U.I., Starostenkov M.D., Markidonov A.V., Kazakov A.M., Korznikova E.A., Zakharov P.V. Enhanced mechanical properties of Ni3Al composites reinforced with single-walled and multi-walled carbon nanotubes: An atomistic modeling study // *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*. 2024. V. 09, No. 02n03. pp. 99-105.

14. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics // *J. Comput. Phys.* 1995. V. 117. P. 1–19

15. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool // *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2010. V. 18. P. 015012.

16. Stuart S. J., Tutein A. B., Harrison J. A. A reactive potential for hydrocarbons with intermo-

lecular interactions // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 112. P. 6472–6486.

17. Pun G. P., Mishin Y. Development of an interatomic potential for the Ni-Al system // *Phil. Mag.* 2009. V. 89. P. 34-36.

18. Zhang Ch., Lu Ch., Pei L., Li J., Wang R. Molecular Dynamics Simulation of the Negative Poisson's Ratio in Graphene/Cu Nanolayered Composites: Implications for Scaffold Design and Tele-communication Cables // *ACS Appl. Nano Mater.* 2020. V. 3, No. 1. P. 496–505.

Информация об авторах

У.И. Янковская – аспирант Алтайского государственного технического университета, старший преподаватель кафедры высшей математики Санкт-Петербургского политехнического университета.

М.Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Алтайского государственного технического университета

А.С. Нарсеев – лаборант-исследователь кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета.

О.Г. Комиссаренко – студент института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета.

П.В. Захаров – доктор физико-математических наук, директор института физики и математики Санкт-Петербургского политехнического университета.

References

1. Yamanoglu, Y., Karakulak, E., Zeren, M., Koc, F.G. (2013). Effect of Nickel on Microstructure and Wear Behaviour of Pure Aluminium Against Steel and Alumina Counterfaces. *International Journal of Cast Metal Research*, 26, 289-295.

2. Zhang, Z., Akiyama, E., Watanebe, Y., Katada, Y., Tsuzaki, K. (2007). Effect of Al-Al/Al3Ni Microstructure on The Corrosion Behaviour of Al–5.4 wt% Ni Alloy Fabricated by Equal-Channel Angular Pressing. *Corrosion Science*, 49, 2962-2972.

3. Thostenson, E.T., Ren, Z., Chou, T.W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Compos. Sci. Technol.* 61, 1899–1912.

4. Haggemueller, R., Gommans, H., Rinzler, A., Fischer, J.E., Winey, K. (2000). Aligned single-wall carbon nanotubes in composites by melt processing methods. *Chem. Phys. Lett.* 330, 219–225.

5. Peigney, A., Flahaut, E., Laurent, C., Chastel, F., Rousset, A. (2002). Aligned carbon nanotubes in ceramic-matrix nanocomposites prepared by high-temperature extrusion. *Chem. Phys. Lett.*, 352, 20–25.
6. Suarez, S., Lasserre, F., Mücklich, F. (2013). Mechanical properties of MWNT/Ni bulk composites: influence of the microstructural refinement on the hardness. *Mater. Sci. Eng., A*, 587, 381–386.
7. Pang, L.-X., Sun, K.-N., Ren, S., Sun, C., Fan, R.-H., Lu, Z.-H. (2007). Fabrication and microstructure of Fe₃Al matrix composite reinforced by carbon nanotube. *Mater. Sci. Eng., A*, 447, 146–149.
8. Bochenek, K., Basista, M. (2015). Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications. *Prog. Aerosp. Sci.*, 79, 136–146.
9. Ameri, S., Sadeghian, Z., Kazeminezhad, I. (2016). Effect of CNT addition approach on the microstructure and properties of NiAl-CNT nanocomposites produced by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Intermetallics*, 76, 41–48.
10. Esawi, A., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M., Lanka, S. (2010). Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites. *Compos. Sci. Technol.*, 70, 2237–2241.
11. Yankovskaya, U.I., Zakharov, P.V. (2024). Molecular dynamics modeling of uniaxial loading on a composite at different orientation angles of CNTs. *Measurements, automation and modeling in industry and scientific research*, 38–39.
12. Yankovskaya, U.I., Starostenkov, M.D., Medvedev, N.N., Zakharov, P.V. (2024). Methods for modeling carbon nanotube-reinforced composites: review and prospects. *Computer Research and Modeling*, 16(5), 1143–1162.
13. Yankovskaya, U.I., Starostenkov, M.D., Markidonov, A.V., Kazakov, A.M., Korznikova, E.A., Zakharov, P.V. (2024). Enhanced mechanical properties of Ni₃Al composites reinforced with single-walled and multi-walled carbon nanotubes: An atomistic modeling study. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 09(02n03), 99–105.
14. Plimpton, S. (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *J. Comput. Phys.*, 117, 1–19.
15. Stukowski, A. (2010). Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 18, 015012.
16. Stuart, S. J., Tutein, A. B., Harrison, J. A. (2000). A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions. *J. Chem. Phys.*, 112, 6472–6486.
17. Pun, G. P., Mishin Y. (2009). Development of an interatomic potential for the Ni-Al system. *Phil. Mag.*, 89, 34–36.
18. Zhang, Ch., Lu, Ch., Pei, L., Li, J., Wang, R. (2020). Molecular Dynamics Simulation of the Negative Poisson's Ratio in Graphene/Cu Nanolayered Composites: Implications for Scaffold Design and Telecommunication Cables. *ACS Appl. Nano Mater.*, 3(1), 496–505.

About the authors

U.I. Yankovskaya – postgraduate student of the Altai State Technical University, senior lecturer of the Department of Higher Mathematics of the St. Petersburg Polytechnic University.

M.D. Starostenkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Altai State Technical University.

A.S. Narseyev – laboratory assistant-researcher of the Department of Physics of the St. Petersburg Polytechnic University.

O.G. Komissarenko – student of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport of the St. Petersburg Polytechnic University.

P.V. Zakharov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Physics and Mathematics of the St. Petersburg Polytechnic University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was received by the editorial board on 16 Apr. 2025; approved after reviewing 22 Apr. 2025; accepted for publication 05 May 2025.