

Информация о номере

Название журнала: Физическая мезомеханика

ISSN: 1683-805X

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Место издания: Томск, Россия

Адрес: Академический пр., 2/4, Томск, 634055, Россия

Сокращенное название: Физ. мезомех.

2025, Том 28, № 5, с. 5–172.

Дата выпуска: 31 октября 2025

1. Научная статья

Сведения об авторах

Лукашов Родион Витальевич, инж.-иссл., СПбГУ, st069218@student.spbu.ru,

Груздков Алексей Андреевич, д.ф.-м.н., проф., зав. каф., СПбГТИ(ТУ), gruzdkov@mail.ru,

Волков Григорий Александрович, д.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, g.volkov@spbu.ru,

Остропико Евгений Сергеевич, к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, e.ostropiko@spbu.ru,

Казаринов Никита Андреевич, д.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ, nkazarinov@gmail.com,

Валиев Роман Русланович, к.т.н., с.н.с., УУНТ, rovaliev@yahoo.com,

Петров Юрий Викторович, д.ф.-м.н., ак. РАН, проф., СПбГУ, y.v.petrov@spbu.ru

УДК 539.3

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_5-19

Поступила в редакцию 05.10.2025; после доработки 19.12.2025; принята к публикации 16.01.2025.

Сравнительное исследование динамического предела текучести крупнозернистого и мелкозернистого медных сплавов М1 на основе нового подхода к испытанию ударом по наковальне

Р. В. Лукашов^{1*}, А. А. Груздков^{1,2}, Г. А. Волков^{1,3}, Е. С. Остропико¹,
Н. А. Казаринов^{1,3}, Р. Р. Валиев^{1,4}, Ю. В. Петров^{1,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, 190013 Россия

³ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178 Россия

⁴ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450076 Россия

Крупнозернистая и мелкозернистая медь М1 была экспериментально исследована в рамках новой методики обработки результатов ударных испытаний образца по наковальне. Данные динамических испытаний были дополнены результатами измерения предела текучести в статических тестах, а также исследованием микроструктуры образцов до и после соударения. Для оценки ключевых параметров, характеризующих реакцию материала на высокоскоростное нагружение, был применен подход с использованием инкубационного времени, что позволило получить новое представление о поведении меди с различной структурой зерна в динамических условиях. Проводится сравнение результатов, полученных согласно классической методике Тейлора, с данными, определенными в рамках нового подхода, который позволяет прогнозировать предел текучести как при импульсном, так и при высокоскоростном нагружении. Показано, что образцы в КЗ или МЗ состоянии могут демонстрировать более высокую прочность относительно друг друга в зависимости от скорости нагружения.

Ключевые слова: тест Тейлора, инкубационное время, динамический критерий текучести, МЗ материалы

Comparative Study of Dynamic Yield Strength of Coarse-Grained and Fine-Grained M1 Copper Alloys Based on a New Approach to Impact Anvil Testing

R. V. Lukashov¹, A. A. Gruzdkov^{1,2}, G. A. Volkov^{1,3}, E. S. Ostropiko¹,
N. A. Kazarinov^{1,3}, R. R. Valiev^{1,4}, Y. V. Petrov^{1,3}

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

² Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013 Russia

³ Institute for Problems in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, 199178 Russia

⁴ Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076 Russia

Coarse-grained and fine-grained M1 copper is experimentally investigated using a new methodology for processing the results of anvil impact tests on the specimen. Dynamic test data are supplemented by yield strength measurements in static tests and microstructural studies before and after impact testing. Key parameters characterizing the material response to high-speed loading are evaluated within the incubation time approach, which provides new insights into the dynamic behavior of copper with different grain structures. Comparison is made between the results obtained according to the classical Taylor methodology and the data determined by the new approach, which allows the yield strength to be predicted under both impulse and high-speed loading. It is shown that specimens in the coarse-grained or fine-grained state can exhibit higher strength relative to each other depending on the loading rate.

Keywords: Taylor test, incubation time, dynamic yield criterion, FG materials

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер договора № 075-15-2022-1114. Раздел 3 выполнен Н.А. Казариновым при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 22-71-10019). Ю.В. Петров выполнил свою часть работы при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500007-4).

Литература

1. Borodin, E.N., Mayer, A.E., and Mayer, P.N., Grain size dependence of the yield stress for metals at quasistatic and dynamic loadings, *ICF 2013*, 2013, 5.
2. Hall, E.O., The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1951, vol. 64, no. 9, pp. 747. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>
3. Petch, N., The Cleavage Strength of Polycrystals, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1953, vol. 174, pp. 25–28.
4. Shkoda, O.A., Boyangin, E.N., Pakhnutova, N.V., and Zelepugin, S.A., Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall, *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 224–231. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231>
5. Wlodarczyk, E., Janiszewski, J., Koperski, W., et al., Estimation of Yield Stress in Tungsten Rods at High Strain-rates by Taylor's Impact Technique, *26th International Symposium on BALLISTICS*, 2011, 26.
6. Kyziol, L., Dynamic Properties of 40hm Steels at High Strain-Rates, *Transactions of Famena*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 55–68. <https://doi.org/10.21278/TOF.43405>
7. Rodionov, E.S., Lupanov, V.G., Grachyova, N.A., et al., Taylor Impact Tests with Copper Cylinders: Experiments, Microstructural Analysis and 3D SPH Modeling with Dislocation Plasticity and MD-Informed Artificial Neural Network as Equation of State, *Metals*, 2022, vol. 12, no. 2, p. 264. <https://doi.org/10.3390/met12020264>
8. Zelepugin, S.A., Cherepanov, R.O., and Pakhnutova, N.V., Optimization of Johnson–Cook Constitutive Model Parameters Using the Nesterov Gradient-Descent Method, *Materials*, 2023, vol. 16, no. 15, p. 5452. <https://doi.org/10.3390/ma16155452>
9. Taylor, G.I., The testing of materials at high rates of loading, *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 1946, vol. 26, no. 8, pp. 486–519. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1946.13699>
10. Taylor, G.I., The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1948, vol. 194, pp. 289–299. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0081>
11. Chapman, D.J., Radford, D.D., and Walley, S.M., A history of the Taylor test and its present use in the study of lightweight materials, *Design and Use of Light-Weight Materials*, 2005.

12. House, J.W., Lewis, J.C., Gillis, P.P., and Wilson, L.L., Estimation of Flow Stress under High Rate Plastic Deformation, *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 16, no. 2, pp. 189–200. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4289.9285>
13. Wilkins, M.L. and Guinan, M.W., Impact of cylinders on a rigid boundary, *Journal of Applied Physics*, 1973, vol. 44, no. 3, pp. 1200–1206. <https://doi.org/10.1063/1.1662328>
14. Eakins, D.E. and Thadhani, N.N., Instrumented Taylor anvil-on-rod impact tests for validating applicability of standard strength models to transient deformation states, *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, no. 7, p. 073503. <https://doi.org/10.1063/1.2354326>
15. Vasilev, E., Zecevic, M., McCabe, R.J., and Knezevic, M., Experimental verification of a crystal plasticity-based simulation framework for predicting microstructure and geometric shape changes: Application to bending and Taylor impact testing of Zr, *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 144, p. 103655. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103655>
16. Gao, C., Iwamoto, T., Tanaka, Y., and Kusaka, T., Numerical and experimental studies on specimens with integrated pulse-shaper used for the instrumented Taylor impact test to measure stress-strain curves at high rates of strain, *International Journal of Impact Engineering*, 2023, vol. 179, p. 104644. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104644>
17. Petrov, Y.V. and Utkin, A.A., Dependence of the dynamic strength on loading rate, *Soviet Materials Science*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 153–156. <https://doi.org/10.1007/BF00780499>
18. Petrov, Y.V. and Morozov, N.F., On the modeling of fracture of brittle solids, *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 1994, vol. 61, no. 3, pp. 710–712. <https://doi.org/10.1115/1.2901518>
19. Petrov, Y.V., Incubation time criterion and the pulsed strength of continua: Fracture, cavitation, and electrical breakdown, *Doklady Physics*, 2004, vol. 49, no. 4, pp. 246–249. <https://doi.org/10.1134/1.1753621>
20. Petrov, Y.V. and Borodin, E.N., Relaxation mechanism of plastic deformation and its justification using the example of the sharp yield point phenomenon in whiskers, *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 2, pp. 353–359. <https://doi.org/10.1134/S1063783415020286>
21. Gruzdkov, A.A. and Petrov, Y.V., On Temperature-Time Correspondence in High-Rate Deformation of Metals, *Doklady Physics*, 1999, vol. 44, no. 2, pp. 114–116.
22. Petrov, Y.V., Gruzdkov, A.A., and Sitnikova, E.V., Anomalous behavior of yield stress upon an increase in temperature under high strain rate conditions, *Doklady Physics*, 2007, vol. 52, no. 12, pp. 691–694. <https://doi.org/10.1134/S1028335807120129>
23. Selyutina, N.S. and Petrov, Y.V., Instabilities of Dynamic Strain Diagrams Predicted by the Relaxation Model of Plasticity, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 304–315. <https://doi.org/10.1007/s40870-022-00334-x>
24. Zhao, S., Petrov, Y.V., and Volkov, G.A., The modified relaxation plasticity model and the nonmonotonic stress-strain diagram, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, vol. 240, p. 107919. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107919>
25. Valiev, R.Z. and Langdon, T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 881–981. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
26. Лукашов, Р.В., Атрошенко, С.А., Волков, Г.А., Остропико, Е.С., Груздков, А.А., Влияние ударного нагружения по методу Тейлора на поведение крупнозернистой и мелкозернистой меди, *XXIV Петербургские чтения по проблемам прочности*, 2024.
27. Салтыков, С.А., *Стереометрическая металлография*, М.: Металлургия, 1970.
28. Cadoni, E. and Forni, D., Strain-rate effects on S690QL high strength steel under tensile loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, vol. 175, p. 106348. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106348>
29. Эпштейн, Г.Н. and Кайбышев, О.А., *Высокоскоростная деформация и структура металлов*, М.: Металлургия, 1971.
30. Зельдович, В.И., Хейфец, А.Э., Фролова, Н.Ю., Музыря, А.К., Симонов, А.Ю., Исследование образования мартенсита в аустенитной стали при нагружении квазисферически сходящимися ударными волнами, *Физика металлов и металловедение*, 2013, vol. 114, no. 12, pp. 1114–1120. <https://doi.org/10.7868/s0015323013120097>
31. Meyers, M.A. Murr, L.E. (eds.), *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, New York: Springer, 1981.
32. Meyers, M.A., *Dynamic behavior of materials*, New York: John Wiley & Sons, 1994, 448 pp.
33. Атрошенко, С.А. Оленин, Д.М., Локальная скорость сдвига в откольной зоне при импульсном нагружении металлов, *Физика металлов и металловедение*, 1999, vol. 87, no. 2, pp. 90–96.
34. Буравова, С.Н. Гордополов, Ю.А., Природа образования полос адиабатического сдвига, *Доклады АН*, 2007, vol. 417, no. 6, pp. 1–4.
35. Буравова, С.Н., Гордополов, Ю.А., Петров, Е.В., Полетаев, А.В., Рихтер, Д.В., Особенности разрушения металлов при импульсном нагружении, *Деформация и разрушение материалов*, 2009, no. 7, pp. 7–12.

36. Буравова, С.Н., *Этюды на тему локализации динамической деформации. Откольная модель локализации пластической деформации*, Palmarium Academic Publishing, 2014.
37. Буравова, С.Н. Петров, Е.В., Микроструктура металла в откольных пластинах, *Химическая физика*, 2020, vol. 39, no. 9, pp. 63–70.
38. Бородин, И.Н., Атрошенко, С.А., Майер, А.Е., Распределение дислокаций и двойников в образцах меди и стали 12Х18Н10Т после ударно-волнового нагружения, *ЖТФ*, 2014, vol. 84, no. 8, pp. 59–66.

С. 5–19

2. Научная статья

Сведения об авторах

Мартыненко Наталья Сергеевна, к.т.н., с.н.с., ИМЕТ РАН, nataliasmartynenko@gmail.com,
Рыбальченко Георгий Владимирович, к.ф.-м.н., н.с., ФИАН, rybalchenkov@lebedev.ru,
Табачкова Наталия Юрьевна, к.ф.-м.н., доцент, НИТУ МИСИС, ntabachkova@gmail.com,
Рыбальченко Ольга Владиславовна, к.т.н., в.н.с., ИМЕТ РАН, rybalch@mail.ru,
Лукьянова Елена Александровна, к.т.н., с.н.с., ИМЕТ РАН, helenelukyanova@gmail.com,
Темралиева Диана Ривовна, инж.-исследователь, ИМЕТ РАН, diana4-64@mail.ru,
Просвирнин Дмитрий Викторович, с.н.с., ИМЕТ РАН, imetran@yandex.ru,
Добаткин Сергей Владимирович, д.т.н., г.н.с., ИМЕТ РАН, dobatkin.sergey@gmail.com.

УДК 669.2:621.789:620.187.3:620.172/.178.2:620.178.322.2

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_20-32

Поступила в редакцию 09.10.2025; после доработки 05.12.2025; принята к публикации 05.12.2025

Поведение ультрамелкозернистого сплава Zn-1%Mg-0.1%Ca при приложении циклических нагрузок

Н. С. Мартыненко^{1*}, Г. В. Рыбальченко², Н. Ю. Табачкова^{3,4},
О. В. Рыбальченко¹, Е. А. Лукьянова¹, Д. Р. Темралиева¹, Д. В. Просвирнин¹,
С. В. Добаткин¹

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
Москва, 119334, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991,
Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Российской академии наук, Москва, 119991,
Россия

⁴ Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва,
119049, Москва

В работе проводилось исследование микроструктуры и механических характеристик, в частности усталостной прочности, сплава Zn-1%Mg-0.1%Ca, подвергнутого кручению под высоким давлением при комнатной температуре. Исследования показали, что после КВД в сплаве формируется смешанная микроструктура, состоящая из зерен α -Zn размером 700–900 нм, нанозерен богатой магнием фазы размером 50–100 нм и мелкодисперсных частиц размером ~30–50 нм. Формирование такой структуры приводит к повышению условного предела текучести сплава в ~2.5 раза, предела прочности – в ~2.7 раза при одновременном значительном росте относительного удлинения (примерно в 13 раз). Повышение статической прочности также сопровождается ростом усталостной прочности в 1.7 раза. Однако повышение усталостной прочности носит менее выраженный характер по сравнению с ростом статической прочности. Предел усталости увеличился практически на 70% по сравнению с пределом усталости исходного сплава (с 65 МПа до 110 МПа соответственно). При достижении 2.8×10^6 циклов нагружения по схеме повторного растяжения разрушение образца сопровождалось образованием микротрещин, направленных перпендикулярно фронту распространения усталостной трещины и расположенных вблизи зоны долома усталостного образца.

Ключевые слова: Цинковые сплавы, кручение под высоким давлением, микроструктура, прочность, пластичность, усталостная прочность.

Behavior of Ultrafine Grained Zn-1%Mg-0.1%Ca Alloy under Cyclic Loading

N. S. Martynenko^{1*}, G. V. Rybalchenko², N. Yu. Tabachkova^{3,4}, O. V. Rybalchenko¹, E. A. Lukyanova¹, D. R. Temralieva¹, D. V. Prosvirnin¹, S. V. Dobatkin¹

¹ A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334, Russia

² P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

³ A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, 119333, Russia

⁴ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russia

The paper studies the microstructure and mechanical characteristics, in particular, fatigue strength, of the Zn-1%Mg-0.1%Ca alloy subjected to high pressure torsion at room temperature. The study shows that a mixed microstructure is formed in the alloy after HPT, which consists of α -Zn grains 700–900 nm in size, nanograins of a magnesium-rich phase 50–100 nm in size, and finely dispersed particles ~30–50 nm in size. The formation of such a structure leads to an increase in the yield stress of the alloy by ~2.5 times and in the ultimate tensile strength by ~2.7 times with a simultaneous significant growth in the elongation (approximately by 13 times). An increase in the static strength is also accompanied by an increase in the fatigue strength by 1.7 times. However, the increase in fatigue strength is less pronounced compared to the increase in static strength. The fatigue limit increases by almost 70% above that of the initial alloy (from 65 MPa to 110 MPa, respectively). Upon reaching 2.8×10^6 loading cycles by the repeated tension scheme, fracture of the sample is accompanied by the formation of microcracks directed perpendicular to the fatigue crack front and located near the final fracture zone.

Keywords: Zinc alloys, high pressure torsion, microstructure, strength, ductility, fatigue strength

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00024.

