

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, № 2, с. 5–137.

Дата выпуска: 16 мая 2025

1. Научная статья

Сведения об авторе

Хон Юрий Андреевич, д.ф.-м.н., проф., зав. лаб. ИФПМ СО РАН, khon@ispms.ru

УДК 669.539.381.296

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_5-12

Поступила в редакцию 17.06.2024 г., после доработки 17.07.2024 г., принята к публикации 30.10.2024 г.

Неадиабатическая динамика атомов и электропластический эффект в металлах

Ю.А. Хон

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

Электропластическим эффектом называется резкое снижение деформирующего напряжения металлов под действием импульса электрического тока. Механизм электропластического эффекта до сих пор остается неясным, ни один из предложенных не объясняет совокупность экспериментальных данных. В работе предложен новый механизм электропластического эффекта в металлах, определяемый атермическими смещениями закрепленных дислокаций при неадиабатических переходах атомов Ландау–Зинера в открытой системе ядер и электронов. Прохождение импульса электрического тока приводит к дополнительным смещениям атомов во всем объеме образца, увеличивает скорость атермических смещений дислокаций, повышает скорость пластической деформации, что приводит к падению деформирующего напряжения. Дается объяснение наблюдаемым экспериментально закономерностям электропластической деформации.

Ключевые слова: электропластический эффект, открытая система, неадиабатическая динамика атомов, атермические смещения

Nonadiabatic dynamics of atoms and electroplastic effect in metals

Yu.A. Khon

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

The electroplastic effect is a sharp decrease in the deformation stress of metals under the action of an electric pulse. The mechanism of the electroplastic effect is still unclear. There is no explanation for the accumulated experimental data. In this paper, we propose a new mechanism of the electroplastic effect in metals, which is governed by athermal displacements of pinned dislocations during nonadiabatic transitions of Landau–Zener atoms in an open system of nuclei and electrons. The electric pulse action causes additional displacements of atoms in the specimen volume, increases the velocity of athermal displacements of dislocations and the plastic strain rate, which leads to a drop in the deformation stress. An explanation is provided for the experimental pattern of electroplastic deformation.

Keywords: electroplastic effect, open system, nonadiabatic dynamics of atoms, athermal displacements

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0011.