Литература

1. Александрова, Г.А., Ахметзянова, Р.Р., Голубев, Н.А., Кириллова, Г.Н., Огрызко, Е.В., Оськов, Ю.И., Романенко, О.И., Харьков, Т.Л., Чумарина, В.Ж., *Здравоохранение в России. 2023: Статистический сборник*, Росстат, Москва, 2023.
2. Загородний, Н.В., Волна, А.А., Панин, М.А., Удаление имплантатов, *Вестник РУДН. Серия Медицина*, 2010, no. 4, сс. 44–51.
3. Zhang, B., Liu, Z.-H., Li, J., Zhang, K., Chen, J.-J., and Zhang, R.M., Open reduction and internal fixation of severely dislocated fractures of condylar neck and base using bioabsorbable miniplate in children: A 3–10 years follow-up study, *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 2014, vol. 78, no. 11, pp. 1987–1992. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.09.004>
4. Lauer, G., Pradel, W., Leonhardt, H., Loukota, R., and Eckelt, U., Resorbable triangular plate for osteosynthesis of fractures of the condylar neck, *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2010, vol. 48, no. 7, pp. 532–535. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2009.10.008>
5. Аврунин, А.С., Докторов, А.А., Зависимость остеогенного эффекта от характеристик механических нагрузок костных структур, *Травматология и ортопедия России*, 2016, vol. 22, no. 2, сс. 88–97.
6. Khan, A.R., Grewal, N.S., Zhou, C., Yuan, K., Zhang, H.-J., and Jun, Z., Recent advances in biodegradable metals for implant applications: Exploring in vivo and in vitro responses, *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, p. 101526. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101526>
7. Chen, K., Gu, X., and Zheng, Y., Feasibility, challenges and future prospects of biodegradable zinc alloys as orthopedic internal fixation implants, *Smart Materials in Manufacturing*, 2024, vol. 2, p. 100042. <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2023.100042>
8. Stefanidou, M., Maravelias, C., Dona, A., and Spiliopoulou, C., Zinc: a multipurpose trace element, *Archives of Toxicology*, 2006, vol. 80, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00204-005-0009-5>
9. Yuan, W., Xia, D., Wu, S., Zheng, Y., Guan, Z., and Rau, J.V., A review on current research status of the surface modification of Zn-based biodegradable metals, *Bioactive Materials*, 2022, vol. 7, pp. 192–216. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.05.018>
10. Martynenko, N., Lukyanova, E., Anisimova, N., Kiselevskiy, M., Serebryany, V., Yurchenko, N., Raab, G., Birbilis, N., Salishchev, G., Dobatkin, S., and Estrin, Y., Improving the property profile of a bioresorbable Mg-Y-Nd-Zr alloy by deformation treatments, *Materialia*, 2020, vol. 13, p. 100841. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100841>

11. Kasaeian-Naeini, M., Sedighi, M., and Hashemi, R., Severe plastic deformation (SPD) of biodegradable magnesium alloys and composites: A review of developments and prospects, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. 938–955. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.11.006>
12. Hashemi, M., Alizadeh, R., and Langdon, T.G., Recent advances using equal-channel angular pressing to improve the properties of biodegradable Mg–Zn alloys, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, vol. 11, no. 7, pp. 2260–2284. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.009>
13. Bednarczyk, W., Kawałko, J., Wątroba, M., Gao, N., Starink, M.J., Bała, P., and Langdon, T.G., Microstructure and mechanical properties of a Zn-0.5Cu alloy processed by high-pressure torsion, *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 776, p. 139047. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139047>
14. Rybalchenko, O., Anisimova, N., Kiselevsky, M., Rybalchenko, G., Martynenko, N., Bochvar, N., Tabachkova, N., Shchetinin, I., Shibaeva, T., Konushkin, S., Tokar, A., Raab, A., and Dobatkin, S., Effect of equal-channel angular pressing on structure and properties of Fe-Mn-C alloys for biomedical applications, *Materials Today Communications*, 2022, vol. 30, p. 103048. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103048>
15. Самуэльевич, А.А., Мургузалиевич, Т.Р., Константинович, П.Л., Мельников, Б.Е., Иерархическая организация скелета - фактор, регламентирующий структуру усталостных повреждений. Часть III. Моделирование начального этапа развития усталостных повреждений, *Травматология и ортопедия России*, 2011, no. 2, сс. 93–100.
16. Padilla, H.A. and Boyce, B.L., A Review of Fatigue Behavior in Nanocrystalline Metals, *Experimental Mechanics*, 2010, vol. 50, pp. 5–23. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9301-2>
17. Ji, C., Ma, A., Jiang, J., Song, D., Liu, H., and Guo, S., Research status and future prospects of biodegradable Zn-Mg alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 993, p. 174669. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174669>
18. Pachla, W., Przybysz, S., Jarzębska, A., Bieda, M., Sztwiertnia, K., Kulczyk, M., and Skiba, J., Structural and mechanical aspects of hypoeutectic Zn–Mg binary alloys for biodegradable vascular stent applications, *Bioactive Materials*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.07.004>
19. Liu, L., Luo, P., Wen, P., and Xu, P., The role of magnesium in the pathogenesis of osteoporosis, *Frontiers in Endocrinology*, 2024, vol. 15, p. 1406248. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1406248>
20. Flynn, A., The role of dietary calcium in bone health, *Proceedings of the Nutrition Society*, 2003, vol. 62, no. 4, pp. 851–858. <https://doi.org/10.1079/PNS2003301>
21. Martynenko, N., Anisimova, N., Tabachkova, N., Serebryany, V., Rybalchenko, O., Sannikov, A., Temralieva, D., Lukyanova, E., Kornjushenkov, E., Kiselevskiy, M., and Dobatkin, S., Effect of high-pressure torsion on mechanical properties and biocompatibility in vitro of pure Zn, *Letters on Materials*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 308–311. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-4-308-311>
22. Ситдиков, В.Д., Хафизова, Э.Д., Поленок, М.В., Микроструктура и свойства сплава Zn–1%Li–2%Mg, подвергнутого интенсивной пластической деформации, *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 2, сс. 117–130. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-2-64-7>
23. Jin, H., Zhao, S., Guillory, R., Bowen, P.K., Yin, Z., Griebel, A., Schaffer, J., Earley, E.J., Goldman, J., and Drelich, J.W., Novel high-strength, low-alloys Zn-Mg (< 0.1 wt% Mg) and their arterial biodegradation, *Materials Science and Engineering: C*, 2018, vol. 84, pp. 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.021>
24. Okamoto, H., Ca-Zn (Calcium-Zinc), *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2013, vol. 34, p. 171. <https://doi.org/10.1007/s11669-012-0180-3>
25. Martynenko, N., Anisimova, N., Rybalchenko, G., Rybalchenko, O., Serebryany, V., Zheleznyi, M., Shinkareva, M., Gorbenko, A., Temralieva, D., Lukyanova, E., Sannikov, A., Koltygin, A., Kiselevskiy, M., Yusupov, V., and Dobatkin, S., Effect of Rotary Swaging on Mechanical and Operational Properties of Zn–1%Mg and Zn–1%Mg–0.1%Ca Alloys, *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1386. <https://doi.org/10.3390/met13081386>
26. Martynenko, N., Anisimova, N., Rybalchenko, O., Kiselevskiy, M., Rybalchenko, G., Tabachkova, N., Zheleznyi, M., Temralieva, D., Bazhenov, V., Koltygin, A., Sannikov, A., and Dobatkin, S., Structure, biodegradation and in vitro bioactivity of Zn-1%Mg alloy strengthened by high pressure torsion, *Materials*, 2022, vol. 15, no. 24, p. 9073. <https://doi.org/10.3390/ma15249073>
27. Valiev, R.Z., Nanostructural design of superstrong metallic materials by severe plastic deformation processing, *Microstructures*, 2023, vol. 3, p. 2023004. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2022.25>
28. Srinivasarao, B., Zhilyaev, A.P., Langdon, T.G., and Pérez-Prado, M.T., On the relation between the microstructure and the mechanical behavior of pure Zn processed by high pressure torsion, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 562, pp. 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.027>
29. Huang, H., Fang, L., Tong, Z., Gong, G., Yu, H., Kulyasova, O., Valiev, R.Z., Xia, D., Zheng, Y., and Bian, D., Nanostructuring of Zn–Li-based alloys through severe plastic deformation: Microstructure, mechanical properties, and corrosion behaviors, *Nano Materials Science*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2024.07.004>

30. Heiss, A., Thatikonda, V.S., Richter, A., Schmitt, L.-Y., Park, D., and Klotz, U.E., Development, Processing and Aging of Novel Zn-Ag-Cu Based Biodegradable Alloys, *Materials*, 2023, vol. 16, p. 3198. <https://doi.org/10.3390/ma16083198>
31. Ye, L., Liu, H., Sun, C., Zhuo, X., Ju, J., Xue, F., Bai, J., Jiang, J., and Xin, Y., Achieving high strength, excellent ductility, and suitable biodegradability in a Zn-0.1Mg alloy using room-temperature ECAP, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 926, p. 166906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166906>
32. Kubásek, J., Vojtěch, D., Jablonská, E., Pospíšilová, I., Lipov, J., and Ruml, T., Structure, mechanical characteristics and in vitro degradation, cytotoxicity, genotoxicity and mutagenicity of novel biodegradable Zn-Mg alloys, *Materials Science and Engineering: C*, 2016, vol. 58, pp. 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.08.015>
33. Bednarczyk, W., Wątroba, M., Kawałko, J., and Bała, P., Can zinc alloys be strengthened by grain refinement? A critical evaluation of the processing of low-alloyed binary zinc alloys using ECAP, *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 748, pp. 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.117>
34. Wątroba, M., Bednarczyk, W., Kawałko, J., Lech, S., Wiczerzak, K., Langdon, T.G., and Bała, P., A Novel High-Strength Zn-3Ag-0.5Mg Alloy Processed by Hot Extrusion, Cold Rolling, or High-Pressure Torsion, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, vol. 51, pp. 3335–3348. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05797-y>
35. Терентьев, В.Ф., Кораблева, С.А., *Усталость металлов*, Наука, Москва, 2015.
36. Suresh, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
37. Murashkin, M., Sabirov, I., Prosvirnin, D., Ovid'ko, I., Terentiev, V., Valiev, R., and Dobatkin, S., Fatigue Behavior of an Ultrafine-Grained Al-Mg-Si Alloy Processed by High-Pressure Torsion, *Metals*, 2015, vol. 5, pp. 578–590. <https://doi.org/10.3390/met5020578>
38. Khatibi, G., Horkey, J., Weiss, B., and Zehetbauer, M.J., High cycle fatigue behaviour of copper deformed by high pressure torsion, *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.017>
39. Agnew, S.R. and Weertman, J.R., Cyclic softening of ultrafine grain copper, *Materials Science and Engineering: A*, 1998, vol. 244, no. 2, pp. 145–153. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00689-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00689-8)
40. Wu, S.D., Wang, Z.G., Jiang, C.B., Li, G.Y., Alexandrov, I.V., and Valiev, R.Z., The formation of PSB-like shear bands in cyclically deformed ultrafine grained copper processed by ECAP, *Scripta Materialia*, 2003, vol. 48, no. 12, pp. 1605–1609. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00141-6)
41. Valiev, R.Z., Zhilyaev, A.P., and Langdon, T.G., *Bulk nanostructured materials: Fundamentals and applications*, Wiley & Sons, New Jersey, 2014.

C. 20–32

3. Научная статья

Сведения об авторах

Бодякова Анна Игоревна, к.ф.-м.н., н. с. НИУ «БелГУ», bodyakova-ai@yandex.ru,
 Зуйко Иван Сергеевич, к.ф.-м.н., с. н. с. НИУ «БелГУ», zuiko_ivan@bsuedu.ru,
 Калинин Александр Андреевич, к.ф.-м.н., м. н. с. НИУ «БелГУ», kalinenko@bsuedu.ru,
 Юзбекова Диана Юнусовна, м. н. с. НИУ «БелГУ», yuzbekova@bsuedu.ru,
 Чистюхина Элеонора Ивановна, лаборант-исследователь НИУ «БелГУ», 1471601@bsuedu.ru,
 Кайбышев Рустам Оскарович, д.ф.-м.н., проф., зав. лаб. НИУ «БелГУ», rustam_kaybyshev@bsuedu.ru.

УДК 669.71.01/715

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_33-51

Поступила в редакцию 18.10.2024; после доработки 28.10.2024; принята к публикации 1.11.2024

Влияние закалки и старения на микроструктуру и свойства Al-Mg-Si-Cu сплава

А.И. Бодякова^{1*}, И.С. Зуйко¹, А.А. Калинин¹, Д.Ю. Юзбекова¹, Э.И. Чистюхина¹, Р.О. Кайбышев¹

¹ ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ», Белгород, 308015 Россия

Исследовано влияние закалки и старения на фазовый состав и физико-механические свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si-Cu. Повышение температуры закалки с 530 до 550°C приводит к росту твердости с 59 ± 1 до 68 ± 2 HV и падению электрической проводимости с 38.9 ± 0.1 до 36.0 ± 0.1 % IACS, соответственно. Кривые растяжения после закалки демонстрируют скачкообразную

деформацию или, так называемый эффект Портевена–Ле Шателье, что является следствием растворения избыточных фаз при высоких температурах и образования пересыщенного твердого раствора в сплаве после закалки. Старение при температуре 190°C приводит к немонотонному изменению твердости. Максимальная твердость наблюдается после 2 ч старения и составляет 143 ± 4 HV. В состоянии максимальной твердости в сплаве формируются частицы β'' , β' , Q', кластеров и зон Гинье–Престона (ГП), предшествующих выделению θ'' -фазы, Q'-фазы и S'-фазы. Дисперсионное упрочнение обеспечивает повышение условного предела текучести и предела прочности до 340 ± 5 и 390 ± 10 МПа, соответственно, при относительном удлинении около 12.3 ± 1.6 %. Повышенная пластичность сплава, которая на примерно 2 % выше ранее известных литературных данных, может быть связана с отсутствием игольчатых частиц Al_5FeSi вследствие целенаправленного снижения концентрации железа в сплаве.

Ключевые слова: Al-Mg-Si-Cu сплав, механические свойства, микроструктура, электрическая проводимость, старение

Regularities of dispersion hardening of Al-Mg-Si-Cu alloy during artificial aging

A.I. Bodyakova¹, I.S. Zuiko¹, A.A. Kalinenko¹, D.Yu. Yuzbekova¹, E.I. Chistyukhina¹, R.O. Kaibyshev¹

¹ Belgorod State University, Belgorod, 308015 Russia

The effect of solution treatment and aging on phase composition and physical-mechanical properties of an Al-Mg-Si-Cu alloy was investigated. Increase of solution temperature from 530 to 550°C leads to hardness increase from 59 ± 1 to 68 ± 2 HV and electrical conductivity decrease from 38.9 ± 0.1 to 36.0 ± 0.1 % IACS, respectively. The stress–strain curves after solution treatment are characterized by jerky flow or the Portevin–Le Chatelier effect, which is associated with the dissolution of particles at high temperatures and the formation of a supersaturated solid solution in the alloy after solution treatment. Aging at 190°C leads to a non-monotonic behavior of hardness. The maximum hardness of 143 ± 4 HV is observed after aging for 2 h. The β'' , β' , Q' particles, clusters, and Guinier–Preston (GP) zones provide maximum hardness in the alloy. Particle strengthening leads to an increase in the yield strength and ultimate tensile strength to 340 ± 5 and 390 ± 10 MPa, respectively, and an elongation of about 12.3 ± 1.6 %. The high ductility of the alloy (approximately 2 % higher than previously published literature data) may be a result of the absence of needle-shaped Al_5FeSi particles due to a targeted reduction in the Fe concentration in the alloy.

Keywords: Al-Mg-Si-Cu alloy, strength, electrical conductivity, plasticity, aging

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, код научной темы FZWG-2023-0005.

Литература

1. Kumar, N., Severe Plastic Deformation of Al–Mg–Si Alloys Processed Through Rolling Techniques: A Review, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2022, vol. 11, pp. 353–404. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00859-6>
2. Buchanan, K., Colas, K., Ribis, J., Lopez, A., and Garnier, J., Analysis of the metastable precipitates in peak-hardness aged Al-Mg-Si(-Cu) alloys with differing Si contents, *Acta Materialia*, 2017, vol. 132, pp. 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.037>
3. Chen, J.H., Costan, E., Van Huis, M.A., Xu, Q., and Zandbergen, H.W., Atomic pillar-based nanoprecipitates strengthen AlMgSi alloys, *Science*, 2006, vol. 312, no. 5772, pp. 416–419. <https://doi.org/10.1126/science.1124199>
4. Cabibbo, M., Evangelista, E., and Vedani, M., Influence of severe plastic deformations on secondary phase precipitation in a 6082 Al-Mg-Si alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 36, pp. 1353–1364. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0226-9>
5. Marioara, C.D., Andersen, S.J., Zandbergen, H.W., and Holmestad, R., The influence of alloy composition on precipitates of the Al-Mg-Si system, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 36, pp. 691–702. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0185-1>
6. Matsuda, K., Sakaguchi, Y., Miyata, Y., Uetani, Y., Sato, T., Kamio, A., and Ikeno, S., Precipitation sequence of various kinds of metastable phases in Al-1.0 mass% Mg-2Si-0.4 mass% Si alloy, *Journal of Materials Science*, 2000, vol. 35, pp. 179–189. <https://doi.org/10.1023/A:1004769305736>

7. Vissers, R., Van Huis, M.A., Jansen, J., Zandbergen, H.W., Marioara, C.D., and Andersen, S.J., The crystal structure of the β'' phase in Al–Mg–Si alloys, *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, no. 11, pp. 3815–3823. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.02.032>
8. Marioara, C.D., Andersen, S.J., Stene, T.N., Hasting, H., Walmsley, J., Van Helvoort, A.T.J., and Holmestad, R., The effect of Cu on precipitation in Al–Mg–Si alloys, *Philosophical Magazine*, 2007, vol. 87, no. 23, pp. 3385–3413. <https://doi.org/10.1080/14786430701287377>
9. Chakrabarti, D.J. and Laughlin, D.E., Phase relations and precipitation in Al–Mg–Si alloys with Cu additions, *Progress in Materials Science*, 2004, vol. 49, no. 3-4, pp. 389–410. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(03\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(03)00031-8)
10. Sagalowicz, L., Hug, G., Bechet, D., Sainfort, P., and Lapasset, G., A study of the structural precipitation in the Al-Mg-Si-Cu system, in *Proceedings of the 4th International Conference on Aluminium Alloys*, 1994, pp. 636–643.
11. Dorward, R.C., Preaging effects in Al-Mg-Si alloys, *Metallurgical Transactions*, 1973, vol. 4, pp. 507–512. <https://doi.org/10.1007/BF02648703>
12. Demir, H. and Gündüz, S., The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, *Materials & Design*, 2009, vol. 30, pp. 1480–1483. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.007>
13. Chen, Y., Hu, Q., Pan, S., Zhang, H., Liu, H., Zhu, B., Liu, H., and Liu, W., Influences of Cu Content on the Microstructure and Strengthening Mechanisms of Al-Mg-Si-x Cu Alloys, *Metals*, 2019, vol. 9, no. 5, p. 524. <https://doi.org/10.3390/met9050524>
14. Jin, M., Li, J., and Shao, G.J., Study of Cu addition on precipitation behaviors and mechanical properties in AA6082 Al-Mg-Si alloy, *Materials Science Forum*, 2007, vol. 546-549, pp. 825–828. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.546-549.825>
15. Zhong, H., Rometsch, P., and Estrin, Y., Effect of alloy composition and heat treatment on mechanical performance of 6xxx aluminum alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, vol. 24, no. 7, pp. 2174–2178. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63329-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63329-X)
16. Lu, T., Wu, J., Pan, Y., Tao, S., and Chen, Y., Optimizing the tensile properties of Al–11Si–0.3Mg alloys: Role of Cu addition, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 631, pp. 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.107>
17. Matsuda, K., Ishida, Y., Mullerova, I., Frank, L., and Ikeno, S., Cube-phase in excess Mg-type Al-Mg-Si alloy studied by EFTEM, *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, pp. 2605–2610. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-7819-6>
18. Zhen, L., Fei, W.D., Kang, S.B., and Kim, H.W., Precipitation behaviour of Al-Mg-Si alloys with high silicon content, *Journal of Materials Science*, 1997, vol. 32, pp. 1895–1902. <https://doi.org/10.1023/A:1018569226499>
19. Xu, X., Zhu, W., Yuan, M., Liang, C., and Deng, Y., The effect of Zn content on the microstructure and mechanical properties of the Al-Mg-Si alloy, *Materials Characterization*, 2023, vol. 198, p. 112714. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112714>
20. Liu, F., Chen, S., Dong, Q., Qin, J., Li, Z., Zhang, B., and Nagaumi, H., Tailoring microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu alloy with varying Mn and/or Cr additions, *Materials Science and Engineering: A*, 2024, vol. 892, p. 146053. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.146053>
21. Золоторевский, В.С., Белов, Н.А., *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*, МИСиС, Москва, 2005.
22. Shabadi, R., Kumar, S., Roven, H.J., and Dwarakadasa, E.S., Effect of specimen condition, orientation and alloy composition on PLC band parameters, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 382, no. 1-2, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.04.079>
23. Xie, J., Chen, X.P., Mei, L., Ren, P., Huang, G.J., and Liu, Q., Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al–Mg–Sc alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, p. 139436. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139436>
24. Rodriguez, P., Serrated plastic flow, *Bulletin of Materials Science*, 1984, vol. 6, pp. 653–663.
25. Gras, Ch., Meredith, M., and Hunt, J.D., Microdefects formation during the twin-roll casting of Al–Mg–Mn aluminium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 167, no. 1, pp. 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.084>
26. Kumar, N., Goel, S., Jayaganthan, R., and Brokmeier, H.G., Effect of solution treatment on mechanical and corrosion behaviors of 6082-T6 Al alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2015, vol. 4, pp. 411–422. <https://doi.org/10.1007/s13632-015-0219-z>
27. Бер, Л.Б., О стадиях старения алюминиевых сплавов, *Технология легких сплавов*, 2013, no. 4, с. 66–67.
28. Jin, S., Ngai, T., Zhang, G., Zhai, T., Jia, S., and Li, L., Precipitation strengthening mechanisms during natural ageing and subsequent artificial aging in an Al-Mg-Si-Cu alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 724, pp. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.006>
29. Wang, S.C. and Starink, M.J., Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al–Cu–Mg–(Li) based alloys, *International Materials Reviews*, 2005, vol. 50, no. 4, pp. 193–215. <https://doi.org/10.1179/174328005X14357>

30. Shih, H.C., Ho, N.J., and Huang, J.C., Precipitation behaviors in Al-Cu-Mg and 2024 aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, vol. 27, pp. 2479–2494. <https://doi.org/10.1007/BF02652342>
31. Lee, S.H., Seo, N., Kang, M., Son, S.B., Lee, S.J., and Jung, J.G., Natural aging-induced nanoprecipitation and its impact on tensile properties of Al-Si-Cu-Mg cast alloy, *Materials Characterization*, 2024, vol. 215, p. 114204. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114204>
32. Сбитнева, С.В., Лукина, Е.А., Зайцев, Д.В., Исследование особенностей распада твердого раствора при старении сплавов системы Al-Mg-Si-Cu, *Технология легких сплавов*, 2019, no. 1, с. 29–41.
33. Bagaryatsky, Y.A., Structural changes on aging Al-Cu-Mg alloys, *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1952, vol. 87, no. 3, pp. 397–401.
34. Bagaryatsky, Y.A., Characteristics of natural aging of aluminum alloy, *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1952, vol. 87, no. 3, pp. 559–562.
35. Sunde, J.K., Marioara, C.D., and Holmestad, R., The effect of low Cu additions on precipitate crystal structures in overaged Al-Mg-Si (-Cu) alloys, *Materials Characterization*, 2020, vol. 160, p. 110087. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110087>
36. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., and Qian, M., *Light alloys: Metallurgy of the Light Metals*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2017.
37. Hirano, K.I., Atom-probe field-ion microscope studies on age-hardenable aluminium alloys, *Materials Science Forum*, 1987, vol. 13-14, pp. 215–240. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.13-14.215>
38. Starink, M.J., Gao, N., and Yan, J.L., The origins of room temperature hardening of Al-Cu-Mg alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 387, pp. 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.085>
39. Orowan, E., Creep in Metals, *Journal of the West of Scotland Iron & Steel Institute*, 1946, vol. 54, pp. 45–53.
40. Kocks, U.F. and Mecking, H., Physics and phenomenology of strain hardening: the FCC case, *Progress in materials science*, 2003, vol. 48, no. 3, pp. 171–273. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-8)
41. Bodyakova, A., Mishnev, R., Belyakov, A., and Kaibyshev, R., Effect of chromium content on precipitation in Cu-Cr-Zr alloys, *Journal of Materials Science*, 2022, vol. 57, no. 27, pp. 13043–13059. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07454-8>
42. Lei, G., Wang, B., Lu, J., Wang, C., Li, Y., and Luo, F., Effects of solid solution temperature on the microstructure and properties of 6013 aluminum alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 280, p. 125829. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125829>
43. Liu, M.P., Jiang, T.H., Wang, J., Liu, Q., Wu, Z.J., Yu, Y.D., Skaret, P.C., and Roven, H.J., Aging behavior and mechanical properties of 6013 aluminum alloy processed by severe plastic deformation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, vol. 24, no. 12, pp. 3858–3865. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63543-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63543-3)
44. Сбитнева, С.В., Зайцев, Д.В., Влияние режимов старения и НТМО на фазовый состав упрочняющих выделений и на свойства листов из сплава 6013, *Технология легких сплавов*, 2017, no. 4, с. 42–48.
45. Lei, G., Wang, B., Lu, J., Wang, C., Li, Y., and Luo, F., Microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of continuous heating aging 6013 aluminum alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.101>

C. 33–51

4. Научная статья

Сведения об авторах

Куранова Наталия Николаевна, к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ УрО РАН, kuranova@imp.uran.ru,
Марченков Вячеслав Викторович, д.ф.-м.н., г.н.с., ИФМ УрО РАН, march@imp.uran.ru,
Пушин Владимир Григорьевич, д.ф.-м.н., рук. отд., г.н.с., проф., ИФМ УрО РАН, pushin@imp.uran.ru,
Свирид Алексей Эдуардович, к.ф.-м.н., с.н.с., ИФМ УрО РАН, svirid@imp.uran.ru,
Фоминых Богдан Михайлович, инж.-исслед., ИФМ УрО РАН, bogdan.fominyh@mail.ru.

УДК 691.73, 538.911, 539.25

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_52-62

Поступила в редакцию 21.10.2024; после доработки 27.11.2024; принята к публикации 27.11.2024

Влияние легирования цинком на температуры термоупругих мартенситных превращений и микроструктуру метастабильных ($\alpha+\beta$) сплавов на основе Cu-Zn с эффектами памяти формы

Н. Н. Куранова*, В. В. Марченков, В. Г. Пушин, А. Э. Свирид, Б. М. Фоминых

¹ *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620108, Россия*

Проведено комплексное исследование влияния концентрации цинка на структурно-фазовые превращения метастабильных ($\alpha+\beta$) сплавов с эффектом памяти формы Cu-Zn. Определены температуры начала и конца прямого и обратного мартенситного превращения в сплавах Cu- x Zn ($x=38, 39.5, 41$ мас.%) с помощью измерений электросопротивления. Структура и фазовые превращения изучены методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Установлено уменьшение критических температур термоупругих мартенситных превращений при увеличении содержания цинка. Проанализированы особенности диффузных эффектов на микроэлектронограммах в зависимости от содержания цинка в бинарных метастабильных сплавах Cu-Zn. Наблюдалось увеличение плотности дислокаций при термоциклировании через мартенситный переход.

Ключевые слова: ($\alpha+\beta$) сплавы Cu-Zn, термоупругое мартенситное превращение, электросопротивление, эффект памяти формы, мартенсит, микроструктура

The Effect of Zinc Alloying on the Temperatures of Thermoelastic Martensitic Transformations and the Microstructure of Metastable ($\alpha+\beta$) Cu-Zn-Based Shape Memory Alloys

N. N. Kuranova, V. V. Marchenkov, V. G. Pushin, A. E. Svirid, B. M. Fominyh

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108, Russia

A comprehensive study of the effect of zinc concentration on the structural and phase transformations of metastable ($\alpha+\beta$) alloys with Cu-Zn shape memory effect has been carried out. The temperatures of the start and finish of the forward and reverse martensitic transformation in Cu- x Zn alloys ($x=38, 39.5, 41$ wt.%) were determined using electrical resistance measurements. The structure and phase transformations have been studied by optical, scanning and transmission electron microscopy and X-ray phase analysis. A decrease in the critical temperatures of thermoelastic martensitic transformations with an increase in the zinc content has been established. The features of diffuse effects on selected area diffraction patterns depending on the zinc content in metastable Cu-Zn binary alloys are analyzed. An increase in dislocation density was observed during thermal cycling through the martensitic transition

Keywords: ($\alpha+\beta$) Cu-Zn alloys, thermoelastic martensitic transformation, electrical resistance, shape memory effect, martensite, microstructure

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН (№г.р. № 122021000033-2).

Литература

1. Perkins, J. (Ed.), Shape Memory Effects in Alloys, Plenum, London, UK, 1975, 583 p.
2. Варлимонт, Х., Дилей, Л., Мартенситные превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота, Москва: Наука, 1980, 205 с.
3. Ооцука, К., Симидзу, К., Судзуки, Ю., Сэкигути, Ю., Тадаки, Ц., Хомма, Т., Миядзаки, С., Сплавы с эффектом памяти формы, М.: Металлургия, 1990, 224 с.
4. Duering, T.W., Melton, K.L., Stockel, D., Wayman, C.M. (Eds.), Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann: London, UK, 1990, 301 p. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(90\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(90)90012-9)
5. Материалы с эффектом памяти формы: Справ изд. / Под ред. В.А. Лихачева, Т.1 – 4, СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1997, 1998.
6. Пушин, В.Г., Кондратьев, В.В., Хачин, В.Н., Предпереходные явления и мартенситные превращения, Екатеринбург: УрО РАН, 1998, 368 с.

7. Cui, J., Wu, Y., Muehlbauer, J., Hwang, Y., Radermacher, R., Fackler, S., Wuttig, M., Takeuchi, I., Demonstration of high efficiency elastocaloric cooling with large δT using NiTi wires, *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, p. 073904. <https://doi.org/10.1063/1.4746257>
8. Buehler, W.J., Wang, F.E., A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering, *Ocean Engineering*, 1968, vol. 1, pp. 105-120. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(68\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0029-8018(68)90019-X)
9. Zhang, L., He, Z.Y., Tan, J., Zhang, Y.Q., Stoica, M., Prashanth, K.G., Cordill, M.J., Jiang, Y.H., Zhou, R., Eckert, J., Rapid fabrication of function-structure-integrated NiTi alloys: Towards a combination of excellent superelasticity and favorable bioactivity, *Intermetallics*, 2017, vol. 82, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2016.11.004>
10. Snodgrass, R., Erickson, D., A multistage elastocaloric refrigerator and heat pump with 28 K temperature span, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, p. 18532. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54411-8>
11. Pushin, V., Kuranova, N., Marchenkova, E., Pushin, A., Design and Development of Ti-Ni, Ni-Mn-Ga and Cu-Al-Ni-based Alloys with High and Low Temperature Shape Memory Effects, *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 2616-2640. <https://doi.org/10.3390/ma12162616>
12. Sedlak, P., Seiner, H., Landa, M., Novák, V., Šittner, P., Manosa, L.I., Elastic Constants of bcc Austenite and 2H Orthorhombic Martensite in CuAlNi Shape Memory Alloy, *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 3643-3661. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.04.013>
13. Dasgupta, R., A look into Cu-based shape memory alloys: Present scenario and future prospects, *Journal of Materials Research*, 2014, vol. 29, no. 16, pp. 1681-1698. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.189>
14. Pushin, V.G., Kuranova, N.N., Svirid, A.E., Uksusnikov, A.N., Ustyugov, Y.M., Design and Development of High-Strength and Ductile Ternary and Multicomponent Eutectoid Cu-Based Shape Memory Alloys: Problems and Perspectives, *Metals*, 2022, vol. 12, p. 1289. <https://doi.org/10.3390/met12081289>
15. Hull, D., Spontaneous Transformation of Metastable β -brass in Thin Foils, *Philosophical Magazine*, 1962, vol. 7, pp. 537-550. <https://doi.org/10.1080/14786436208212622>
16. Kajiwara, S., Strain-induced martensite structures of a Cu-Zn alloy, *Journal of the Physical Society of Japan*, 1971, vol. 30, p. 1757. <https://doi.org/10.1143/jpsj.30.1757>
17. Hornbogen, E., The effect of variables on martensitic transformation temperatures, *Acta Metallurgica*, 1985, vol. 33, no. 4, pp. 595-601. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(85\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(85)90024-0)
18. Пушин, В.Г., Куранова, Н.Н., Макаров, В.В., Свирид, А.Э., Уксусников, А.Н., Электронно-микроскопическое исследование метастабильных сплавов на основе Cu-Al-Ni с эффектом памяти формы, *Физика металлов и металловедение*, 2021, vol. 122, pp. 1196-1204. <https://doi.org/10.31857/S0015323021110115>
19. Хирш, П., Хови, А., Николсон, Р., Пэшли, Д., Уэлан, М., Электронная микроскопия тонких кристаллов, Москва: Мир, 1968.
20. Курдюмов, Г.В., Утевский, Л.М., Энтин, Р.И., Превращения в железе и стали, Москва: Наука, 1977.

C. 52-62

5. Научная статья

Сведения об авторах

Долженко Анастасия Сергеевна, к.т.н., м.н.с., НИУ «БелГУ», dolzhenko_a@bsuedu.ru,
Федосеева Александра Эдуардовна, д.т.н., с.н.с., НИУ «БелГУ», fedoseeva@bsuedu.ru.

УДК 539.3

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_63-83

Поступила в редакцию 23.10.2024; после доработки 16.12.2024; принята к публикации 16.12.2024

Влияние легирования и термической обработки на сопротивление ударным нагрузкам высокохромистых сталей мартенситного класса с низким содержанием азота и высоким содержанием бора

А. С. Долженко, А. Э. Федосеева*

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015 Белгород, ул. Победы 85, Россия

Высокохромистые стали мартенситного класса с низким содержанием азота и высоким содержанием бора являются перспективным материалом для изготовления элементов тепловых энергоблоков,

работающих на суперсверхкритических параметрах пара, которые должны обладать высоким сопротивлением ползучести и хорошим сопротивлением ударным нагрузкам. Во всех исследуемых сталях независимо от легирования и термической обработки формируется речная структура с высокой плотностью дислокаций, стабилизированная частицами $M_{23}(C,B)_6$, M_6C и NbX . Добавление рения вместе с изменением вольфрама/молибдена, а также содержание углерода обеспечивают снижение численной плотности зернограницных частиц $M_{23}(C,B)_6$, что позволяет снизить температуру хрупко-вязкого перехода на 15-20°C. Добавление меди ведет к формированию медных кластеров/частиц, что, напротив, увеличивает температуру хрупко-вязкого перехода на 25-30°C. Увеличение температуры закалки не влияет на положение хрупко-вязкого перехода для сталей, легированных медью, вольфрамом и молибденом с низким содержанием меди, хоть и смещает кривую Шарпи в сторону более низких энергий за счет увеличения размера исходных аустенитных зерен. Для рений-содержащей стали с высоким содержанием меди увеличение температуры закалки снижает температуру хрупко-вязкого перехода на 5-10°C за счет снижения количества медных кластеров/частиц. Модификация легирования путем увеличения содержания рения, вольфрама, меди вместе с изменением термической обработки обеспечили существенный прирост сопротивления ползучести, при этом сопротивление ударным нагрузкам остается на достаточно высоком уровне, выше 100 Дж·см⁻² при комнатной температуре, что отвечает требованиям, предъявляемым к котельным материалам и лопаткам паровых турбин.

Ключевые слова: жаропрочные мартенситные стали, легирование, термическая обработка, сопротивление ползучести, ударная вязкость, хрупко-вязкий переход, микроструктура

Effect of Alloying and Heat Treatment on Impact Resistance of Low Nitrogen, High Boron Martensitic High-Chromium Steels

A. S. Dolzhenko, A. E. Fedoseeva*

Belgorod National Research University, 308015 Pobeda, 85, Russia

High-chromium martensitic steels with low nitrogen and high boron contents are promising materials for the manufacture of thermal power units operating at ultra-supercritical steam parameters, which must have high creep resistance and good impact load resistance. In all the studied steels, regardless of alloying and heat treatment, a lath structure with a high dislocation density is formed, stabilized by $M_{23}(C,B)_6$, M_6C , and NbX particles. The addition of rhenium together with a change in tungsten/molybdenum, as well as the carbon content, ensure a decrease in the numerical density of grain boundary $M_{23}(C,B)_6$ particles, which allows reducing the ductile-brittle transition temperature by 15-20°C. The addition of copper leads to the formation of copper clusters/particles, which, on the contrary, increases the ductile-brittle transition temperature by 25-30°C. Increasing the quenching temperature does not affect the position of the ductile-brittle transition for steels alloyed with copper, tungsten, and molybdenum with a low copper content, although it shifts the Charpy curve towards lower energies due to an increase in the size of the prior austenite grains. For rhenium-containing steel with a high copper content, increasing the quenching temperature reduces the ductile-brittle transition temperature by 5-10°C due to a decrease in the number of copper clusters/particles. Modification of the alloying by increasing the content of rhenium, tungsten, and copper, together with a change in heat treatment, provided a significant increase in creep resistance, while the resistance to impact loads remains at a sufficiently high level, above 100 J·cm⁻² at room temperature, which meets the requirements for boiler materials and steam turbine blades.

Keywords: Heat-resistant martensitic steels, alloying, heat treatment, creep resistance, impact toughness, ductile-brittle transition, microstructure

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 24-79-10112).