Литература

1. Панин, В.Е., Структурные уровни локализации деформации, в кн. *Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации*, Киев: Наукова думка, 1989, с. 38–57.
2. Panin, V.E. and Egorushkin, V.E., Basic Physical Mesomechanics of Plastic Deformation and Fracture of Solids as Hierarchically Organized Nonlinear Systems, *Phys. Mesomech.*, 2015, vol. 18(4), pp. 377–390. <https://doi.org/10.1134/S1029959915040104>
3. Lüders, W., Über die Äusserung der Elasticität an stahlartigen Eisenstäben und Stahlstäben und über eine bien Biegen solcher Stäbe beobachtete Molecularbewegung, *Dindlers's Politechnisches Jahrbuch*, 1860, vol. 115(5), pp. 18–22.
4. Le Chatelier, A., Influence du Temps et de la Temperature sur les Essais au Choc, *Rev. Métallurgie*, 1909, vol. 6, pp. 914–917.
5. Cottrell, A.H., *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, New York: Oxford University Press, 1953.
6. McCormick, P.G. and Ling, C.P., Numerical Modelling of the Portevin–Le Chatelier Effect, *Acta Metall. Mater.*, 1995, vol. 43(5), pp. 1969–1977. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)00390-4](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)00390-4)
7. McCormick, P.G., Theory of Flow Localisation due to Dynamic Strain Ageing, *Acta Metall. Mater.*, 1988, vol. 36 (12), pp. 3061–3067. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(88)90043-0)
8. Hahner, P. and Rizzi, E., On the Kinematics of Portevin–Le Chatelier Bands: Theoretical and Numerical Modelling, *Acta Mater.*, 2003, vol. 51, pp. 3385–3397.
9. Rizzi, E., and Hahner, P., On the Portevin–Le Chatelier Effect: Theoretical Modeling and Numerical Results, *Int. J. Plast.*, 2004, vol. 20(1), pp. 121–165. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(03\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(03)00035-4)
10. Романова, В.А., Балохонов, Р.Р., Моделирование пластической деформации как процесса генерации и эстафетной передачи пластических сдвигов от границ раздела, *Физ. мезомех.*, 2001, т. 4, № 2, с. 21–28.
11. Balokhonov, R.R., Romanova, V.A., Schmauder, S., Schwab, E.A., and Martynov, S.A., The Influence of Lüders Front Propagation on the Strength of the "Coating–Substrate" Composite. Numerical Simulation, *Compos. Mech. Comput. Appl.*, 2012, vol. 3(4), pp. 283–305. <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v3.i4.10>
12. Troitskii, O.A., Electromechanical Effect in Metals, *Zh. ETF Pis. Red.*, 1969, vol. 10, pp. 18–22.
13. Троицкий, О.А., Розно, А.Г., Электропластическая деформация металлов, *ФТТ*, 1970, т. 12, № 2, с. 203–210.
14. Okazaki, K., Kagawa, M., and Conrad, H., A Study of the Electroplastic Effect in Metals, *Scripta Met.*, 1978, vol. 12(11) pp. 1063–1080. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(78\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0036-9748(78)90026-1)
15. Спицин В.И., Троицкий О.А., *Электропластическая деформация металлов*, М.: Наука, 1985.
16. Conrad, H., Electroplasticity in Metals and Ceramics, *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, vol. 287(2), pp. 276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
17. Stolyarov, V.V., Features of Deformation Behavior at Rolling and Tension under Current in TiNi Alloy, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2010, vol. 25, pp. 194–202.
18. Dmitriev, S.V., Morkina, A.Y., Tarov, D.V., Khalikova, G.R., Abdullina, D.U., Tatarinov, P.S., Tatarinov, V.P., Semenov, A.S., Naimark, O.B., Khokhlov, A.V, and Stolyarov, V.V., Effect of Repetitive High-Density Current Pulses on Plastic Deformation of Copper Wires under Stepwise Loading, *Spec. Mech. Eng. and Oper. Res.*, 2024, vol. 1(1), pp. 27–43. <https://doi.org/10.31181/smeor1120243>
19. Li, X., Hong, Y., Ke, H., Zhong, L., Zou, Y., and Wang, J., In Situ TEM Study of Pulse-Enhanced Plasticity of Monatomic Metallic Glasses, *J. Mat. Sci. Tech.*, 2024 vol. 195, pp. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.12.068>.
20. Al'shits, V.I. and Indenbom, V.L., *Dislocations in Crystals*, Amsterdam: North-Holland, 1986.
21. Okazaki, K., Kagawa, M., and Conrad, H., An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium, *Mater. Sci. Eng.*, 1980, vol. 45(2), pp. 109–116.
22. Sutton, A.P. and Todorov, T.N., Theory of Electroplasticity Based on Electromagnetic Induction, *Phys. Rev. Mater.*, 2021, vol. 5, p. 113605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>
23. Tully, J.C., Perspective: Nonadiabatic Dynamics Theory, *J. Chem. Phys.*, 2012, vol. 137, p. 22A301. <https://doi.org/10.1063/1.478811>
24. Kapral, R., Quantum Dynamics in Open Quantum–Classical Systems, *J. Phys. Condens. Matter*, 2015, vol. 27, p. 073201. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/7/073201>.
25. Curchod, B.F.E., Rothlisberger, U., and Tavernelli, I., Trajectorybased Tonadiabatic Dynamics with Time-Dependent Density Functional Theory, *Chem. Phys. Chem.*, 2013, vol. 14, pp. 1314–1340. <https://doi.org/10.1002/cphc.201200941>.
26. Landau, L., On the Theory of Transfer of Energy at Collisions II, *Phys. Z. Sowjet Union.*, 1932, vol. 2, pp. 46–51.
27. Zener, C., Non-Adiabatic Crossing of Energy Levels, *Proc. R. Soc.*, 1932, vol. A 137, pp. 696–702.
28. Zhu, C. and Nakamura, H., Theory of Nonadiabatic Transition for General Two-State Curve Crossing Problems. I. Nonadiabatic Tunneling Case, *J. Chem. Phys.*, 1994, vol. 101, pp. 10630–10647. <https://doi.org/10.1063/1.467877>

29. Zhu, C. and Nakamura, H., Theory of Nonadiabatic Transition for General Two-State Curve Crossing Problems. II. Landau–Zener Case, *J. Chem. Phys.*, 1995, vol. 102, pp. 7448–7461. <https://doi.org/10.1063/1.469057>.
30. Ling, Y., Le, Y., Chao, X., Yibo, L., Yajun, L., and Chaoyuan, Z., Benchmark Performance of Global Switching versus Local Switching for Trajectory Surface Hopping Molecular Dynamic Simulation: Cis \leftrightarrow Trans Azobenzene Photoisomerization, *Chem. Phys. Chem.*, 2017, vol. 18(10). <https://doi.org/10.1002/cphc.201700049>
31. Khon, Yu.A., Nonadiabatically Driven Subcritical Crack Nucleation in Solids, *Phys. Mesomech.*, 2023, vol. 26(4), pp. 434–442. <https://doi.org/10.1134/S1029959923040057>
32. Khon, Yu.A., Nonadiabatic Transitions of Atoms and the Formation of New Phase Nuclei in Solids, *Phys. Solid State*, 2023, vol. 65(8), pp. 1211–1218. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.08.56564.100>
33. Khon, Yu.A., Non-Adiabatic Dynamics of Atoms and Phase Transformations Kinetics in Solids, *Phys. Solid State*, 2024, vol. 66(3), pp. 328–337. <https://doi.org/10.61011/PSS.2024.03.57933.7>

C. 5–12

2. Научная статья

Сведения об авторах

Хохлов Андрей Владимирович, к.т.н., внс НИИ механики МГУ, внс МЦФПМ, andrey-khokhlov@yandex.ru

Галышев Сергей Николаевич, к.т.н., снс ИФТТ РАН, galyshev@ya.ru

Атанов Булат Ильшатovich, мнс ИФТТ РАН, but305@mail.ru

Орлов Валерий Иванович, к.ф.-м.н., снс ИФТТ РАН, orlov@issp.ac.ru

УДК 539.37

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_13-43

Поступила в редакцию 22.06.2024 г., после доработки 11.07.2024 г., принята к публикации 13.08.2024 г.