Литература

1. Abe, F., Kern, T.-U., and Viswanathan, R., *Creep-resistant steels*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2008.
2. Kern, T.U., Staubli, M., and Scarlin, B., The European efforts in material development for 650°C USC power plants – COST522, *ISIJ Int.*, 2002, vol. 242, pp. 1515-1519. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1515>
3. Klueh, R.L., Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors, *International Materials Reviews*, 2005, vol. 50, pp. 287-310. <https://doi.org/10.1179/174328005X41140>

4. Koukal, J., Sondel, M., Schwarz, D., and Foldyna, V., Development and microstructure of advanced creep resistant ferritic steels, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2011, vol. 6, pp. 122–131. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2011.040441>
5. Abe, F., Tabuchi, M., and Tsukamoto S., Alloy Design of MARBN for Boiler and Turbine Applications at 650°C, *Materials at High Temperatures*, 2021, vol. 5, pp. 306–321. <https://doi.org/10.1080/09603409.2021.1963393>
6. Liua, Z., Liu, Zh., Wang, X., and Chen, Zh., Investigation of the microstructure and strength in G115 steel with the different concentration of tungsten during creep test, *Materials Characterization*, 2019, vol. 149, pp. 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.01.015>
7. Danielsen, H., Review of Z phase precipitation in 9–12 wt-%Cr steels, *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, pp. 126–137. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000066>
8. Dudova, N., Mishnev, R., and Kaibyshev, R., Creep behavior of a 10%Cr heat-resistant martensitic steel with low nitrogen and high boron contents at 650 °C, *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 766, pp. 138353. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138353>
9. Abe, F., Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels, *Procedia Eng.*, 2010, vol. 10, pp. 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.018>
10. Fedoseeva, A., Nikitin, I., Dudova, N., and Kaibyshev, R., Strain and temperature contributions to structural evolution in a Re-containing 10% Cr-3% Co-3% W steel during creep, *Materials at High Temperatures*, 2021, vol. 38, pp. 237-246. <https://doi.org/10.1080/09603409.2021.1924548>
11. Fedoseeva, A., Nikitin, I., Dudova, N., and Kaibyshev, R., Superior creep resistance of a high-Cr steel with Re additives, *Materials Letters*, 2020, vol. 262, 127183. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127183>
12. Fedoseeva, A. and Brazhnikov, I., Effect of normalizing temperature on the strengthening mechanisms of the advanced Re-containing 10%Cr steel with low N and high B contents, *Materials Letters*, 2023, vol. 350, 134971. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134971>
13. Fedoseeva, A., Klauz, A., and Kaibyshev, R., Improved creep strength of 10% Cr steels with low N and high B content via in-creasing quenching temperature, *Materials Characterization*, 2024, vol. 212, 113957. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113957>
14. Mishnev, R., Dudova, N., Dudko, V., and Kaibyshev, R., Impact toughness of a 10% Cr steel with high boron and low nitrogen contents, *Materials Science & Engineering A*, 2018, vol. 730, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.103>
15. Liu, Y., Sun, J., Li, J., Jiang, B., and Zhang, Ch., Investigation of forging process for eliminating delta ferrites in USC unites last stage blades steel 10Cr12Ni3Mo2VN, *Procedia Eng.* 2017, vol. 207, pp. 1797-1802. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.941>
16. Cui, Ch., Gao, X., Su, G., Gao, C., Liu, Zh., and Misra, R.D.K., Effect of thermal treatment on the evolution of delta ferrite in 11Cr–3Co–2.3W steel, *Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, pp. 2087-2096. <http://dx.doi.org/10.1080/02670836.2018.1510072>
17. Barrett, R., O'Donoghue, P., and Leen, S., A physically-based high temperature yield strength model for 9Cr steels, *Materials Science & Engineering A*, 2018, vol. 730, pp. 410-424. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.086>
18. Li, J., Cheng, L., Zhang, P., Wang, L., and Li, H., Effect of delta ferrites on the anisotropy of impact toughness in martensitic heat-resistant steel, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, pp. 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.008>
19. Borisova, J., Dudko, V., Mishnev, R., and Kaibyshev, R., Effect of Laves Phase on Ductile-Brittle Transition of 12 Pct Cr Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, vol. 50, pp. 3528–3543. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05269-y>
20. Fedoseeva, A., Dudova, N., and Kaibyshev, R., Role of Tungsten in the Tempered Martensite Embrittlement of a Modified 9%Cr Steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48, pp. 982-998. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3926-4>
21. Humphreys, F.J. and Hatherly, F.J.M. *Recrystallization, Related Annealing Phenomena: second ed.* Elsevier, Oxford, United Kingdom, 2004
22. Fedoseeva, A., Klauz, A., Iskandarov, N., Boev, A., Aksyonov, D., and Kaibyshev, R., Effect of the Cu additives on strain-induced coarsening of the Laves phase in Re-containing 10% Cr-3% Co martensitic steels, *Materials Science & Engineering A*, 2024, vol. 897, pp. 146306. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146306>
23. Maruyama, K., Sekido, N., and Yoshimi, K., Changes in strengthening mechanisms in creep of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb steel tested over wide ranges of creep conditions, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 190, pp. 104312. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104312>
24. Tkachev, E. and Belyakov, A., Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of an advanced Ta-alloyed 9%Cr steel. In *Proc.: EPRI's 9th International Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants and the 2nd International 123HiMAT Conf on High-Temperature Materials: Elect Power Res Inst*, Nagasaki, Japan, 2019, pp. 116-122. 10.31399/asm.cp.am-epri-2019p0116

25. Fedoseeva, A., Nikitin, I., Dudova, N., Hald, J., and Kaibyshev, R., Effect of the thermo-mechanical processing on the impact toughness of a 12% Cr martensitic steel with Co, Cu, W, Mo and Ta doping, *Metals*, 2022, vol. 12, 3. <https://doi.org/10.3390/met12010003>
26. Kostka, A., Tak, K-G, Hellmig, R.J., Estrin, Y., and Eggeler, G., On the contribution of carbides and micrograin boundaries to the creep strength of tempered martensite ferritic steels, *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, pp. 539–550. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.08.046>
27. Kan, L., Ye, Q., Shen, Y., Wang, Z., and Zhao, T., Co-precipitation of nanosized Cu and carbides improving mechanical properties of 1 GPa grade HSLA steel, *Materials Science & Engineering A*, 2022, vol. 859, 144211. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144211>
28. Miller, M.K., Russell, K.F., Sokolov, M.A., and Nanstad, R.K. APT characterization of irradiated high nickel RPV steels, *Journal of Nuclear Materials*, 2007, vol. 361, pp. 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.015>
29. Hu, J., Liu, K., Ma, L., Misra, R.D.K., Zhang, W., Du, H., and Xu, W., Significant improvement in strength and toughness of nanoscale precipitate–strengthened steel by direct quenching and tempering process, *Steel Research International*, 2021, vol. 92, 2000331. <https://doi.org/10.1002/srin.202000331>

C. 63–83

6. Научная статья

Сведения об авторах

Горшков Владимир Алексеевич, д. т. н., в. н. с., ИСМАН РАН, gorsh@ism.ac.ru
Горшенков Михаил Владимирович, к. т. наук, доц., НИТУ МИСИС, mvg@misis.ru,
Жевненко Сергей Николаевич, д. ф.-м.н., проф., НИТУ МИСИС, zhevnenko@misis.ru

УДК 669.018.9

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_84-96

Поступила в редакцию 24.10.2024; после доработки 03.12.2025; принята к публикации 03.12.2025.

СВС синтез МАХ-фаз $(Cr_{1-x}Mn_x)_2AlC$ и формирование структуры кермета высокой твердости при их капиллярном взаимодействии с расплавами меди

В. А. Горшков¹, М. В. Горшенков², С. Н. Жевненко^{2*}

¹ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук им А.Г. Мерджанова, 142432, г. Черноголовка, Россия

²ФГАОУВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», Москва, Ленинский пр-т, д.4, стр.1, 119049, Россия

В работе получили легированные марганцем фазы $(Cr_{1-x}Mn_x)_2AlC$, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Синтез проводили в реакторе объемом 3 л при начальном давлении аргона $P_n = 5$ МПа и с расчетными значениями $x = 0.05, 0.15$ и 0.30 . В образцах с марганцем рефлексы рентгеновской дифракции МАХ-фазы смещены относительно положения рефлексов Cr_2AlC , что указывает на замещение части атомов хрома атомами марганца. Оценка содержания марганца в МАХ-фазе проводилась методом микрорентгеноспектрального анализа после очистки фазы в соляной кислоте, концентрация марганца соответствует $x = 0.015, 0.035$ и 0.15 . Полученные фазы $(Cr_{1-x}Mn_x)_2AlC$ были спрессованы с остаточной пористостью 20%, а затем пропитаны расплавом меди. Пропитка производилась путем переноса капли расплава на поверхность и выдержки при $1150^\circ C$ в вакууме 10^{-3} Па. В результате исследования структуры пропитанной фазы показан полный или частичный распад МАХ-фаз и спайка отдельных зерен, что приводит к получению механически прочного образца. Формирующаяся субмикронная структура представляет собой наноразмерный каркас из карбида хрома пропитанного бронзой $Cu(Al, Cr, Mn)$. Оценка механических свойств производилась путем измерения микротвердости в пропитанной области и вне ее. Показано, что марганец снижает твердость композиционной структуры и при большом количестве марганца подавляет образование карбида хрома. Формирующиеся композиционные структуры с малым содержанием марганца или без него имеют высокий потенциал для применения в качестве износостойких, коррозионноустойчивых проводящих материалов.

Ключевые слова: МАХ-фаза, $(Cr_{1-x}Mn_x)_2AlC$, расплав меди, капиллярное взаимодействие

SHS Synthesis of MAX-Phases $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$ and Formation of a High-Hardness Cermet Structure via Their Capillary Interaction with Copper Melts

V. A. Gorshkov¹, M. V. Gorshenkov², S. N. Zhevnenko²

¹A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, 142432, Chernogolovka, Russia

²National University of Science and Technology MISIS, 4, bld. 1, Leninsky Prospekt, 119049, Moscow, Russia

In this work, manganese-doped $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$ phases were synthesized by self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The synthesis was carried out in a 3 l reactor under an initial argon pressure of $P_0 = 5$ MPa with the calculated x values of 0.05, 0.15, and 0.30. In the manganese-containing samples, the X-ray diffraction (XRD) reflections of the MAX phase are shifted relative to the positions of the Cr_2AlC reflections, indicating the substitution of a part of chromium atoms by manganese atoms. The manganese content in the MAX phase was estimated by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) after purifying the phase in hydrochloric acid. The measured manganese concentration corresponded to $x = 0.015$, 0.035, and 0.15. The synthesized $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$ phases were pressed to a residual porosity of 20% and then infiltrated with a copper melt. The infiltration was performed by transferring a melt droplet onto the surface and holding it at 1150°C in a vacuum of 10^{-3} Pa. The investigation of the infiltrated phase's structure revealed complete or partial decomposition of the MAX phases and the sintering of individual grains, resulting in a mechanically robust sample. The resulting submicron structure consists of a nanoscale framework of chromium carbide infiltrated with a $\text{Cu}(\text{Al}, \text{Cr}, \text{Mn})$ bronze. The mechanical properties were evaluated by measuring the microhardness both inside and outside the infiltrated region. It was shown that manganese reduces the hardness of the composite structure and, at high content, suppresses the formation of chromium carbide. The resulting composite structures with low or no manganese content show high potential for applications as wear-resistant, corrosion-resistant conductive materials.

Keywords: MAX phase, $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$, Copper melt

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00657

Литература

1. Gonzalez-Julian, J., Processing of MAX phases: From synthesis to applications, *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, vol. 104, no. 2, pp. 659–690. <https://doi.org/10.1111/jace.17544>
2. Fu, L. and Xia, W., MAX phases as nanolaminate materials: chemical composition, microstructure, synthesis, properties, and applications, *Advanced Engineering Materials*, 2021, vol. 23, no. 4, p. 2001191. <https://doi.org/10.1002/adem.202001191>
3. Лепакова, О.К., Итин, В.И., Астафурова, Е.Г., Еркаев, П.А., Китлер, В.Д., Афанасьев, Н.И., Синтез, фазовый состав, структура и прочностные свойства пористых материалов на основе соединения Ti_3SiC_2 , *Физическая мезомеханика*, 2016, 19, no. 2, pp. 108–113. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2016-00057>
4. Xiao, L.-O., Li, S.-B., Song, G., and Sloof, W.G., Synthesis and thermal stability of Cr_2AlC , *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, vol. 31, no. 8, pp. 1497–1502. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.01.009>
5. Shamsipoor, A., Farvizi, M., Razavi, M., and Keyvani, A., Influences of processing parameters on the microstructure and wear performance of Cr_2AlC MAX phase prepared by spark plasma sintering method, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 815, p. 152345. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152345>
6. Gonzalez-Julian, J., Onrubia, S., Bram, M., and Guillon, O., Effect of sintering method on the microstructure of pure Cr_2AlC MAX phase ceramics, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, vol. 124, no. 4, pp. 415–420. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.15263>
7. Sobolev, K., Pazniak, H., Farle, M., Rodionova, V., and Wiedwald, U., Synthesis, phase purification and magnetic characterization of the $(\text{Cr}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{AlC}$ MAX phase, *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, vol. 9, pp. 16516–16522. <https://doi.org/10.1039/D1TC03092B>
8. Mockuté, A., Dahlqvist, M., Emmerlich, J., Hultman, L., Schneider, J.M., Persson, P.O.Å., and Rosén, J., Synthesis and ab initio calculations of nanolaminated $(\text{Cr},\text{Mn})_2\text{AlC}$ compounds, *Physical Review B*, 2013, vol. 87, no. 9, p. 094113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.094113>
9. Hamm, C.M., Bocarsly, J.D., Seward, G., Kramm, U.I., and Birkel, C.S., Non-conventional synthesis and magnetic properties of MAX phases $(\text{Cr}/\text{Mn})_2\text{AlC}$ and $(\text{Cr}/\text{Fe})_2\text{AlC}$, *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, vol. 5, no. 23, pp. 5700–5708. <https://doi.org/10.1039/C7TC00112F>

10. Gorshkov, V.A., Miloserdov, P.A., Karpov, A.V., Shchukin, A.S., and Sytshev, A.E., Investigation of the composition and properties of a Cr₂AlC MAX phase-based material prepared by metallothermic SHS, *Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, pp. 471–475. <https://doi.org/10.1134/S0031918X19050041>
11. Shulpekov, A.M., Lepakova, O.K., and Afanasyev, N.I., SHS-synthesis of nanolaminate materials of the system Ti-Cr-Al-C and their term-oxidative stability, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1709, no. 1, p. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1709/1/012021>
12. Naguib, M., Barsoum, M.W., and Gogotsi, Y., Ten years of progress in the synthesis and development of MXenes, *Advanced Materials*, 2021, vol. 33, no. 39, p. 2103393. <https://doi.org/10.1002/adma.202103393>
13. Vahid Mohammadi, A., Rosen, J., and Gogotsi, Y., The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes), *Science*, 2021, vol. 372, no. 6547, p. eabf1581. <https://doi.org/10.1126/science.abf1581>
14. Duan, X., Fang, Z., Yang, T., Guo, C., Han, Z., Sarker, D., Hou, X., and Wang, E., Maximizing the mechanical performance of Ti₃AlC₂-based MAX phases with aid of machine learning, *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, vol. 11, no. 8, pp. 1307–1318. <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0612-4>
15. Fu, L. and Xia, W., MAX phases as nanolaminate materials: chemical composition, microstructure, synthesis, properties, and applications, *Advanced Engineering Materials*, 2021, vol. 23, no. 4, p. 2001191. <https://doi.org/10.1002/adem.202001191>
16. Tan, Y., Xia, Y., Teng, Z., Chen, C., Zhou, X., and Zhang, H., Synthesis and enhanced mechanical properties of compositionally complex MAX phases, *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, no. 8, pp. 4658–4665. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.027>
17. Petrus, M., Wozniak, J., Cygan, T., Pawlak, W., and Olszyna, A., Novel alumina matrix composites reinforced with MAX phases—microstructure analysis and mechanical properties, *Materials*, 2022, vol. 15, no. 19, p. 6909. <https://doi.org/10.3390/ma15196909>
18. Zhevnenko, S.N. and Gorshenkov, M.V., Wetting and spreading of Cu (Cr) melt over the Cr₂AlC MAX phase, *Materials Letters*, 2022, vol. 324, p. 132711. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132711>
19. Wei, H., Feng, G., Li, X., Zhan, W., Li, F., Dai, Y., and Zou, J., Preparation and tribological properties of Cr-C reinforced Cu/graphite composites decomposed in situ by Cr₂AlC, *Tribology International*, 2023, vol. 189, p. 108911. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108911>
20. Zhevnenko, S.N. and Gorshenkov, M.V., Capillary Phenomena during Interaction of Copper Melt with Dense and Porous MAX Phases with General Formula (Cr,Mn)₂AlC, *Physics of Metals and Metallography*, 2024, vol. 125, pp. 156–165. <https://doi.org/10.1134/S0031918X23602640>
21. Shelekhov, E.V. and Sviridova, T.A., Programs for X-ray analysis of polycrystals, *Metal Science and Heat Treatment*, 2000, vol. 42, pp. 309–313. <https://doi.org/10.1007/BF02471306>
22. Sobolev, K., Gorshenkov, M., Manfrinetti, P., Peddis, D., Pazniak, A., and Rodionova, V., Synthesis of phase-pure highly-doped MAX-phase (Cr_{1-x}Mn_x)₂AlC, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 15, pp. 21069–21076. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.109>
23. Mockute, A., Lu, J., Moon, E.J., Yan, M., Anasori, B., May, S.J., Barsoum, M.W. and Rosen, J., Solid Solubility and Magnetism upon Mn Incorporation in the Bulk Ternary Carbides Cr₂AlC and Cr₂GaC, *Materials Research Letters*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.944676>
24. Zhevnenko, S.N., Gorshenkov, M.V., and Petrov, I.S., Effect of B on improving wetting and imbibition of sintered porous Ta by Cu melt, *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 860, p. 157886. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157886>
25. Дмитриевский, А.А., Жигачева, Д.Г., Григорьев, Г.В., Овчинников, П.Н., Изменение микротвердости композиционной керамики на границе раздела CaO–ZrO₂/CaO–ZrO₂ + Al₂O₃, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2022, 4, pp. 30–33. <https://doi.org/10.31857/S1028096022040045>
26. Krell, A., A new look at grain size and load effects in the hardness of ceramics, *Materials Science and Engineering: A*, 1998, vol. 245, no. 2, pp. 277–284. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00724-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00724-7)
27. Еремина, М.А., Трифонов, И.С., Ломаева, С.Ф., Тарасов, В.В., Паранин, С.Н., Заяц, С.В., Структура и износостойкость нанокompозитов Cu-Cr₃C₂, *Физическая мезомеханика*, 2016, 19, no. 6, pp. 107–115.

C. 84–96

7. Научная статья

Сведения об авторах

Гуткин Михаил Юрьевич, д.ф.-м.н., гнс, ИПМаш РАН, m.y.gutkin@gmail.com

Скиба Николай Васильевич, д.ф.-м.н., внс, ИПМаш РАН, nikolay.skiba@gmail.com

УДК 538.9

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_97-107

Поступила в редакцию 03.11.2024; после доработки 02.12.2024; принята к публикации 02.12.2024

Формирование зигзагообразных деформационных двойников в алюминиевых нанопроволоках

М. Ю. Гуткин, Н. В. Скиба*

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Россия

Предложена теоретическая модель, описывающая микромеханизм образования зигзагообразных деформационных двойников в алюминиевых нанопроволоках с поверхностью, покрытой аморфным слоем оксида алюминия. В рамках двумерной модели такие двойники образуются путем последовательного зарождения двойниковых пластин в нанослое алюминия между его границами с аморфными оксидными пленками. При этом первичная двойниковая пластина образуется на каком-либо концентраторе напряжений вблизи одной из этих границ, вторичные двойниковые пластины зарождаются в местах концентрации напряжений на концах первичной пластины, и затем этот процесс циклически повторяется, т. е. новые двойниковые пластины зарождаются на концах предыдущих. Рассчитаны карты интенсивности сдвиговых напряжений по Мизесу и плотности упругой энергии, создаваемых первичной двойниковой пластиной. С помощью этих карт определены области зарождения и направления образования вторичных двойниковых пластин. Согласно результатам модели, последовательное зарождение деформационных двойников должно приводить к образованию зигзагообразной двойниковой структуры. Сделан вывод, что основная причина образования такой структуры в алюминиевой нанопроволоке состоит в наличии на ее поверхности оксидной аморфной оболочки, которая блокирует выход двойниковых прослоек на свободную поверхность нанопроволоки, что приводит к появлению все новых областей концентрации напряжений в местах их блокировки.