Влияние расслоения материалов с низкой сдвиговой прочностью на процесс разрушения и результаты испытаний на трехточечный изгиб

А.В. Хохлов^{1,2}, С.Н. Галышев³, Б.И. Атанов³, В.И. Орлов³

¹ НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119192 Россия

² Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, 119991 Россия

³ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Черноголовка, 142432 Россия

Приведены данные испытаний на изгиб, исследования микроструктуры и поверхностей разрушения образцов семейства новых однонаправленных композитов с алюминиевой матрицей, армированной углеродными волокнами, обладающих повышенной удельной прочностью по сравнению со сплавами и высокой трещиностойкостью по сравнению с углепластиковыми за счет целенаправленного формирования достаточно слабого интерфейса при изготовлении. Это достигается легированием матрицы элементами, видоизменяющими слой контакта волокна с матрицей и обеспечивающими его невысокую прочность на сдвиг, и оптимизацией параметров двухстадийной технологии изготовления. Исследуется влияние ряда параметров технологии изготовления на микроструктуру, механические свойства и механизмы разрушения разрабатываемых композитов. Обсуждаются особенности механизма разрушения при изгибе материалов с низкой сдвиговой прочностью и влияние их расслоения (каскада расслоений) на сценарий разрушения и существенное снижение прочности на растяжение, определяемой в испытаниях на изгиб. Предложен способ определения отношения предела прочности на сдвиг к пределу прочности на растяжение однородного изотропного материала по данным испытаний образцов на трехточечный изгиб с разной базой (пролетом). Подход распространяется и на композиты с низкой межслойной прочностью, в частности на разрабатываемые углеалюминиевые композиты.

Ключевые слова: кривая сила-прогиб, влияние касательных напряжений, расслоения, «прочность при изгибе», «модуль упругости при изгибе», трещиностойкость, композиты, керамика, углеродные волокна, однонаправленные композиты с алюминиевой матрицей, горячее прессование

Effect of Delamination of Low Shear Strength Materials on Fracture and Test Results under Three-Point Bending

A.V. Khokhlov^{1,2}, S.N. Galyshev³, B.I. Atanov³, and V.I. Orlov³

¹ Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192 Russia

² Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, 119991 Russia

³ Osipyan Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

The paper reports on bending tests, microstructural studies, and fracture surfaces of specimens made of new unidirectional composites with the aluminum matrix reinforced with carbon fibers. These composites have increased specific strength compared to alloys and high crack resistance compared to carbon plastics due to the targeted formation of a sufficiently weak interface during their production. This is achieved by alloying the matrix with elements modifying the fiber-matrix contact layer and providing its low shear strength, as well as by optimizing the parameters of the two-stage production technology. The problem under study is the influence of some production parameters on the microstructure, mechanical properties, and fracture mechanisms of the developed composites to find their optimum values ensuring higher strength and crack resistance. Consideration is given to the fracture mechanism of low shear strength materials under bending and the effect of their delamination (delamination cascade) on the fracture scenario and a significant decrease in the tensile strength revealed in bending tests. It is shown that delamination in the loaded zone has an avalanche-like pattern, causing a very rapid increase in normal stresses and the number of fibers under the maximum stress, i.e. the initiation of numerous fracture sites and rapid fracture of the entire specimen in the cross-section under load. The data of three-point bending tests on specimens with different span distances were used to propose a method for determining the shear strength-to-tensile strength ratio for a homogeneous isotropic material. The approach is also applicable to various composites with low interlaminar strength, in particular, to the carbon-aluminum composites.

Keywords: force-displacement curve, effect of shear stresses, delamination, bending strength, bending modulus, crack resistance, composites, ceramics, carbon fibers, unidirectional aluminum-matrix composites, hot pressing

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта 22-79-10064 Российского научного фонда (п.п. 2 и 3 статьи) и Минобрнауки РФ в рамках программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению № 075-15-2022-284 (п.п. 1, 4, 5).

Литература

1. Работнов, Ю.Н., *Механика деформируемого твердого тела*, М.: Наука, 1988.
2. Kelly, A. and Zweben, C.H., *Comprehensive Composite Materials*, New York: Elsevier, 2000.
3. Hodgkinson, J.M., *Mechanical Testing of Advanced Fiber Composites*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.
4. Берлин, А.А., Баженов, С.Л., Кульков, А.А., Ошмян, В.Г., *Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология*, Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2009.
5. Полилов, А.Н., Татусь, Н.А., *Биомеханика прочности волокнистых композитов*, М.: Физматлит, 2018.
6. Prasad, N., Tola, C., Coulaud, M., Claes, M., Lomov, S., Verpoest, I., and Gorbatiikh, L., Carbon Fiber Composites Based on Multi-Phase Epoxy/PES Matrices with Carbon Nanotubes: Morphology and Interlaminar Fracture Toughness Characterization, *Adv. Eng. Mater.*, 2016, vol. 18(12), pp. 2040–2046. <https://doi.org/10.1002/adem.201600153>
7. Ivanov, S.G., Beyens, D., Gorbatiikh, L., and Lomov, S., Damage Development in Woven Carbon Fibre Thermoplastic Laminates with PPS and PEEK Matrices: A Comparative Study, *J. Compos. Mater.*, 2017, vol. 51(5), pp. 637–647. <https://doi.org/10.1177/0021998316653460>
8. Liu, Q., Gorbatiikh, L., and Lomov, S.V., A Combined Use of Embedded and Cohesive Elements to Model Damage Development in Fibrous Composites, *Compos. Struct.*, 2019, vol. 223, p. 110921. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110921>
9. Liu, Q., Lomov, S.V., and Gorbatiikh, L., When Does Nanotube Grafting on Fibers Benefit the Strength and Toughness of Composites?, *Compos. Sci. Technol.*, 2020, vol. 188, p. 107989. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.107989>
10. Mileiko, S.T., *Metal and Ceramic Based Composite*, Amsterdam: Elsevier, 1997.
11. Evans, A.G. and Zok, F.W., Review. The Physics and Mechanics of Fibre-Reinforced Brittle Matrix Composites, *J. Mater. Sci.*, 1994, vol. 29, pp. 3857–3896. <https://doi.org/10.1007/BF00355946>
12. Ruys, A.J., *Silicon Carbide Ceramics. Structure, Properties and Manufacturing*, Amsterdam: Elsevier, 2023.
13. Kovar, D., Thouless, M.D., and Halloran, J.W., Crack Deflection and Propagation in Layered Silicon Nitride/Boron Nitride Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 1998, vol. 81(4), pp.1004–1112. <http://dx.doi.org/10.20935/AcadErgy7605>

14. Xiang, L., Cheng, L., Hou, Y., Wang, F., Li, L., and Zhang, L., Fabrication and Mechanical Properties of Laminated HfC–SiC/BN Ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2014, vol. 34(15), pp. 3635–3640. <https://doi.org/10.1016/j.jeurcerasoc.2014.04.021>
15. *Advances in Ceramics—Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications*, Ed. by C. Sikalidis, Rijeka: InTech, 2011.
16. Noda, T., Advanced SiC–SiC Composites for Nuclear Application, in *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*, Ed. by Mahajan Y. and Roy J.: Springer, 2019, pp. 1–26. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_20-1
17. Feng, T., Tong, M., Hou, W., Li, H., Lin, H., and Wen, S., Flexural Properties of Cyclic Ablated SiCf/HfC–SiC Composites, *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47(9), pp. 12851–12858. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.146>
18. Wang, X., Song, Z., Cheng, Z., Han, D., Li, M., and Zhang, C., Tensile Creep Properties and Damage Mechanisms of 2D–SiCf/SiC Composites Reinforced with Low-Oxygen High-Carbon Type SiC Fiber, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2020, vol. 40(14), pp. 4872–4878. <https://doi.org/10.1016/j.jeurcerasoc.2020.01.033>
19. Nikonovich, M., Kolchin, F., Galyshev, S., and Mileiko, S., Matrixless Fibrous Oxide Composites, *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47, pp. 8711–8716. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.116>
20. Ni, D., Cheng, Y., Zhang, J., Liu, J.-X., Zou, J., Chen, B., Wu, H., Li, H., Dong, S., Han, J., Zhang, X., Fu, Q., and Jun, Z., Advances in Ultra-High Temperature Ceramics, Composites, and Coatings, *J. Adv. Ceram.*, 2022, vol. 11(1), pp. 1–56. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0550-6>
21. Radhika, N. and Sathish, M.A., Review on Si-Based Ceramic Matrix Composites and their Infiltration Based Techniques, *Silicon*, 2022, vol. 14, pp. 10141–10171. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01763-y>
22. Mileiko, S., Carbon-Fibre/Metal-Matrix Composites: A Review, *J. Compos. Sci.*, 2022, vol. 6, pp. 297. <https://doi.org/10.3390/jcs6100297>
23. Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S.U., Akbari, M.K., Fakhrohoseini, S.M., Khayyam, H., Pakseresht, A.H., Ghasali, E., Zabet, M., Munir, K.S., Jia, S., Davim, J.P., and Naebe, M., Carbon Fiber Reinforced Metal Matrix Composites: Fabrication Processes and Properties, *Compos. Part A*, 2017, vol. 92, pp. 70–96. <https://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.032>
24. Шейнерман, А.Г., Механические свойства металломатричных композитов с графеном и углеродными нанотрубками, *ФММ*, 2022, т. 123, № 1, с. 63–92. <https://doi.org/10.31857/S0015323022010120>
25. Zhong, K., Zhou, J., Zhao, C., Yun, K., and Qi, L., Effect of Interfacial Transition Layer with CNTs on Fracture Toughness and Failure Mode of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Compos. Part A*, 2022, vol. 163, p. 107201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107201>
26. Galyshev, S., On the Strength of the CF/Al-Wire Depending on the Fabrication Process Parameters: Melt Temperature, Time, Ultrasonic Power, and Thickness of Carbon Fiber Coating, *Metals*, 2021, vol. 11(7), p. 1006. <https://doi.org/10.3390/met11071006>
27. Galyshev, S. and Atanov, B., The Dependence of the Strength of a Carbon Fiber/Aluminum Matrix Composite on the Interface Shear Strength between the Matrix and Fiber, *Metals*, 2022, vol. 12, p. 1753. <https://doi.org/10.3390/met12101753>
28. Galyshev, S., Atanov, B., and Orlov, V., On the Pressure and Rate of Infiltration Made by a Carbon Fiber Yarn with an Aluminum Melt during Ultrasonic Treatment, *Fibers*, 2023, vol. 11, p. 41. <https://doi.org/10.3390/fib11050041>
29. Matsunaga, T., Matsuda, K., Hatayama, T., Shinozaki, K., and Yoshida, M., Fabrication of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Aluminum–Magnesium Alloy Composite Wires Using Ultrasonic Infiltration Method, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2007, vol. 38(8), pp. 1902–1911. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.007>
30. Zhong, K., Zhou, J., Zhao, C., Yun, K., and Qi, L., The Effect of Nickel Coating on the Mechanical Properties and Failure Modes of Continuous Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites, *J. Alloy. Compd.*, 2022, vol. 904, p. 164134. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164134>
31. Zhu, C., Su, Y., Zhang, D., and Ouyang, Q., Effect of Al₂O₃ Coating Thickness on Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Continuous Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 793, p. 139839. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139839>
32. Brodova, I., Yolshina, L., Razorenov, S., Rasposienko, D., Petrova, A., Shirinkina, I., Shorokhov, E., Muradymov, R., Garkushin, G., and Savinykh, A., Effect of Grain Size on the Properties of Aluminum Matrix Composites with Graphene, *Metals*, 2022, vol. 12, p. 1054. <https://doi.org/10.3390/met12061054>
33. Tjong, S.C., Recent Progress in the Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets, *Mater. Sci. Eng. R Reports.*, 2013, vol. 74(10), pp. 281–350. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.08.001>
34. Khanna, V., Kumar, V., and Bansal, S.A., Mechanical Properties of Aluminium-Graphene/Carbon Nanotubes (CNTs) Metal Matrix Composites: Advancement, Opportunities and Perspective, *Mater. Res. Bull.*, 2021, vol. 138, p. 111224. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111224>
35. Gao, M., Gao, P., Wang, Y., Lei, T., and Ouyang, Ch., Study on Metallurgically Prepared Copper-Coated Carbon Fibers Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Met. Mater. Int.*, 2021, vol. 27, pp. 5425–5435. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00897-1>