Ключевые слова: деформационное двойникование, зигзагообразные деформационные двойники, нанопроволоки, алюминий, аморфный оксид алюминия, теоретическая модель

Formation of Zigzag Deformation Twins in Aluminum Nanowires

M. Yu. Gutkin, N. V. Skiba

Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg 199178, Russia

A theoretical model is suggested that describes the micromechanism of formation of zigzag deformation twins in aluminum nanowires with a surface covered with an amorphous aluminum oxide layer. Within the framework of a two-dimensional model, such twins are formed by successive nucleation of twins in an aluminum nanolayer between its boundaries with amorphous oxide films. In this case, the primary twin is formed on some stress concentrator near one of these boundaries, secondary twins are generated in places of stress concentration at the ends of the primary twin, and then this process is repeated cyclically, i.e. new twins are generated at the ends of the previous ones. Maps of the intensity of von Mises shear stresses and the density of elastic energy created by the primary twin are calculated. Using these maps, the regions of the nucleation and directions of the formation of the secondary twins are determined. According to the results of the model, the successive nucleation of deformation twins should lead to the formation of a zigzag twin structure. It is concluded that the main reason for the formation of such a structure in an aluminum nanowire is the presence of an oxide amorphous layer on its surface, which blocks the exit of the twins to the free surface of the nanowire and leads to the appearance of new areas of stress concentration in the places of their blocking.

Keywords deformation twinning, zigzag deformation twins, nanowires, aluminum, amorphous aluminum oxide, theoretical model

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания для ИПМаш РАН (НИР № 124041100008-5).

Литература

1. Полухин, П.И., Горелик, С.С., Воронцов, В.К., *Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов*, М.: Металлургия, 1982.
2. Mahajan S. and Chin, G.Y., Formation of deformation twins in f.c.c. crystals, *Acta Metallurgica*, 1973, vol. 21, pp. 1353–1363. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90085-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90085-0)
3. Christian, J.W. and Mahajan, S., Deformation twinning. *Progress in Materials Science*, 1995, vol. 39, pp. 1–157. [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(94\)00007-7](https://doi.org/10.1016/0079-6425(94)00007-7)

4. Meyers, M.A., Vöhringer, O., and Lubarda, V.A., The onset of twinning in metals: a constitutive description, *Acta Mater.*, 2001, vol. 49, pp. 4025–4039. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7)
5. Zhu, Y.T., Liao, X.Z., and Wu, X.L., Deformation twinning in nanocrystalline materials, *Progress in Materials Science*, 2012, vol. 57, pp. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.001>
6. Ma, X., Zhu, Y., and Ramadan, M., Deformation twinning in nanocrystalline metals, *Encyclopedia of Smart Materials*, 2022, vol. 3, pp. 412–431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00144-3>
7. Weinberger, C.R. and Cai, W., Plasticity of metal nanowires, *Journal of Materials Chemistry*, 2012, vol. 22, pp. 3277–3292. <https://doi.org/10.1039/C2JM13682A>
8. Yue, Y., Gong, Q., and Zhang, Q., In situ atomistic deformation mechanisms study of nanowires, *Journal of Nanomaterials*, 2016, vol. 2016, art. no. 8497242. <https://doi.org/10.1155/2016/8497242>
9. Mordehai, D., David, O., and Kositski, R., Nucleation-controlled plasticity of metallic nanowires and nanoparticles, *Advanced Materials*, 2018, vol. 30, art. no. 1706710. <https://doi.org/10.1002/adma.201706710>
10. Yin, S., Cheng, G., Richter, G., Gao, H., and Zhu, Y., Transition of deformation mechanisms in single-crystalline metallic nanowire, *ACS Nano*, 2019, vol. 13, pp. 9082–9090. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b03311>
11. Seo, J.-H., Yoo, Y., Park, N.-Y., Yoon, S.-W., Lee, H., Han, S., Lee, S.-W., Seong, T.-Y., Lee, S.-C., and Lee, K.-B., Superplastic deformation of defect-free Au nanowires via coherent twin propagation, *Nano Lett.*, 2011, vol. 11, pp. 3499–3502. <https://doi.org/10.1021/nl2022306>
12. Sedlmayr, A., Bitzek, E., Gianola, D.S., Richter, G., Mönig, R., and Kraft, O., Existence of two twinning-mediated plastic deformation modes in Au nanowhiskers, *Acta Mater.*, 2012, vol. 60, pp. 3985–3993. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.018>
13. Roos, B., Kapelle, B., Richter, G., and Volkert, C.A., Surface dislocation nucleation controlled deformation of Au nanowires, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, art. no. 201908. <https://doi.org/10.1063/1.4902313>
14. Leach, A.M., McDowell, M., and Gall, K., Deformation of top-down and bottom-up silver nanowires, *Adv. Funct. Mater.*, 2007, vol. 17, pp. 43–53. <https://doi.org/10.1002/adfm.200600735>
15. Liang, W., Zhou, M., and Ke, F., Shape memory effect in Cu nanowires, *Nano Lett.*, 2005, vol. 5, pp. 2039–2043. <https://doi.org/10.1021/nl0515910>
16. Oh, S.H., Legros, M., Kiener, D., and Dehm, G., In situ observation of dislocation nucleation and escape in a submicrometre aluminium single crystal, *Nature Materials*, 2009, vol. 8, pp. 95–100. <https://doi.org/10.1038/nmat2370>
17. Han, X., Wang, L., Liu, P., Yue, Y., Yang, M., Sun, J., and Zhang, Z., Dynamic atomic mechanisms of plasticity of Ni nanowires and nano crystalline ultra-thin films, *Materials Science Forum*, 2010, vol. 654–656, pp. 2293–2296. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.2293>
18. Mompiau, F., Legros, M., Sedlmayr, A., Gianola, D.S., Caillard, D., and Kraft, O., Source-based strengthening of sub-micrometer Al fibers, *Acta Mater.*, 2012, vol. 60, pp. 977–983. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.11.005>
19. Wang, L., Teng, J., Sha, X., Zou, J., Zhang, Z., and Han, X., Plastic deformation through dislocation saturation in ultrasmall Pt nanocrystals and its in situ atomistic mechanisms, *Nano Letters*, 2017, vol. 17, pp. 4733–4739. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01416>
20. Kim, S.H., Kim, H.K., Seo, J.H., Whang, D.M., Ahn, J.P., and Lee, J.C., Deformation twinning of ultrahigh strength aluminum nanowire, *Acta Mater.*, 2018, vol. 160, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.047>
21. Kim, S.H., Park, J.H., Kim, H.K., Ahn, J.P., Whang, D.M., and Lee, J.C., Twin boundary sliding in single crystalline Cu and Al nanowires, *Acta Mater.*, 2020, vol. 196, pp. 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.028>
22. Seo, J.-H., Park, H.-S., Yoo, Y., Seong, T.-Y., Li, J., Ahn, J.-P., Kim, B., and Choi, I.-S., Origin of size dependency in coherent-twin-propagation-mediated tensile deformation of noble metal nanowires, *Nano Lett.*, 2013, vol. 13, pp. 5112–5116. <https://doi.org/10.1021/nl402282n>
23. Chen, L.Y., Richter, G., Sullivan, J.P., and Gianola, D.S., Lattice anharmonicity in defect-free Pd nanowhiskers, *Phys. Rev. Lett.*, 2012, vol. 109, art. no. 125503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.125503>
24. Bobylev, S.V., Gutkin, M.Yu., and Ovid'ko, I.A., Partial and split dislocation configurations in nanocrystalline metals, *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 73, art. no. 064102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.064102>
25. Gutkin, M.Yu. and Ovid'ko, I.A., Generation of dislocation loops in deformed nanocrystalline materials, *Phil. Mag.*, 2006, vol. 86, pp. 1483–1511. <https://doi.org/10.1080/14786430500199302>
26. Бобылев, С.В., Гуткин, М.Ю., Овидько, И.А., Генерация скользящих полупетель расщепленных дислокаций границами зерен в нанокристаллическом Al. *Физика твердого тела*, 2006, т. 48, no. 8, с. 1410–1420.
27. Gutkin, M.Yu., Ovid'ko, I.A., and Skiba, N.V., Generation of deformation twins in nanocrystalline metals: theoretical model, *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 74, art. no. 172107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.172107>

28. Гуткин, М.Ю., Овидько, И.А., Скиба, Н.В., Механизм образования деформационных двойников в нанокристаллических материалах. *Физика твердого тела*, 2007, 49, no. 5, с. 830-838.
29. Gutkin, M.Yu., Ovid'ko, I.A., and Skiba, N.V., Crack-stimulated generation of deformation twins in nanocrystalline metals and ceramics, *Philos. Mag.*, 2008, vol. 88, pp. 1137-1151. <https://doi.org/10.1080/14786430802070813>
30. Hirth, J.P. and Lothe, J., *Theory of Dislocations*. New York: Wiley, 1982.
31. Gutkin, M.Yu. and Romanov, A.E., Straight edge dislocations in a thin two-phase plate. I. Elastic stress fields, *Phys. stat. sol. (a)*, 1991, vol. 125, pp. 107-125. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211250108>
32. Гуткин, М.Ю., Овидько, И.А., *Физическая механика деформируемых наноструктур. Том II. Нанослойные структуры*. СПб: Янус, 2005.
33. Mura, T., The continuum theory of dislocations, in *Advances in Material Research*, Herman, H., Ed., New York: Interscience, 1968, vol. 3, pp. 1-108.
34. Работнов, Ю.Н., *Механика деформируемого твердого тела*. М.: Наука, 1988.
35. Liao, X.Z., Zhou, F., Lavernia, E.J., Srinivasan, S.G., Baskes, M.I., He, D.W., and Zhu, Y.T., Deformation mechanism in nanocrystalline Al: Partial dislocation slip, *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 83, p.p. 632-634. <https://doi.org/10.1063/1.1594836>
36. Liao, X.Z., Zhou, F., Lavernia, E.J., He, D.W., and Zhu, Y.T., Deformation twins in nanocrystalline Al, *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 83, pp. 5062-5064. <https://doi.org/10.1063/1.1633975>
37. Chen, M., Ma, E., Hemker, K.J., Sheng, H., Wang, Y., and Cheng, X., Deformation twinning in nanocrystalline aluminum, *Science*, 2003, vol. 300, pp. 1275-1277. <https://doi.org/10.1126/science.1083727>
38. Han, W.Z., Cheng, G.M., Li, S.X., Wu, S.D., and Zhang, Z.F., Deformation induced microtwins and stacking faults in aluminum single crystal, *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101, art. no. 115505. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.115505>
39. Yamakov, V., Wolf, D., Phillpot, S.R., and Gleiter, H., Deformation twinning in nanocrystalline Al by molecular dynamics simulation, *Acta Mater.*, 2002, vol. 50, pp. 5005–5020. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00318-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00318-X)
40. Shimokawa, T., Nakatani, A., and Kitagawa, H., Grain-size dependence of the relationship between intergranular and intragranular deformation of nanocrystalline Al by molecular dynamics simulations, *Physical Review B*, 2005, vol. 71, art. no. 224110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.224110>

C. 97–107

8. Научная статья

Сведения об авторах

Лотков Александр Иванович, д.ф.-м.н., гнс ИФПМ СО РАН, lotkov@ispms.ru,
 Гришков Виктор Николаевич, к.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, grishv@ispms.ru,
 Гирсова Наталья Васильевна, вед. инженер ИФПМ СО РАН, girsova@ispms.tsc.ru,
 Жапова Доржима Юрьевна, к.ф.-м.н., нс ИФПМ СО РАН, dorzh@ispms.ru,
 Миронов Юрий Петрович, к.ф.-м.н., нс ИФПМ СО РАН, myr@ispms.ru,
 Гусаренко Ангелина Андреевна, мнс ИФПМ СО РАН, aag@ispms.ru,
 Бобров Дмитрий Иванович, вед. инженер ИФПМ СО РАН, chromium76@gmail.com.

УДК 669.539.2.539.37

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_108-119

Поступила в редакцию 08.11.2024; после доработки 11.12.2024; принята к публикации 11.12.2024

Структурно-фазовое состояние, механические и неупругие свойства сплава $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$ после интенсивной пластической деформации методом абс-прессования при 573 К

А. И. Лотков¹, В. Н. Гришков¹, Н. В. Гирсова¹, Д. Ю. Жапова¹,
Ю. П. Миронов¹, А. А. Гусаренко^{1*}, Д. И. Бобров¹

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055 Россия

Исследовано структурно-фазовое состояние, механические и неупругие свойства сплава $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$ после интенсивной пластической деформации методом абс-прессования при 573 К. Установлено, что сравнительно низкая температура (573 К) абс-прессования образцов сплава $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$ и большая величина заданной образцам истинной деформации ($e = 7.43$) не повлияла на температуру начала

мартенситного превращения $B2 \rightarrow R$, а температуры начала и конца прямого мартенситного превращения в фазу $B19'$ и обратных МП понизились всего на 15 ± 2 градусов. Обнаружено, что после деформации образцов методом abc-прессования при 573 К до $e = 7.43$ резко понизилось напряжение мартенситного сдвига τ_m (с 230 до 100 МПа) и существенно сократилась протяжённость площадки псевдотекучести (с 7.5 до 3.5%). Кроме того, резко увеличилась величина напряжения перехода от стадии деформационного упрочнения к стадии активной пластической деформации (с 835 до 1300 МПа). Обнаружено, что зависимости величин эффектов памяти формы $\gamma_{\text{ЭПФ}}$, сверхэластичности $\gamma_{\text{СВ}}$ и пластической составляющей заданной деформации $\gamma_{\text{ПЛ}}$ от величины заданной образцам общей деформации γ_t как в исходном состоянии, так и после abc-прессования имеют подобный вид и близки по величине. Показано, что после abc-прессования с $e = 7.43$ образцам может быть задана суммарная неупругая деформация $\gamma_{\text{СНД}} = \gamma_{\text{СВ}} + \gamma_{\text{ЭПФ}}$ величиной почти 8% и вся эта деформация после снятия с образцов внешнего напряжения возвращается в виде эффектов сверхэластичности и памяти формы.

Ключевые слова: Мартенситные превращения, интенсивная пластическая деформация, abc-прессование, эффект памяти формы.

Structural-Phase State, Mechanical and Inelastic Properties of $\text{Ti}_{49.8}\text{Ni}_{50.2}$ Alloy after Severe Plastic Deformation by Abc-Pressing at 573 K

A. I. Lotkov¹, V. N. Grishkov¹, N. V. Girsova¹, D. Y. Zhapova¹, Y. P. Mironov¹,
A. A. Gusarenko^{1*}, D. I. Bobrov¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055 Russia

The structural-phase state, mechanical and inelastic properties of $\text{Ti}_{49.8}\text{Ni}_{50.2}$ alloy after severe plastic deformation by abc-pressing at 573 K were investigated. It was found that abc-pressing of $\text{Ti}_{49.8}\text{Ni}_{50.2}$ alloy samples at the relatively low temperature (573 K) and the large value of true strain ($e = 7.43$) did not affect the temperature of the onset of $B2 \rightarrow R$ martensite transformation. At the same time, the temperatures of the onset and end of direct MT into the $B19'$ phase and reverse MT decreased by only 15 ± 2 degrees. After the abc-pressing at 573 K to $e = 7.43$, the martensitic shear stress τ_m sharply decreased (from 230 to 100 MPa) and the length of the pseudo-yield plateau significantly decreased (from 7.5 to 3.5%). In addition, the value of the transition stress from the strain hardening stage to the active plastic deformation stage sharply increased (from 835 to 1300 MPa). It was found that the dependences of the values of the shape memory effect γ_{SME} , superelasticity γ_{SE} and the plastic component of the total deformation γ_{TP} on the value of the total strain γ_t both in the initial state and after abc-pressing have a similar appearance and are close in magnitude. It was shown that after abc-pressing with $e = 7.43$, the samples can be specified a total inelastic strain $\gamma_{\text{TIS}} = \gamma_{\text{SE}} + \gamma_{\text{SME}}$ of about 8%, which returns in the form of superelasticity and shape memory effects.

Keywords Martensite transformations, severe plastic deformation, abc-pressing, shape memory effect

Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания ИФПМ СО РАН (проект № FWRW-2021-0004).

Литература

1. Estrin, Y. and Vinogradov, A., Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 2782–2817. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.038>
2. Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., and Zhu, Y.T., Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials, *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 94, pp. 462–540. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002>
3. Bagherpour, E., Pardis, N., Reihanian, M., and Ebrahimi, R., An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 100, pp. 1647–1694. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2652-z>
4. Усманов, Э.И., Резяпова, Л.Р., Валиев, Р.З., Высокопрочное состояние и механизмы упрочнения титана с ультрамелкозернистой структурой. *Физическая мезомеханика*, 2023, 26, no. 3, С. 5–17. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_3_5
5. Lowe, T.C., Valiev, R.Z., Li, X., and Ewing, B.R., Commercialization of bulk nanostructured metals and alloys, *MRS Bulletin*, 2021, vol. 46, pp. 265–272. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00060-0>

6. Mironov, S.Yu., Salishchev, G.A., Myshlyaev, M.M., and Pippan, R., Evolution of misorientation distribution during warm “abc” forging of commercial-purity titanium, *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 418, pp. 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.026>
7. Kashin, O., Lotkov, A.I., Grishkov, V., Krukovskii, K., Zhapova, D., Mironov, Y., Girsova, N., Kashina, O., and Barmina, E., Effect of abc Pressing at 573 K on the Microstructure and Martensite Transformation Temperatures in $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ (at.%), *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1145. <https://doi.org/10.3390/met11071145>
8. Kashin, O., Krukovskii, K., Lotkov, A., and Grishkov, V., Effect of True Strains in Isothermal abc Pressing on Mechanical Properties of $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ Alloy, *Metals*, 2020, vol. 10, p. 1313. <https://doi.org/10.3390/met10101313>
9. Lotkov, A., Kashin, O., Grishkov, V., Zhapova, D., Krukovskii, K., Gusarenko, A., Girsova, N., Bobrov, D., and Kashina, O., Mechanical Properties of the $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ Alloy after Multi-Axial Forging at 573 K, *Metals*, 2022, vol. 12, p. 1043. <https://doi.org/10.3390/met12061043>
10. Jani, M., Leary, M., Subic, A., and Gibson, M.A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
11. Wadood, A., Brief Overview on Nitinol as Biomaterial, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 2016, p. 9. <https://doi.org/10.1155/2016/4173138>
12. O'Brien, B., Weafer, F.M., and Bruzzi, M.S., Shape memory alloys for use in medicine, *Comprehensive Biomaterials*, 2017, vol. II, no. 1, pp. 50–78. <https://colab.ws/articles/10.1016%2FB978-0-08-055294-1.00014-3>
13. Prokoshkin, S.D., Brailovski, V., Inaekyan, K.E., Demers, V., Khmelevskaya, I.Y., Dobatkin, S.V., and Tatyani, E.V., Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti-Ni shape memory alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 481–482, pp. 114–118. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.150>
14. Jiang, S., Zhang, Y., Zhao, L., and Zheng, Y., Influence of annealing on NiTi shape memory alloy subjected to severe plastic deformation, *Intermetallics*, 2013, vol. 32, pp. 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.07.025>
15. Ahadi, A., and Sun, Q., Effects of grain size on the rate-dependent thermomechanical responses of nanostructured superelastic NiTi, *Acta Materialia*, 2014, vol. 76, pp. 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.007>
16. Yan, B., Jiang, S., Sun, D., Wang, M., Yu, J., and Zhang, Y., Martensite twin formation and mechanical properties of B2 austenite NiTi shape memory alloy undergoing severe plastic deformation and subsequent annealing, *Materials Characterization*, 2021, vol. 178, p. 111273. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111273>
17. Polyakova, K.A. and Komarov, V.S., Effect of Annealing Temperature and Time on Martensitic Transformation Temperatures and Mechanical Properties of the Ti–50.7 at % Ni Shape Memory Alloy, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2021, vol. 62, pp. 531–538. <https://doi.org/10.3103/S1067821221050114>
18. Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H., and Jonas, J.J., Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions, *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 60, pp. 130–207. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>
19. Lotkov, A.I., Grishkov, V.N., Kashin, O.A., Baturin, A.A., Zhapova, D.Yu. and Timkin, V.N., Mechanisms of microstructure evolution in TiNi-based alloys under warm deformation and its effect on martensitic transformations, In *Shape Memory Alloys: Properties, Technologies, Opportunities, Materials Science Foundation* (eds. Rubanic, V.V. and Resnina, N.N.), Trans Tech. Publication, Switzerland, 2015, pp. 245–259.
20. Grishkov, V.N., Lotkov, A.I., Baturin, A.A., Timkin, V.N., and Zhapova, D.Yu., Comparative analysis of inelastic strain recovery and plastic deformation in $Ti_{49.1}Ni_{50.9}$ (at.%) alloy under torsion and bending, *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1683, p. 020067–1–020067–5. <https://doi.org/10.1063/1.4932757>
21. Padmanadhan, K.A., Vasin, R.A., and Enikeev, F.V., *Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics*, Springer Berlin, Heidelberg, 2001. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04367-7>
22. Прокошкин, С.Д., Коротичкий, А.В., Браиловский, В., Инаекян, К.Э., Дубинский, С.М., Кристаллическая решётка мартенсита и ресурс обратимой деформации термически и термомеханически обработанных сплавов Ti–Ni с памятью формы. *Физика металлов и металловедение*, 2011, 112, no. 2, С. 180–198.
23. Чумляков, Ю.И., Киреева, И.В., Панченко, Е.Ю., Тимофеева, Е.Е., *Механизм термоупругих мартенситных превращений в высокопрочных монокристаллах сплавов на основе железа и никелида титана*. НТЛ, Томск, 2016.