36. Xu, W., Wang, C., Zhang, Z., Ping, L., Yanhua, S., Guofu, Z., Interfacial Microstructure and Growth Mechanism of Al₄C₃ in Grf/Al Composites Fabricated by Liquid Pressure Method, *Micron*, 2014, vol. 65. pp. 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2014.04.007>
37. Трыков, Ю.П., Гуревич, Л.М., Шморгун, В.Г., *Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов*, М.: Металлургиздат, 2004.
38. Иванов, Д.А., Шляпин, С.Д., Вальяно, Г.Е., Изучение механизма разрушения алюмоматричного дисперсно-упрочненного композиционного материала Al–Al₄C₃–Al₂O₃ со слоистой структурой при статическом и ударном нагружениях, *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2020, № 4, с. 66–75. <http://dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-4-66-75>
39. Сорокин, О.Ю., Кузнецов, Б.Ю., Лунегова, Ю.В., Ерасов, В.С., Высокотемпературные композиционные материалы с многослойной структурой (обзор), *Труды ВИАМ*, 2020, т. 88, № 4–5, с. 42–53. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-45-42-53>
40. Балинова, Ю.А., Гращенков, Д.В., Шавнев, А.А., Бабашов, В.Г., Чайникова, А.С., Курбаткина, Е.И., Большакова, А.Н., Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения, *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*, 2020, № 2, с. 83–92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-83-92>
41. Kaledin, A., Shikunov, S., Zubareva, J., Shmytko, I., Straumal, B., and Kurlov, V., Fabrication of Layered SiC/C/Si/MeSi₂/Me Ceramic–Metal Composites via Liquid Silicon Infiltration of Metal–Carbon Matrices, *Materials*, 2024, vol. 17, p. 650. <https://doi.org/10.3390/ma17030650>
42. Fitzer, E. and Manocha, L.M., Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites, Heidelberg: Springer, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58745-0>
43. Hatta H., Goto, K., and Aoki, T., Strengths of C/C Composites Under Tensile, Shear, and Compressive Loading: Role of Interfacial Shear Strength, *Compos. Sci. Technol.*, 2005, vol. 65(15–16), pp. 2550–2562. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.012>
44. Hatta, H., Goto, K., Ikegaki, S., Kawahara, I., Mohamed, SAH., and Hamada, H., Tensile and Fiber/Matrix Interfacial Properties of 2D and 3D-Carbon/Carbon Composites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2005, vol. 25(4) pp. 535–542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.02.014>
45. Travitzky, B.N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlordt, T., and Greil, P., Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials, *Adv. Eng. Mater.*, 2014, vol. 16(6), pp. 729–754. <https://doi.org/10.1002/adem.201400097>
46. He, R., Zhou, N., Zhang, K., Zhang, X., Zhang, L., Wang, W., and Fang, D., Progress and Challenges Towards Additive Manufacturing of SiC Ceramic, *J. Adv. Ceramics.*, 2021, vol. 10, pp. 637–674. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0484-z>
47. Wang, G., Miao, Y., Gong, H., Sheng, M., Jing, J., Liu, M., Lu, J., Gong, Z., and Kun, M., Direct Ink Writing of Reaction Bonded Silicon Carbide Ceramics with High Thermal Conductivity, *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49(6), pp. 10014–10022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.179>
48. Goldberg, M., Obolkina, T., Smirnov, S., Protsenko, P., Titov, D., Antonova, O., Konovalov, A., Kudryavtsev, E., Sviridova, I., Kirsanova, V., Sergeeva, N., Komlev, V., Barinov, S., The Influence of Co Additive on the Sintering, Mechanical Properties, Cytocompatibility, and Digital Light Processing Based Stereolithography of 3Y-TZP-5Al₂O₃ Ceramics, *Materials*, 2020, vol. 13(12), p. 2789. <https://doi.org/10.3390/ma13122789>
49. Hu, Z., Chen, F., Xu, J., Nian, Q., Lin, D., Chen, C., Zhu, X., Chen, Y., and Zhang, M., 3D Printing Graphene–Aluminum Nanocomposites, *J. Alloy. Compd.*, 2018, vol. 746, pp. 269–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jacom.2018.02.272>
50. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010): Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб, 2014.
51. ГОСТ Р 57749-2017 (ISO 17138:2014): Композиты керамические. Метод испытания на изгиб при нормальной температуре, 2017.
52. ГОСТ Р 57866-2017: Композиты полимерные. Метод определения характеристик при изгибе, 2017.
53. ГОСТ 32659-2014: Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки, 2014.
54. ГОСТ Р 57745-2017: Композиты полимерные. Определение предела прочности при межслойном сдвиге ламинатов методом короткой балки, 2017.
55. ISO 1209-1:2007(E): Rigid Cellular Plastics. Determination of Flexural Properties. Part 1: Basic Bending Test, 2007.
56. ISO 1209-2:2007(E): Determination of Flexural Properties. Part 2: Determination of Flexural Strength and Apparent Flexural Modulus of Elasticity, 2007.
57. ISO 14125:1998(E): Fibre-Reinforced Plastic Composites. Determination of Flexural Properties, 1998.
58. ASTM D7264/D7264M-07: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2007.
59. ASTM D2344/D2344M-13: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their Laminates, 2013.
60. ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017.

61. Panfilov, P.E., The Features of Rhenium Deformation Behavior at Room Temperature, *Rev. Adv. Mater. Technol.*, 2020, vol. 3, pp.1–5. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2020-2-2-26-30>
62. Wisnom, M.R., The Effect of Specimen Size on the Bending Strength of Unidirectional Carbon Fibre-Epoxy, *Compos. Struct.*, 1991, vol. 18(1), pp. 47–63. [http://dx.doi.org/10.1016/0263-8223\(91\)90013-o](http://dx.doi.org/10.1016/0263-8223(91)90013-o)
63. Jalali, S.J. and Taheri, F., New Test Method for Measuring the Longitudinal and Shear Moduli of Fiber Reinforced Composites, *J. Compos. Mater.*, 1999, vol. 33(23), pp. 2134–2160. <http://dx.doi.org/10.1177/002199839903302301>
64. Sideridis, E. and Papadopoulos, G.A., Short-Beam and Three-Point-Bending Tests for the Study of Shear and Flexural Properties in Unidirectional-Fiber-Reinforced Epoxy Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2004, vol. 93(1), pp. 63–74. <https://doi.org/10.1002/app.20382>
65. Rácz, Zs. and Vas, L.M., Relationship Between the Flexural Properties and Specimen Aspect Ratio in Unidirectional Composites, *Compos. Interface.*, 2005, vol. 12(3–4), pp. 325–339. <https://doi.org/10.1163/1568554053971551>
66. Mujika, F., On the Effect of Shear and Local Deformation in Three-Point Bending Tests, *Polymer Testing*, 2007, vol. 27(7), pp. 869–877. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.06.002>
67. Caprino, G., Iaccarino, P., and Lamboglia, A., The Effect of Shear on the Rigidity in Three-Point Bending of Unidirectional CFRP Laminates Made of T800H/3900-2, *Compos. Struct.*, 2009, vol. 88(3), pp. 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.04.014>
68. Hara, E., Yokozeki, T., Hatta, H., Iwahori, Y., Ogasawara, T., and Ishikawa, T., Comparison of Out-of-Plane Tensile Strengths of Aligned CFRP Obtained by 3-Point Bending and Direct Loading Tests, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2012, vol. 43(11), pp. 1828–1836. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.016>
69. Hara, E., Yokozeki, T., Hatta, H., Iwahori, Y., and Ishikawa, T., Comparison of Out-of-Plane Tensile Moduli of CFRP Laminates Obtained by 3-Point Bending and Direct Loading Tests, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2014, vol. 67, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.003>
70. Insausti, N., Adarraga, I., De Gracia, J., Arrese, A., and Mujika, F., Numerical Assessment of an Experimental Procedure Applied to DCB Tests, *Polym. Test.*, 2020, vol. 82, p. 106288. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106288>
71. Guseinov, K., Sapozhnikov, S.B., and Kudryavtsev, O.A., Features of Three-Point Bending Tests for Determining Out-of-Plane Shear Modulus of Layered Composites, *Mech. Compos. Mater.*, 2022, vol. 58, pp. 155–168. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10020-7>
72. Demiral, M., Kadioglu, F., and Silberschmidt, V.V., Size Effect in Flexural Behaviour of Unidirectional GFRP Composites, *J. Mech. Sci. Technol.*, 2020, vol. 34, pp. 5053–5061. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-1109-0>
73. Полилов, А.Н., Власов, Д.Д., Татусь, Н.А., Уточненный метод оценки модуля межслойного сдвига по поправке к прогибу образцов из полимерных композитов, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2023, т. 89, № 3, с. 57–69. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-3-57-69>
74. Полилов, А.Н., Власов, Д.Д., Татусь, Н.А., Уточненный критерий расслоения при изгибе композитной балки, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2023, т. 89, № 10, с. 63–73. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-63-73>
75. Alander, P., Lassila, L.V.J., and Vallittu, P.K., The Span Length and Cross-Sectional Design Affect Values of Strength, *Dent. Mater.*, 2005, vol. 21, pp. 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2004.05.009>
76. Abouelleil, H., Pradelle, N., Villat, C., Attik, N., Colon, P., and Grosogeat, B., Comparison of Mechanical Properties of a New Fiber Reinforced Composite and Bulk Filling Composites, *Restor. Dent. Endod.*, 2015, vol. 40(4), pp. 262–269. <https://doi.org/10.5395/rde.2015.40.4.262>
77. Garoushi, S., Lassila, L.V.J., and Vallittu, P.K., The Effect of Span Length of Flexural Testing on Properties of Short Fiber Reinforced Composite, *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2012, vol. 23, pp. 325–328. <https://doi.org/10.1007/s10856-011-4480-7>
78. Гарнопольский, Ю.М., Кинцис, Т.Я., *Методы статических испытаний армированных пластиков*, М.: Химия, 1975.
79. Tarnopol'skii, Y.M., Zhigun, I.G., and Polyakov, V.A., *Spatially Reinforced Composites*, Lancaster: Technomic Publ., 1992.
80. Stepanov, N.D., Shaysultanov, D.G., Chernichenko, R.S., Ikornikov, D.M., Sanin, V.N., and Zherebtsov, S.V., Mechanical Properties of a New High Entropy Alloy with a Duplex UltraFine-Grained Structure, *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 728(13), pp. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.118>
81. Хохлов, А.В., Анализ погрешности и повышение точности определения модулей упругости и сдвига в испытаниях на изгиб коротких образцов, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2025, т. 91, № 2, с. 54–67. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2025-91-2-54-67>
82. Хохлов, А.В., Особенности поведения вязкоупругопластических материалов, модели и система программ квазистатических испытаний полимеров и композитов для комплексного изучения их свойств и выбора и идентификации определяющих соотношений, *Высокомолекулярные соединения. Серия С*, 2024, т. 66, № 2, с. 157–212. <https://doi.org/10.31857/S2308114724020025>