9. Научная статья

Сведения об авторах

Беляев Сергей Павлович, д.ф.-м.н., в.н.с., СПбГУ, spbelyaev@mail.ru,
Реснина Наталья Николаевна, д.ф.-м.н., проф., СПбГУ, resnat@mail.ru,
Поникарова Ирина Викторовна, к.ф.-м.н., доц., СПбГУ, ivp2001@yandex.ru,
Сибирев Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., в.н.с., СПбГУ, alekspsb@list.ru,
Иванов Алексей Максимович, асс., СПбГУ, a.ivanov@spbu.ru,
Бикбаев Рашид Менналиевич, инж., СПбГУ, bikbaevrm@yandex.ru,
Трофимова Марина Евгеньевна, студ., СПбГУ, trofimovame852@gmail.com,
Глухов Максим Юрьевич, студ., СПбГУ, st114008@student.spbu.ru,
Орлов Владимир Евгеньевич, студ., СПбГУ, st094152@student.spbu.ru,
Базлов Андрей Игоревич, к.т.н., доц., НИТУ «МИСИС», bazlov@misis.ru,
Гундеров Дмитрий Валерьевич, д.ф.-м.н., проф., ИФМК УФИЦ РАН, dimagun@mail.ru.

УДК 539.51:538.911

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_120-133

Поступила в редакцию 11.11.2024; после доработки 22.11.2024; принята к публикации 22.11.2025

Изменение температур мартенситных переходов и плотности дефектов при термоциклировании сплава Ti-Hf-Ni-Cu с разным размером зерна

С. П. Беляев¹, Н. Н. Реснина¹, И. В. Поникарова¹, А. В. Сибирев¹, А. М. Иванов¹, Р.
М. Бикбаев¹, М. Е. Трофимова¹, М. Ю. Глухов¹, В. Е. Орлов¹, А. И. Базлов^{1,2}, Д.
В. Гундеров³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049, Россия

³ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, 450054, Россия

Изменение температур мартенситных переходов, удельного электросопротивления и плотности дислокаций исследовали на протяжении 500 термоциклов в образцах сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ с размером зерна от 130 до 0.16 мкм. Установлено, что максимальное изменение температур превращения наблюдается в крупнозернистом образце, а минимальное – в образце с размером зерна 0.16 мкм. При термоциклировании сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ температуры $B2 \leftrightarrow B19'$ перехода могут уменьшаться, увеличиваться или не меняться. Анализ изменения плотности дислокаций и относительного электросопротивления, измеренного в аустенитном и мартенситном состояниях, показал, что эти величины изменяются немонотонно с числом циклов. В образцах сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ со средним размером зерна 16 и 0.16 мкм, плотность дислокаций и электросопротивление увеличиваются в первых 50-200 цикла, а затем уменьшаются, что никак не влияет на изменение температур переходов при термоциклировании. Результаты работы указывают на то, что изменение плотности дислокаций не является основной причиной изменения температур мартенситных переходов при термоциклировании.

Ключевые слова: Термоциклическая стабильность; Мартенситные превращения; Сплавы на основе TiNi; Плотность дислокаций; Размер зерна

Variation in the Temperatures of the Martensitic Transformations and the Defect Density on Thermal Cycling of the Ti-Hf-Ni-Cu Alloys with Various Grain Size

S. P. Belyaev¹, N. N. Resnina¹, I. V. Ponikarova¹, A. V. Sibirev¹, A. M. Ivanov¹, R.
M. Bikbaev¹, M. E. Trofimova¹, M. Yu. Glukhov¹, V. E. Orlov¹, A. I. Bazlov^{1,2},
D. V. Gunderov³

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034 Russia

² National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049 Russia

³ Institute of Molecule and Crystal Physics of Ufa Federal Research Centre of the RAS, Ufa, 450075, Russia

The variation in martensitic transformation temperatures, resistivity and dislocation density were studied during 500 thermal cycles of the $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ alloy with various grain sizes varied from 130 to 0.16 μm . It was found that the maximum transformation temperature variation was observed in the sample with an average

grain size of 130 μm , and the minimum temperature change was found in the sample with a grain size of 0.16 μm . It was shown that on thermal cycling of the $\text{Ti}_{40.7}\text{Hf}_{9.5}\text{Ni}_{44.8}\text{Cu}_5$ alloy, the transformation temperatures might decrease, increase or to be constant and it had no relation to grain size. The analysis of the variation in dislocation density measured by Williamson-Hall technique and the variation in resistivity determined in the austenite and martensite states showed that these values changed non-monotonically on a rise in thermal cycle number. In the $\text{Ti}_{40.7}\text{Hf}_{9.5}\text{Ni}_{44.8}\text{Cu}_5$ alloy with grain size of 16 or 0.16 μm , the dislocation density and resistivity increased during first 50-200 cycles and then decreased that did not influence the transformation temperature variation. The obtained results showed that the variation in the dislocation density was not the only reason for the variation in the transformation temperatures on thermal cycling.

Keywords: Thermal cycling stability, Martensitic transformations, TiNi-based alloys, dislocation density, Grain size

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00280.

References

1. Otsuka, K. and Ren, X., Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress Mater. Sci.*, 2005, vol. 50, pp. 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>.
2. Razov, A.I., Application of titanium nickelide-based alloys in engineering, *Phys. Met. Metal.*, 2004, vol. 97, pp. 97–126.
3. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., and Gibson, M.A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Mater. Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
4. Van Humbeeck, J. Non-medical applications of shape memory alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 1999, vol. 273-275, pp. 134-148. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00293-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00293-2).
5. Abubakar, R.A., Wang, F., and Wang, L., A review on Nitinol shape memory alloy heat engines, *Smart Mater. Struct.*, 2021, vol. 30, p. 013001, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abc6b8>
6. Miyazaki, S., Igo, Y., and Otsuka, K., Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti-Ni alloys, *Acta Metall.*, 1986, vol. 34, pp. 2045 – 2051, [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90263-4](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90263-4)
7. Furuya, Y. and Park, Y.C., Thermal cyclic deformation and degradation of shape memory effect in Ti-Ni alloy, *Nondestr Test Eval.*, 1992, vol. 8-9, pp. 541-554, <https://doi.org/10.1080/10589759208952731>
8. McCormick, P.G. and Liu, Y., Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi–II. Effect of transformation cycling, *Acta Metall. Mater.*, 1994, vol. 42, pp. 2407-2413, [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90318-2](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90318-2)
9. Matsumoto, H., Transformation behaviour with thermal cycling in NiTi alloys, *J. Alloys Compd.*, 2003, vol. 350, pp. 213-217, [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00982-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00982-9)
10. Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., and Wagner, M., Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, vol. 378, pp. 24 – 33. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.327>
11. Li, Y., Mi, X., and Gao, B., Effects of thermomechanical cycling on the shape memory behavior and transformation temperatures of a Ni50.2Ti49.8 alloy, *J. Tan: Rare Metals*, 2008, vol. 27, pp. 522-525. [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(08\)60174-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(08)60174-6)
12. Sun, H., Pathak, A., Luntz, J., Brei, D., Alexander, P.W., and Johnson, N.L., Stabilizing shape memory alloy actuator performance through cyclic shakedown: an empirical study, in: L.P., Davis, B.K., Henderson, M.B., McMickell (Eds.), *Ind. Commer. Appl. Smart Struct. Technol.* 2008: p. 69300Q. <https://doi.org/10.1117/12.775998>.
13. Saikrishna, C.N., Ramaiah, K.V., Allam Prabhu, S., and Bhaumik, S.K., On stability of NiTi wire during thermo-mechanical cycling, *Bull. Mater. Sci.*, 2009, vol. 32, pp. 343-352. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0049-1>
14. Resnina, N. and Belyaev, S., Multi-stage martensitic transformations induced by repeated thermal cycling of equiatomic TiNi alloy, *J. Alloys Compd.*, 2009, vol. 486, pp. 304–308, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.132>.
15. Jones, N.G. and Dye, D., Martensite evolution in a NiTi shape memory alloy when thermal cycling under an applied load, *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 1348-1358. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.03.032>
16. Pelton, A.R., Huang, G.H., and Moine, P., Sinclair, R., Effects of thermal cycling on microstructure and properties in Nitinol, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, vol. 532, pp. 130-138, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.073>
17. Zhang, J., Somsen, C., Simon, T., Ding, X., Hou, S., Ren, S., Ren, X., Eggeler, G., Otsuka, K., and Sun, J., Leaf-like dislocation substructures and the decrease of martensitic start temperatures: A new explanation for

- functional fatigue during thermally induced martensitic transformations in coarse-grained Ni-rich Ti–Ni shape memory alloys, *Acta Mater.*, 2012, vol. 60, pp. 1999–2006, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.014>
18. Belyaev, S., Resnina, N., and Sibirev, A., Peculiarities of residual strain accumulation during thermal cycling of TiNi alloy, *J. Alloys Compd.*, 2012, vol. 542, pp. 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.082>
 19. Belyaev, S., Resnina, N., Sibirev, A., Accumulation of Residual Strain in TiNi Alloy During Thermal Cycling, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2014, vol. 23, pp. 2339–2342. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0982-z>
 20. Wang, X., Verlinden, B., and Van Humbeeck, J., Effect of post-deformation annealing on the R-phase transformation temperatures in NiTi shape memory alloys, *Intermetallics*, 2015, vol. 62, pp. 43–49, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.03.00>
 21. Sibirev, A., Resnina, N., and Belyaev, S., Relationship between the variation in transformation temperatures, resistivity and dislocation density during thermal cycling of Ni50Ti50 shape memory alloy, *Int. J. Mater. Res.*, 2019, vol. 110, pp. 387–392. <https://doi.org/10.3139/146.111755>
 22. Coduri, M., Lausi, A., and Tuissi, A., The High Performance Shape Memory Effect P-SME in Ni Rich NiTi Wires: In Situ X-Ray Diffraction on Thermal Cycling, *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 33, p. 03008, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153303008>
 23. Churakova, A. and Gunderov, D., Increase in the dislocation density and yield stress of the Ti50Ni50 alloy caused by thermal cycling, *Mater. Today: Proc.*, 2017, vol. 4, pp. 4732–4736, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.061>
 24. Liu, Y. and McCormick, P.G., Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi – I Effect of heat treatment on transformation behavior, *Acta Metal. Mater.*, 1994, vol. 42, pp. 2401–2406. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90318-2](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90318-2)
 25. Wollants, P., Roos, J.R., and Delaey, L., Thermally- and stress-induced thermoelastic martensitic transformations in the reference frame of equilibrium thermodynamics, *Progress Mater. Sci.*, 1993, vol. 37, pp. 227 - 318. [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(93\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0079-6425(93)90005-6)
 26. Sibirev, A., Ubyivovk, E., Belyaev, S., and Resnina, N., In situ transmission electron microscopy study of martensite boundaries movement on cooling and heating of the NiTi shape memory alloy, *Mater. Lett.*, 2022, vol. 319, p 132267. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132267>
 27. Сибирев, А.В., Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы, Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Санкт-Петербург: Лема. 2024. – 197с.
 28. Churakova, A. and Gunderov, D., Increase in the dislocation density and yield stress of the Ti50Ni50 alloy caused by thermal cycling, *Mater. Today: Proceed.*, 2017, vol. 4, pp. 4732–4736. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.061>
 29. Churakova, A. and Gunderov, D., Microstructural and Mechanical Stability of a Ti-50.8 at.% Ni Shape Memory Alloy Achieved by Thermal Cycling with a Large Number of Cycles, *Metals*, 2020, vol. 10, p. 227. <https://doi.org/10.3390/met10020227>
 30. Churakova, A., Kayumova, E., Gunderov, D., and Magomedova, D., Interrelation of microstructure and kinetics of martensitic transformations in TiNi alloy in different structural states under thermal cycling conditions, *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2533, p. 020049. <https://doi.org/10.1063/5.0100012>
 31. Resnina, N., Belyaev, S., Shelyakov, A., Ubyivovk, E., and Ponikarova, A., Stability of the B2 ↔ B19' martensitic transformation on thermal cycling of Ti-Hf-Ni-Cu thin ribbons, *Mater. Lett.*, 2024, vol. 357, p. 135770. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135770>
 32. Mironov, Yu.P., Lotkov, A.I., Grishkov, V.N., Laptev, R.S., Gusarenko, A.A., and Barmina, E.G., Changes in the Structural-Phase State and Dislocation Density of Ti49.8Ni50.2 Alloy Depending on the Isochronal Annealing Temperature after Severe Plastic Deformation by abc Pressing at 573 K, *Phys. Mesomech.*, 2024, vol. 27, pp. 175–182. <https://doi.org/10.1134/S1029959924020061>
 33. Surikova, N.S. and Chumlyakov, Y.I., Mechanisms of plastic deformation of the titanium nickelide single crystals, *Phys. Metals Metall.*, 2000, vol. 89, pp. 196 – 205.
 34. Ezaz, T., Wang, J., Sehitoglu, H., and Maier, H.J., Plastic deformation of NiTi shape memory alloys, *Acta Mater.*, 2013, vol. 61, pp. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.023>
 35. Пушин, В.Г., Кондратьев, В.В., Хачин, В.Н., Предпереходные явления и мартенситные превращения, Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 368 с.
 36. Ren, X., *Strain Glass and Strain Glass Transition. Springer Series in Materials Science*, 2011, vol. 148, pp. 201 - 225. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20943-7_11
 37. Resnina, N., Belyaev, S., Shelyakov, A., Rubanik, V., Rubanik (Jr), V., Konopleva, R., Chekanov, V., Ubyivovk, E., and Krzhizhanovskaya, M., Pre-martensitic phenomena in Ti40.7Hf9.5Ni44.8Cu5 shape memory alloy, *Intermetallics*, 2015, vol. 67, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.07.018>
 38. Sibirev, A., Belyaev, S., and Resnina, N., Influence of holding between the thermal cycles on recovery in martensitic transformation temperatures in TiNi alloy, *Lett. Mater.*, 2019, vol. 9, pp. 103–106. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-1-103-106>

10. Научная статья

Сведения об авторах

Гулов Михаил Александрович, м.н.с., ИТПМ СО РАН, gulovy@itam.nsc.ru,

Герцель Илья Сергеевич, м.н.с., ИТПМ СО РАН, gertsel@itam.nsc.ru,

Маликов Александр Геннадьевич, д.т.н., в.н.с., зав. лаб., ИТПМ СО РАН, smalik@itam.nsc.ru.

УДК 621.793.79

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_134-147

Поступила в редакцию 21.08.2024; после доработки 14.10.2025; принята к публикации 14.10.2025

Применение дополнительного нагрева подложки для прямого лазерного выращивания Inconel 738

М. А. Гулов¹, И. С. Герцель¹, А. Г. Маликов¹

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, 630090, Россия*

Исследован процесс наплавки никелевого сплава Inconel 738 методом прямого лазерного выращивания. Показано, что использование дополнительного нагрева подложки до 750°C приводит к предотвращению возникновения трещин в материале. Изучено влияние дополнительного нагрева в процессе наплавки на структурно-фазовый состав формируемого материала. Показано, что дополнительный нагрев способствует увеличению размера зерен, изменению их формы и направления роста. С использованием электронной микроскопии исследована микроструктура образцов и проведено исследование распределения легирующих элементов внутри и на границах зерен в зависимости от температуры дополнительного нагрева подложки. С использованием синхротронного излучения установлено, что применение дополнительного нагрева подложки до 750°C в процессе прямого лазерного выращивания Inconel 738 приводит к формированию карбидов типа $M_{23}C_6$ и обогащению металлической матрицы упрочняющими γ' (Ni_3Al) и γ'' (Nb_3Al) фазами. Получены данные об изменении градиента температур и скорости охлаждения ванны расплава в зависимости от температуры подложки. Измерены механические свойства полученных образцов: твердость, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения. Дополнительный нагрев подложки способствовал увеличению твердости на 48%, микротвердости на 55%, износостойкости полученного покрытия на 35%.

Ключевые слова: лазерная наплавка, аддитивные технологии, Inconel, микроструктура, трещинообразование, упрочняющие фазы

The Use of Additional Substrate Heating in Direct Laser Deposition of Inconel 738

M. A. Gulov¹, I. S. Gertsel¹, A. G. Malikov¹

¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, 630090 Russia*

The process of depositing the nickel alloy Inconel 738 using the direct metal deposition method has been investigated. It has been shown that the use of additional substrate preheating to 750°C prevents crack formation in the material. The influence of additional heating during the deposition process on the structural-phase composition of the formed material has been studied. It was demonstrated that the additional heating promotes an increase in grain size, as well as changes in their shape and growth direction. The microstructure of the samples was studied using electron microscopy, and the distribution of alloying elements within and at the grain boundaries was investigated depending on the substrate preheating temperature. Using synchrotron radiation, it was established that preheating the substrate to 750°C during the direct laser deposition of Inconel 738 leads to the formation of $M_{23}C_6$ carbides and the enrichment of the metal matrix with strengthening γ' (Ni_3Al) and γ'' (Nb_3Al) phases. Data on the change in the temperature gradient and the cooling rate of the melt pool depending on the substrate temperature were obtained. The mechanical properties of the resulting samples were measured: hardness, microhardness, wear resistance, and friction coefficient. The substrate preheating contributed to an increase in hardness by 48%, microhardness by 55%, and the wear resistance of the obtained coating by 35%.

Keywords: Laser cladding, additive technologies, Inconel, microstructure, crack formation, strengthening phases

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН № 124021500015-1.

References

- 1 Pratheesh Kumar, S., Elangovan, S., Mohanraj, R., and Ramakrishna, J.R., A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition, *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 7892–7906, 10.1016/j.matpr.2021.02.566
- 2 Chen, B. and Mazumder, J. Role of process parameters during additive manufacturing by direct metal deposition of Inconel 718, *RPJ*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 919–929. 10.1108/RPJ-05-2016-0071
- 3 Li, N. et al, Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 242–269. 10.1016/j.jmst.2018.09.002
- 4 Kanishka, K. and Acherjee, B., A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration, *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 220–283. 10.1016/j.jmapro.2023.01.034
- 5 Fomin, V.M., Golyshev, A.A., Kosarev, V.F., Malikov, A.G., Orishich, A.M., and Filippov, A.A., Deposition of Cermet Coatings on the Basis of Ti, Ni, WC, and B₄C by Cold Gas Dynamic Spraying with Subsequent Laser Irradiation, *Physical Mesomechanics*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 291–300. 10.1134/S1029959920040025
- 6 Панин В.Е., Наркевич Н.А., Дураков В.Г., и Шулепов И.А., Управление структурой и износостойкостью электронно-лучевого покрытия из углеродоазотистой аустенитной стали, 2020. 10.24411/1683-805X-2020-12002
- 7 Wang, Z., Guan, K., Gao, M., Li, X., Chen, X., and Zeng, X., The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 513, pp. 518–523. 10.1016/j.jallcom.2011.10.107
- 8 Mignanelli, P.M., et al., Gamma-gamma prime-gamma double prime dual-superlattice superalloys, *Scripta Materialia*, 2017, vol. 136, pp. 136–140. 10.1016/j.scriptamat.2017.04.029
- 9 Van Sluytman, J.S. and Pollock, T.M., Optimal precipitate shapes in nickel-base γ - γ' Alloys, *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, no. 4, pp. 1771–1783. 10.1016/j.actamat.2011.12.008
- 10 Turichin, G.A., Klimova-Korsmik, O.G., Valdaytseva, E.A., Alekseev, A.V., and Rashkovets, M.V., Comparative analysis of the gamma prime phase formation in nickel alloys in additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 2020, vol. 94, pp. 320–323. 10.1016/j.procir.2020.09.060
- 11 Xu, J., et al., The effect of preheating on microstructure and mechanical properties of laser solid forming IN-738LC alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 691, pp. 71–80. 10.1016/j.msea.2017.03.046
- 12 Naghiyan Fesharaki, M., Shoja-Razavi, R., Mansouri, H.A., and Jamali, H., Evaluation of the hot corrosion behavior of Inconel 625 coatings on the Inconel 738 substrate by laser and TIG cladding techniques, *Optics and Laser Technology*, 2019, vol. 111, pp. 744–753. 10.1016/j.optlastec.2018.09.011
- 13 Liu, F., Lyu, F., Liu, F., Lin, X., and Huang, C., Laves phase control of inconel 718 superalloy fabricated by laser direct energy deposition via δ aging and solution treatment, *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 9753–9765. 10.1016/j.jmrt.2020.06.061
- 14 Sadhu, A., et al., A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC-60%WC ceramic coating on Inconel 718, *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 389, p. 125646. 10.1016/J.SURFCOAT.2020.125646
- 15 Soffel, F., Papis, K., Bambach, M., and Wegener, K., Laser Preheating for Hot Crack Reduction in Direct Metal Deposition of Inconel 738LC, *Metals*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 1–11. 10.3390/met12040614
- 16 Zhang, X., et al., A novel method to prevent cracking in directed energy deposition of Inconel 738 by in-situ doping Inconel 718, *Materials and Design*, 2021, vol. 197, p. 109214. 10.1016/j.matdes.2020.109214
- 17 Dong, X., Zhang, X., Du, K., Zhou, Y., Jin, T., and Ye, H., Microstructure of Carbides at Grain Boundaries in Nickel Based Superalloys, *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, vol. 28, no. 11, pp. 1031–1038. 10.1016/S1005-0302(12)60169-8
- 18 «12X18H10T - Сталь конструкционная криогенная Марочник стали и сплавов». Просмотрено: 10 октябрь 2025 г. [Онлайн]. Доступно на: https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=329
- 19 Ancharov, A.I., The Use of Hard Synchrotron Radiation for Diffraction Studies of Composite and Functional Materials, *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 543–549. 10.1007/s11182-017-1106-7
- 20 Jain, A., et al., Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation, *APL Materials*, 2013, vol. 1, no. 1, p. 011002. 10.1063/1.4812323

- 21 Ramakrishnan, A. and Dinda, G.P., Direct laser metal deposition of Inconel 738, *Materials Science and Engineering A*, 2019, vol. 740–741, pp. 1–13. 10.1016/j.msea.2018.10.020
- 22 Theska, F., et al., Review of Microstructure–Mechanical Property Relationships in Cast and Wrought Ni-Based Superalloys with Boron, Carbon, and Zirconium Microalloying Additions, *Adv Eng Mater*, 2023, vol. 25, no. 8, p. 2201514. 10.1002/adem.202201514
- 23 Rosenthal, D., The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments, *Journal of Fluids Engineering*, 1946, vol. 68, no. 8, pp. 849–865. 10.1115/1.4018624

C. 134–147

11. Научная статья

Сведения об авторах

Сидоров Евгений Алексеевич, инженер ИФПМ СО РАН, eas@ispms.ru

Тарасов Сергей Юльевич, д.т.н., гнс ИФПМ СО РАН, tsy@ispms.ru

Чумаевский Андрей Валерьевич, д.т.н., внс ИФПМ СО РАН, tch7av@gmail.com

Гурьянов Денис Андреевич, к.т.н., мнс ИФПМ СО РАН, desa-93@mail.ru

Фортуна С.В. к.т.н, с.н.с., ИФПМ СО РАН, s_fortuna@ispms.ru

Амиров Алихан Ильнурович, н.с., к.т.н., amirov@ispms.ru.

Рубцов Валерий Евгеньевич, к.ф.-м.н., ИФПМ СО РАН, rvy@ispms.ru

Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., проф. РАН, дир. ИФПМ СО РАН, eak@ispms.ru

УДК 539.621

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_148-165

Поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 14.10.2025; принята к публикации 16.10.2025

Влияние интенсивности охлаждения на микроструктуру и прочность соединения высокопрочного сплава AA7075, полученного методом сварки трением с перемешиванием

Е.А. Сидоров¹, С.Ю.Тарасов^{1**}, А.В. Чумаевский^{1*}, Д.А. Гурьянов¹, С.В. Фортуна¹,
А.А. Амиров¹, В.Е Рубцов¹, Е.А. Колубаев^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,
Томск, 634055 Россия

²Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630073 Россия

Применение дуговых, плазменных, лазерных или электронно-лучевых методов сварки для высокопрочных термически упрочняемых алюминиевых сплавах Al-Zn-Cu-Mg таких как, например, AA7075 практически не имеет смысла вследствие появления ослабленных зон термического влияния и формирования горячих трещин. Предпринимаются попытки получить прочные соединения из этих сплавов применяя сварку трением с перемешиванием, которая имеет низкое тепловложение, однако и здесь существует проблема перестаривания и получения ослабленных зон термомеханического влияния. В работе предпринята попытка устранить такого рода перестаривания за счет применения интенсивного жидкостного проточного охлаждения зоны сварки. Было установлено, что максимальная микротвердость зоны перемешивания, а также максимальная прочность соединения достигались при охлаждении потоком жидкости средней интенсивности ~4-6 л/мин. Было проведено искусственное старение всех полученных образцов с целью устранения ослабленных зон термомеханического влияния, что дополнительно повысило микротвердость и прочность соединений. По данным структурных исследований было установлено, что при средней интенсивности охлаждения достигается максимум вклада от дисперсионного механизма упрочнения в условиях внутреннего старения, эффект которого может быть усилен за счет искусственного старения.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, термоупрочняемые алюминиевые сплавы, охлаждение, структура.

Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Strength of Friction Stir Welded Joints in High-Strength AA7075 Alloy

E.A. Sidorov¹, S.Yu. Tarasov^{1**}, A.V. Chumaevskii^{1*}, D.A. Guryanov¹,
S.V. Fortuna¹, A.A. Amirov¹, V.E. Rubtsov¹, and E.A. Kolubaev^{1,2}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055
Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

The application of arc, plasma, laser, or electron beam welding methods to high-strength heat-treatable aluminum alloys Al-Zn-Cu-Mg, such as AA7075, makes little sense because of the formation of weak heat-affected zones and hot cracks. Attempts were made to produce strong joints in these alloys using friction stir welding, which is a low heat input method. However, there are still problems with overaging and the formation of weak thermomechanically affected zones. In the paper, we employ intensive liquid flow cooling of the weld zone to eliminate overaging. It is found that the microhardness in the stir zone and the joint strength are maximum due to cooling at a medium liquid flow rate of ~4–6 l/min. All samples were subjected to artificial aging to eliminate weak thermomechanically affected zones, which further increased the microhardness and strength of joints. Structural studies reveal that the contribution from the dispersion strengthening mechanism under internal aging, which can be enhanced by artificial aging, is maximum at medium cooling rates.

Keywords: friction stir welding, heat-treatable aluminum alloys, cooling, structure.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20172 (<https://rscf.ru/project/25-19-20172>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение №02/5/2025).

References

1. Mondolfo, L.F., *Aluminum alloys: structure and properties*, London-Boston, Butterworth, , ISBN 978-0-408-70932-3, 1976
2. Liu, X., Wang, C., Li, X., Zhu, B. and Li, R., Investigation of 7075 aluminum alloy TIG welding joint using 7075 aluminum alloy wire before and after heat treatment. *Materials Research Express*, 2023, vol. 10, p. 046512, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/accac4>
3. Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Çam, G., Simar, A., Gerlich, A., Khodabakhshi, F., Mostafaei, A., Field, D.P., Robson, J.D., Deschamps, A., Withers, P.J., Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution, *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 117, p. 100752, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>
4. Kalashnikov, K.N., Tarasov, S.Y., Chumaevskii, A.V. et al. Towards aging in a multipass friction stir-processed AA2024, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 2121–2132, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03631-3>
5. Mehri, A., Abdollah-zadeh, A., Entesari, S., Saeid, T., Wang, J.T., The effects of friction stir welding on microstructure and formability of 7075-T6 sheet, *Results in Engineering*, 2023, vol. 18, p. 101041, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101041>
6. Wu, C., Wang, J., Wang, Q., Xia, P., Li, 7075 aluminum alloy Friction Stir Welding (FSW): Quality analysis and mechanical properties with WC-Co tool, *Materials Today Communications*, 2024, vol. 38, p. 108203, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108203>
7. Su, J.-Q., Nelson, T.W., Mishra, R., Mahoney, M., Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium, *Acta Materialia*, 2003, vol. 51(3), pp. 713-729, [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00449-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4).
8. Çetkin, E., Çelik, Y.H. & Temiz, Ş. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075/AA5182 alloys joined by TIG and MIG welding methods. *Journal of Brazilian Society Mechanical Science and Engineering*, 2020, vol. 42, p. 34, <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2119-7>
9. El-Zathry, N.E., Akinlabi, S., Woo, W.L. et al. Friction Stir-Based Techniques: An Overview, *Welding in the World*, 2025, vol. 69, pp. 327–361, <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01847-w>

10. Cui, L., Yang, X., Zhou, G., Xu, X., Shen, Z., Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints, *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 543, pp. 58-68, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.045>
11. Bansal, A., Singla, A.K., Dwivedi, V., Goyal, D.K., Singla, J., Gupta, M.K., Krolczyk G.M., Influence of cryogenic treatment on mechanical performance of friction stir Al-Zn-Cu alloy weldments, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 56, pp. 43-53, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.067>
12. Ahamed, S.A.A., Devaraju, A., Narasimha Rao, K.V., Effect of Cryogenic Coolant on Mechanical Properties and Micrographs of Solid State Welding of 2014 Al Plates. In: Pujari, S., Srikan, S., Subramonian, S. (eds) *Recent Advances in Material Sciences. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, 2019, Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-13-7643-6_9
13. Fernandes, M.X., Sheikh-Ahmad, J., Ozturk, F., and Jarrar, F., Effect of Cold Air Jet Cooling on Weld Quality in Friction Stir Welding of AA2024-T351, *Research & Development in Material Science*, 2022, vol.16 (3), <https://doi.org/10.31031/RDMS.2022.16.000890>
14. Dong, J., Zhang, D., Luo, X., Zhang, W., Zhang, W., Qiu, C., EBSD study of underwater friction stir welded AA7003-T4 and AA6060-T4 dissimilar joint, *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol.9 (3), pp. 4309-4318, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.056>.
15. Abdollahzadeh, A., Bagheri, B., Abbasi, M., Sharifi, F., Mirsalehi, S.E., Moghaddam, A.O., A modified version of friction stir welding process of aluminum alloys: Analyzing the thermal treatment and wear behavior. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2021, vol. 235(10), pp. 2291-2309, doi:10.1177/14644207211023987
16. Wang, Q., Zhao, Z., Zhao, Y., Yan, K., Liu, C., Zhang, H., The strengthening mechanism of spray forming Al-Zn-Mg-Cu alloy by underwater friction stir welding, *Materials & Design*, 2016, vol. 102, pp. 91-99, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.036>
17. Kosturek, R., Sniezek, L., Torzewski, J., The Effect of Water Cooling on the Mechanical Properties of FSW Butt Joints Made of Aluminum Alloy AA7075-T651. *Materials Science and Welding Technologies*, 2025, vol. 68(1-4), pp. 327-361, <https://doi.org/10.32730/mswt.2024.68.5.4>
18. Ivanov, A., Chumaevskii, A., Amirov, A., Utyaganova, V., Savchenko, N., Rubtsov, V., & Tarasov, S., Features of Structure and Properties of Lap-Welded Joints of Aluminum Alloy Al-4Cu-1Mg with Titanium Alloy Ti-6Al-4V, Obtained by Friction Stir Welding. *Metals*, 2023, vol. 13 (8), pp. 1385, <https://doi.org/10.3390/met13081385>.
19. Vijay, A., Radhika, N., A comprehensive review on underwater welding: Methods, property evaluations and challenges. *Advanced Materials Processing Technology*, 2024, vol. 10(2), pp. 923-959, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2184582>
20. Christian, B.F., Mahoney, M.W., Calabrese, M., Micono, L., Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds, *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527(9), pp.2233-2240, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.057>
21. Sharma, C., Dwivedi, D.K., Kumar, P., Effect of post weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Zn-Mg alloy AA7039. *Materials & Design*, 2013, vol. 43, pp.134-143, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.018>

C. 148–165

12. Научная статья

УДК 539.3

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_5_166-171

Поступила в редакцию 09.10.2024; после доработки 11.04.2025; принята к публикации 14.04.2025

Вибрации сэндвич-панели с функционально-градиентным пористым или ауксетическим наполнителем и пьезоэлектромагнитными внешними слоями

P. Nikbakhsh¹, M. Mohammadimehr^{1*}, and F. Bargozini¹

¹Кашанский университет, Кашан, 8731753153 Иран

Развитие различных отраслей промышленности, особенно транспортной, зависит от разработки необходимых материалов и конструкций. С появлением метаматериалов одной из задач для исследователей стало изучение влияния этих материалов на различные конструкции. Данное исследование посвящено изучению вибрационного поведения сэндвич-панели с пьезо-

электромагнитными внешними слоями, а также влияния различных заполнителей (три типа пористых и два типа ауксетических сердечников). Получены уравнения движения сэндвич-пла-стины. С помощью полуаналитического решения уравнений определены колебания сэндвич-пла-стины. Исследовано влияние распределения пористости, электрических и магнитных полей, различных параметров ауксетического сердечника и соотношения толщин на собственную частоту. Согласно полученным результатам, третий тип распределения пор оказывает большее влияние на частоту структуры, чем другие типы распределения пор. Также проанализировано влияние аук-сетических сердечников с отрицательными коэффициентами Пуассона. Второй тип ауксетиче-ского сердечника оказывает более существенное влияние на частоту. Результаты данного исследования имеют практическое применение в аэрокосмической отрасли и могут быть использованы при разработке облегченных конструкций, датчиков и приводов.

Ключевые слова: Вибрации, ауксетический заполнитель, различные распределения пористости, пьезо-электромагнитные внешние слои, теория сдвиговой деформации первого порядка, сэндвич-пластина.

Vibration of a sandwich plate with FG porous and auxetic cores and piezo-electro-magnetic face sheets

P. Nikbakhsh¹, M. Mohammadimehr^{1*}, and F. Bargozini¹

¹*Department of Solid Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan*

The progress of various industries, especially the transportation industry, depends on the materials and structures required by these industries. With the emergence of metamaterials, one of the challenges for researchers is to investigate the effect of these materials on various structures. This research investigates the vibration behavior of a sandwich plate with piezo-electro-magnetic face sheets and the effect of several core models (three types of porous and two types of auxetic cores). The equations of motion for the sandwich plate are determined. These equations are solved using a semi-analytical method, and the vibration of the sandwich plate is obtained. The effects of porosity distribution, electric and magnetic fields, different parameters of the auxetic core, and thickness ratio on the natural frequency are determined. The results show that the effect of the 3rd type of porous distribution on the structure frequency is more than that of other porous distributions. The effect of auxetic cores with negative Poisson's ratios was also analyzed. The second type of the auxetic core has a more significant effect on the frequency. The findings of this study have practical applications in the aerospace sector and can be used in developing lightweight structures, sensors, and actuators.

Keywords: Vibration; Auxetic core; Various porosity distributions; Piezo-electro-magnetic face sheets; FSDPT; Sandwich plate.