83. Хохлов, А.В., Двусторонние оценки для функции релаксации линейной теории наследственности через кривые релаксации при RAMP-деформировании и методики ее идентификации, *Изв. РАН. МТТ*, 2018, № 3, с. 81–104. <https://doi.org/10.7868/S0572329918030108>
84. Khokhlov, A.V., Applicability Indicators and Identification Techniques for a Nonlinear Maxwell-Type Elastoviscoplastic Model Using Loading–Unloading Curves, *Mech. Compos. Mater.*, 2019, vol. 55(2), pp. 195–210. <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09809-w>
85. Khokhlov, A.V., Shaporev, A.V., and Stolyarov, O.N., Loading–Unloading-Recovery Curves for Polyester Yarns and Identification of the Nonlinear Maxwell-Type Viscoelastoplastic Model, *Mech. Compos. Mater.*, 2023, vol. 59(1), pp. 129–146. <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10086-x>
86. Хохлов, А.В., Анализ возможностей описания влияния гидростатического давления на кривые ползучести при растяжении и коэффициент Пуассона реономных материалов в рамках линейной теории вязкоупругости, *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2019, т. 23, № 2, с. 304–340. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1654>
87. Khokhlov, A.V. and Gulin, V.V., Families of Stress-Strain, Relaxation, and Creep Curves Generated by a Nonlinear Model for Thixotropic Viscoelastic-Plastic Media Accounting for Structure Evolution. Part 2. Relaxation and Stress-Strain Curves, *Mech. Compos. Mater.*, 2024, vol. 60(2), pp. 259–278. <https://doi.org/10.1007/s1102902410197-z>
88. Хохлов, А.В., Гибридизация определяющего соотношения линейной вязкоупругости и нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла и анализ сценариев эволюции коэффициента поперечной деформации при ползучести, *Физ. мезомех.*, 2024, т. 27, № 1, с. 20–48. https://doi.org/10.55652/1683805X_2024_27_1_20-48