References

1. Abdelbari, S., Attia, A., Bourada, F. et al. Investigation of Dynamic Characteristics of Imperfect FG Beams on the Winkler–Pasternak Foundation under Thermal Loading. *Phys Mesomech*, 2023, Vol. 26, pp. 557–572. <https://doi.org/10.1134/S1029959923050089>
2. Tang, T., Gao, J., Jin, C. et al. On the Propagation of Bulk Waves in Functionally Graded Beams with Consideration for Imperfection. *Phys Mesomech.*, 2025, vol. 28, pp. 134–144. <https://doi.org/10.1134/S1029959924601581>.
3. Bouchareb, M.L., Semmah, A., Bourada, F. et al. A Study of Longitudinal Magnetic Field Effect on Critical Buckling Loads of SWCNT Embedded in Kerr Medium Using Nonlocal Euler–Bernoulli Theory. *Phys Mesomech* 2022, vol. 25, pp. 344–352. <https://doi.org/10.1134/S1029959922040087>.
4. Addou, F.Y., Bourada, F., Meradjah, M., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Ghazwani M.H. and Alnujaie, A., Impact of porosity distribution on static behavior of functionally graded plates using a simple quasi-3D HSDT, *Computers and Concrete*, 2023, Vol. 32(1), pp.87-97, <https://doi.org/10.12989/cac.2023.32.1.087>.
5. Al-Houri, S., Al-Osta, M.A., Bourada, F., Gawah, Q., Tounsi, A., and Al-Dulaijan, S.U., Analysis of Porosity-Dependent Wave Propagation in FG-CNTRC Beams Utilizing an Integral Higher-Order Shear Deformation Theory, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2024, <https://doi.org/10.1142/S0219455425502335>.
6. Ellali, M., Bouazza, M. and Zenkour, A.M. Wave Propagation in Functionally-Graded Nanoplates Embedded in a Winkler–Pasternak Foundation with Initial Stress Effect. *Phys Mesomech*, 2023, vol. 26, pp. 282–294. <https://doi.org/10.1134/S1029959923030049>.
7. Singh, A., Katariya, P. V., & Karathanasopoulos, N., Composite sandwich plates with piezoelectric layers: Structural design, modal attributes and electric potential. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023, Vol. 31, pp. 4462–4476. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2198530>.

8. Boutaleb, S., Boulal, A., Zidour, M., Al-Osta, M. A., Tounsi, A., Tounsi, A., Salem, M. A., Khedher, K. M. On the Buckling Response of Functionally Graded Carbon Nanotube-reinforced Composite Imperfect Beams, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2024, vol. 68(4), pp. 1052–1063. <https://doi.org/10.3311/PPci.23825>.
9. Shirdelan, F., Mohammadimehr, M. & Bargozini, F. Control and vibration analyses of a sandwich doubly curved micro-composite shell with honeycomb, truss, and corrugated cores based on the fourth-order shear deformation theory. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 2024, Vol. 45, pp. 1773–1790. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3175-6>
10. Arabzadeh-Ziari, E., Mohammadimehr, M., Arabzadeh-Ziari, M. et al. Vibration, Bending, and Buckling of a Seven-Layer Sandwich Beam with Balsa Core Reinforced by Nanocomposite and Shape Memory Alloy Face Sheets Using Piezoelectromagnetic Layers. *Arab J Sci Eng*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09491-8>.
11. Daikh, A.A., Belarbi, MO., Vinh, P.V. et al. An Assessment of a New Hyperbolic Shear Deformation Theory for the Free Vibration Analysis of Cosine Functionally Graded Doubly Curved Shells under Various Boundary Conditions. *Phys Mesomech*, 2024, Vol. 27, pp. 338–354. <https://doi.org/10.1134/S102995992403010X>
12. Belarbi, H., Boucham, B., Bourada, F. et al. Investigation on Thermomechanical Bending of Functionally Graded Sandwich Plates Using a Novel Combined 2D Integral Plate Model. *Phys Mesomech*, 2024, vol. 27, pp. 472–484. <https://doi.org/10.1134/S1029959924040118>.
13. Bentabet, R., Attia, A., Selim, M.M. et al. Bending and Buckling Responses of FGM Nanoplates Embedded in an Elastic Medium. *Phys Mesomech*, 2023, vol. 26, pp. 313–328. <https://doi.org/10.1134/S1029959923030062>.
14. Selvamani, R., Prabhakaran, T. and Ebrahimi, F. Damping Characteristics of Nonlocal Strain Gradient Waves in Thermoviscoelastic Graphene Sheets Subjected to Nonlinear Substrate Effects. *Phys Mesomech*, 2024, vol. 27, pp. 461–471. <https://doi.org/10.1134/S1029959924040106>.
15. Pahlavanzadeh, M., Mohammadimehr, M., Irani-Rahaghi, M., & Emamat, S. M. Vibration response on the rod of vortex bladeless wind power generator for a sandwich beam with various face sheets and cores based on different boundary conditions. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2024, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2391920>.
16. Mohammadimehr, M., The effect of a nonlocal stress-strain elasticity theory on the vibration analysis of Timoshenko sandwich beam theory, *Advances in Nano Research*, 2024, Vol. 17 (3), pp. 275-284. <https://doi.org/10.12989/anr.2024.17.3.275>.
17. Gladkovsky, S.V., Petrova, S.V., Savrai, R.A. et al. Influence of the Reinforcement Phase Composition on the Structure and Abrasive Wear Resistance of Aluminum Matrix Composites Reinforced with B4C and SiC. *Phys Mesomech* 27, 2024, pp. 566–577. <https://doi.org/10.1134/S1029959924050060>.
18. Younsi, A., Bourada, F., Bousahla, A.A. et al. Simple Quasi-3D and 2D Integral Shear Deformation Theories for Buckling Investigation of Advanced Composite Plates. *Phys Mesomech*, 2023, vol. 26, pp. 346–366. <https://doi.org/10.1134/S1029959923030086>
19. Alsubaie, A.M., Al-Osta, M.A., Alfaqih, I., Tounsi, A., Chikh, A., Mudhaffar, I.M., Al-Dulaijan S.U., and Tahir, S., Influences of porosity distributions on bending and buckling behaviour of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beam, *Computers and Concrete*, 2024, Vol. 34(2), pp. 179-193, <https://doi.org/10.12989/cac.2024.34.2.179>.
20. Bargozini F, Mohammadimehr M. The theoretical and experimental buckling analysis of a nanocomposite beams reinforced by nanorods made of recycled materials. *Polym Compos.* 2024, Vol. 45, pp. 3327-3342. doi:10.1002/pc.27993
21. Noruzi, A., Mohammadimehr, M. & Bargozini, F. Experimental and theoretical results for bending and buckling of a five-layer sandwich plate reinforced by carbon nanotubes/carbon nanorods/graphene platelets/shape memory alloy based on RFSdT. *Arch Appl Mech*, 2024, Vol. 94, pp. 2151–2173 <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02630-5>.
22. Gia Phi, B., Van Hieu, D., Sedighi, H.M. et al. Size-dependent nonlinear vibration of functionally graded composite micro-beams reinforced by carbon nanotubes with piezoelectric layers in thermal environments. *Acta Mech*, 2023, vol. 233, pp. 2249–2270. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03224-4>
23. Jena, S.K., Chakraverty, S., Malikan M., and Mohammad-Sedighi, H., Implementation of Hermite–Ritz method and Navier's technique for vibration of functionally graded porous nanobeam embedded in Winkler–Pasternak elastic foundation using bi-Helmholtz nonlocal elasticity, *mechanics of materials and structures*, 2020, Vol. 15 (3), pp. 405–434, DOI: 10.2140/jomms.2020.15.405
24. Kurpa, L., Shmatko, T., Awrejcewicz, J., Timchenko, G., and Morachkovska, I. Analysis of Free Vibration of Porous Power-law and Sigmoid Functionally Graded Sandwich Plates by the R-functions Method. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2023, vol. 9(4), pp. 1144-1155. doi: 10.22055/jacm.2023.43435.4082.

25. Moulay, N., Liani, M., Bourada, F. et al. Vibration Analysis of Single-Walled Carbon Nanotubes Embedded in a Polymer Matrix under Magnetic Field Considering the Surface Effect Based on Nonlocal Strain Gradient Elasticity Theory. *Phys Mesomech*, 2023, vol. 26, pp. 329–345. <https://doi.org/10.1134/S1029959923030074>.
26. Al-Basyouni, K.S., Dakhel, B., Ghandourah, E. et al. An Analytical Solution for the Problem of Stresses in Magneto-Piezoelectric Thermoelastic Material under the Influence of Rotation. *Phys Mesomech*, 2020, vol. 23, pp. 362–368. <https://doi.org/10.1134/S1029959920040116>.
27. Addou, F.Y., Bourada, F., Tounsi, A. et al. Effect of porosity distribution on flexural and free vibrational behaviors of laminated composite shell using a novel sinusoidal HSDT. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 2024, vol. 24, 102. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00894-w>.
28. Bargozini, F., Mohammadimehr, M., Dawi, E. A., and Salavati-Niasari, M., Buckling of a sandwich beam with carbon nano rod reinforced composite and porous core under axially variable forces by considering general strain, *Results in Engineering*, 2024, Vo. 21, 101945, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101945>.
29. Bakina, O.V., Svarovskaya, N.V., Chzhou, V.R. et al. Synthesis of Porous Composites Based on Electroexplosive Ti/Al Nanopowder for Bone Implants. *Phys Mesomech*, 2024, vol. 27, pp. 556–565. <https://doi.org/10.1134/S1029959924050059>.
30. Lakhdar, Z., Chorfi, S.M., Belalia, S.A. et al. Free vibration and bending analysis of porous bi-directional FGM sandwich shell using a TSDT p-version finite element method. *Acta Mech*, 2024, vol. 235, pp. 3657–3686. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03909-y>
31. Abdulmajeed M. Alsubaie, Ibrahim Alfaqih, Mohammed A. Al-Osta, Abdelouahed Tounsi, Abdelbaki Chikh, Ismail M. Mudhaffar and Saeed Tahir, Porosity-dependent vibration investigation of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beam, *Computers and Concrete*, 2023, Vol. 32(1), pp. 75-85, <https://doi.org/10.12989/cac.2023.32.1.075>.
32. Namazinia, N., Alibeigloo, A., & Karimiasl, M. Vibration analysis of a composite sandwich plate with a viscoelastic auxetic core, FG-CNTRC interior, and MEE-FGP exterior face sheets. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2024, pp. 1–47. <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2386134>
33. Laoufi, I., Attia, A., Bourada, F. et al. Stability analysis of porous FG sandwich plates under thermomechanical loads via integral HySDT. *Arch Appl Mech*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02665-8>
34. Khorasani, M., Lampani, L., and Tounsi, A., A refined vibrational analysis of the FGM porous type beams resting on the silica aerogel substrate, *Steel and Composite Structures*, 2023, Vol.47(5), pp. 33-644, <https://doi.org/10.12989/scs.2023.47.5.633>.
35. Tounsi, A., Tahir, S.I., Al-Osta, M.A., Do-Van, T., Bourada, F., Bousahla, A.A., and Tounsi, A., An integral quasi-3D computational model for the hygro-thermal wave propagation of imperfect FGM sandwich plates, *Computers and Concrete*, 2023, Vol. 32(1), pp. 61-74, <https://doi.org/10.12989/cac.2023.32.1.061>.
36. Mohammadimehr, M.A., Loghman, A., Ghorbanpour Arani, A. et al. A Vibration Analysis of a Thick Micro Sandwich Panel with Metamaterial or Porous Core and Carbon Nanotubes/Graphene Platelets Reinforced Composite Based on HSDT and NSGT. *Multiscale Sci. Eng.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s42493-024-00115-9>
37. Motalebi, V., Mohammadimehr, M., Bargozini, F., Vibration response of sandwich plate reinforced by GPLs/GOAM, *Mechanics Research Communications*, 2024, Vol. 141, 104334, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2024.104334>.
38. Bentrar, H., Chorfi, S.M., Belalia, S.A., Tounsi, A., Ghazwani, H., and Alnujaie, A., Effect of porosity distribution on free vibration of functionally graded sandwich plate using the P-version of the finite element method, *Structural Engineering and Mechanics*, 2023, Vol. 88(6), 551-567, <https://doi.org/10.12989/sem.2023.88.6.551>.
39. Belabed, Z., Tounsi, A., Al-Osta, M., Tounsi, A., and Minh, H.L., On the elastic stability and free vibration responses of functionally graded porous beams resting on Winkler-Pasternak foundations via finite element computation, *Geomechanics and Engineering*, 2024, Vol. 36(2), pp. 183-204, <https://doi.org/10.12989/gae.2024.36.2.183>.
40. Chitour, M., Bouhadra, A., Bourada, F., Mamen, B., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Tounsi, A., Salem, M.A., and Khedher, K.M., Stability analysis of imperfect FG sandwich plates containing metallic foam cores under various boundary conditions, *Structures*, 2024, Vol. 61, 106021, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106021>.
41. Saidi, H., Tounsi, A., Bourada, F., Bousahla, A.A., Tounsi, A., Ismail, F., and Al-Juboori, S., Vibrational behavior of porous composite laminated plates using four unknown integral shear deformation theory, *Steel and Composite Structures*, 2024, Vol. 52(3), pp. 249-271. <https://doi.org/10.12989/scs.2024.52.3.249>
42. Lakhdar, K., Sadoun, M., Addou, F.Y. et al. Free vibrational characteristics of various imperfect FG beam via a novel integral Timoshenko's theory. *Acta Mech*, 2024, vol. 235, pp. 6287–6304. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04046-2>.
43. Driz, H., Attia, A., Bousahla, A.A., Addou, F.Y., Bourada, M., Tounsi, A., Tounsi, A., Balubaid, M., and Mahmoud, S.R., Dynamic response of imperfect functionally graded plates: Impact of graded patterns and

- viscoelastic foundation, *Structural Engineering and Mechanics*, 2024, Vol. 91(6), pp. 551-565, <https://doi.org/10.12989/sem.2024.91.6.551>.
44. Sangsefidi, A.R., Kadkhodapour, J., Anaraki, A.P. et al. Enhanced Energy Harvesting by Devices with the Metamaterial Substrate. *Phys Mesomech*, 2022, Vol. 25, pp. 568–582. <https://doi.org/10.1134/S1029959922060091>.
 45. Sheng, P., Fang, X., Yu, D. et al. Nonlinear metamaterial enabled aeroelastic vibration reduction of a supersonic cantilever wing plate. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 2024, Vol. 45, pp. 1749–1772. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3165-7>.
 46. Khlybov, A.A., Uglov, A.L. and Ryabov, D.A. Mechanical Simulation Model for Acoustic Damage Monitoring in Polycrystalline Materials. *Phys Mesomech*, 2023, 26, pp. 459–465. <https://doi.org/10.1134/S1029959923040070>.
 47. Rao, E., Fu, T. Acoustic radiation response of functionally graded sandwich plates cored by butterfly-shaped honeycombs with negative Poisson's ratio. *J Mech Sci Technol*, 2024, Vol. 38, pp. 2321–2333. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0413-5>
 48. Lin, W., Wang, Y., Davidson, B. D., Negative Poisson's ratio can enhance stability of layered composite structures, *Thin-Walled Structures*, 2024, Vol. 205, 112409, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112409>.
 49. Xiao, J.H., Guo, Z.X. Failure Analysis of Thickness Gradient Negative Poisson's Ratio Concave Honeycomb Sandwich Panels Under Local Impact. *Mech Compos Mater*, 2024, Vol. 60, pp. 401–414. <https://doi.org/10.1007/s11029-024-10195-1>.
 50. Sangsefidi, A.R., Kadkhodapour, J., Anaraki, A.P. et al. Enhanced Energy Harvesting by Devices with the Metamaterial Substrate. *Phys Mesomech*, 2022, 25, pp. 568–582 (). <https://doi.org/10.1134/S1029959922060091>.
 51. Yu, T.T., Yin, S., Bui, T.Q., Hirose, S., A simple FSDT-based isogeometric analysis for geometrically nonlinear analysis of functionally graded plates, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015, Vol. 96, pp. 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.11.003>.
 52. Hanifehlou, S., Mohammadimehr, M. Buckling analysis of sandwich beam reinforced by GPLs using various shear deformation theories. *Computers and Concrete*, 2020, Vol. 25, pp. 427–432. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2020.25.5.427>
 53. Li, F., Yuan, W., and Zhang, C., Free vibration and sound insulation of functionally graded honeycomb sandwich plates, *J. Sandw. Struct. Mater.*, 2021, Vol. 24, pp. 565–600. doi: 10.1177/10996362211020440.
 54. Duc, N.D., Seung-Eock, K., Tuan, N.D., Tran, P., and Khoa, N.D., New approach to study nonlinear dynamic response and vibration of sandwich composite cylindrical panels with auxetic honeycomb core layer, *Aerospace Science and Technology*, 2017, Vol. 70, 396-404, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.08.023>.
 55. Shahsavari, D., Shahsavari, M., Li, L., and Karami, B. A novel quasi-3D hyperbolic theory for free vibration of FG plates with porosities resting on Winkler/Pasternak/Kerr foundation. *Aerospace Science and Technology*, 2018, Vol. 72, pp. 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.11.004>.
 56. Mohammadimehr, M., Nikbakhsh, P., Buckling Analysis of a Sandwich Plate with Polymeric Core Integrated with Piezo-Electro-Magnetic Layers Reinforced by Graphene Platelets. *Advances in Materials Research*, 2022, Vol. 11(4), pp. 331–49. doi:10.12989/AMR.2022.11.4.331.
 57. Rostami, R., Mohammadimehr, M. Vibration control of rotating sandwich cylindrical shell-reinforced nanocomposite face sheet and porous core integrated with functionally graded magneto-electro-elastic layers. *Engineering with Computers*, 2022, 38, pp. 87–100. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01052-5>
 58. Keleshteri, M.M., Asadi, H. and Wang, Q., On the snap-through instability of post-buckled FG-CNTRC rectangular plates with integrated piezoelectric layers, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.11.015>.
 59. Noruzi, A., Mohammadimehr, M., and Bargozeni, F., Experimental free vibration and tensile test results of a five-layer sandwich plate by comparing various carbon nanostructure reinforcements with SMA, *Heliyon*, 2024, Vol. 10(10), e31164, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31164>.
 60. Yazdani, R., Mohammadimehr, M., and Navi, B. R., Free vibration of Cooper-Naghdi micro saturated porous sandwich cylindrical shells with reinforced CNT face sheets under magneto-hydro-thermo- mechanical loadings, 2019, Vol. 3, 351–365. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2019.70.3.351>
 61. Zenkour, A. M. A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 2-Buckling and free vibration. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, Vol. 42, pp. 5243–5258. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.016>
 62. Malik, M., Bert, C.W., Three-dimensional elasticity solutions for free vibrations of rectangular plates by the differential. quadrature method. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, Vol.35, pp. 299–318. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00073-5)
 63. Thai, S., Thai, H. T., Vo, T. P., Patel, V. I., Size-dependant behaviour of functionally graded microplates based on the modified strain gradient elasticity theory and isogeometric analysis, *Computers & Structures*, 2017, Vol.190, pp. 219-241, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.014>.

64. Wang, B., Zhao, J., Zhou, S., A micro scale Timoshenko beam model based on strain gradient elasticity theory, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2010, Vol. 29, pp. 591-599, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2009.12.005>.
65. Mohammad-Rezaei Bidgoli, E., Arefi, M. Free vibration analysis of micro plate reinforced with functionally graded graphene nanoplatelets based on modified strain-gradient formulation. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2021, Vol. 23, pp. 436-472. doi:10.1177/1099636219839302.

C. 166–171