С. 13–43

3. Научная статья

Сведения об авторах

Шабашов Валерий Александрович, д.ф.-м.н, г.н.с. ИФМ УрО РАН, shabashov@imp.uran.ru

Козлов Кирилл Александрович, к.ф.-м.н, с.н.с. ИФМ УрО РАН, kozlov@imp.uran.ru

Катаева Наталья Вадимовна, к.т.н, с.н.с. ИФМ УрО РАН, kataeva@imp.uran.ru

УДК 669.15-196:539.538:543.429.3

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_44-58

Поступила в редакцию 31.07.2024 г., после доработки 25.10.2024 г., принята к публикации 02.11.2024 г.

Формирование структуры естественного композита в стали Гадфильда при сверхвысокой пластической деформации. Часть 1

В.А. Шабашов¹, К.А. Козлов¹, Н.В. Катаева¹

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108 Россия

В классической стали Гадфильда (Fe–13Mn–1.1C) с использованием сверхвысокой пластической деформации впервые показано формирование аустенитного естественного композита, упрочненного наноразмерными карбидами $(\text{Fe}_{100-x}\text{Mn}_x)_3\text{C}$. Установлены механизм и кинетика процессов динамического деформационного старения стали в условиях воздействия сдвигом под давлением в наковальнях Бриджмена. Показано аномальное ускорение процессов динамического деформационного старения стали с образованием наноразмерных карбидов $(\text{Fe}_{100-x}\text{Mn}_x)_3\text{C}$ при увеличении степени и температуры деформации.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, пластическая деформация, давление, фазовые превращения, карбиды, мессбауэровская спектроскопия

Formation of a Natural Composite Structure in Hadfield Steel under Superplastic Deformation. Part 1

V.A. Shabashov¹, K.A. Kozlov¹, and N.V. Kataeva¹

¹ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

An austenitic natural composite structure reinforced with nanosized carbides $(\text{Fe}_{100-x}\text{Mn}_x)_3\text{C}$ was first formed in classical Hadfield steel (Fe–13Mn–1.1C) under superplastic deformation. The mechanism and kinetics of dynamic strain aging of the steel under shear deformation in Bridgman anvils were revealed. With deformation

and temperature, the steel demonstrates an anomalous acceleration of dynamic strain aging with the formation of nanosized carbides ($\text{Fe}_{100-x}\text{Mn}_x$)₃C.

Keywords: Hadfield steel, plastic deformation, pressure, phase transformations, carbides, Moessbauer spectroscopy

Литература

1. White, C.H. and Honeycomb, R.W.K., Structural Changes During the Deformation of High-Purity Iron-Manganese-Carbon Alloys, *J. Iron Steel Inst.*, 1962, vol. 200, no. 6, pp. 457–466.
2. Yeleussizova, A.A., Skakov, M.K., Zhilkashinova, A.M., and Rofman, O.V., Deformation Twinning in Hadfield Steel, *Adv. Mater. Res.*, 2013, vol. 772, pp. 62–67. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.772.62>
3. Nishiyama, B.Z., Oka, M., and Nakagawa, H., Transmission Electron Microscope Study of Cold-Rolled Hadfield Steel, *Trans. Jpn. Inst. Met.*, 1965, vol. 6, no. 2, pp. 88–92. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.6.88>
4. Dastur, Y.N. and Leslie, W.C., Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel, *Metall. Trans. A*, 1981, vol. 12, pp. 749–759. <https://doi.org/10.1007/BF02648339>
5. Shabashov, V.A., Korshunov, L.G., and Baldokhin, Yu.V., Mössbauer Study of the Structure of Steel 110G13 Deformed under Friction Conditions, *Phys. Met. Metallogr.*, 1989, vol. 67, no. 6, pp. 149–155.
6. Teplov, V.A., Korshunov, L.G., Shabashov, V.A., Kuznetsov, R.I., Pilyugin, V.P., and Tupitsa, D.I., Structural Transformations of High-Manganese Austenitic Steels During Deformation by Shear Under Pressure, *Phys. Met. Metallogr.*, 1988, vol. 66, no. 3, pp. 135–143.
7. Shabashov, V.A., Korshunov, L.G., Zamatovskii, A.E., and Litvinov, A.V., Mössbauer Analysis of the Magnetic Structure of a High-Carbon Austenitic Steel Upon Deformation and Under Pressure, *Phys. Met. Metallogr.*, 2007, vol. 104, pp. 361–371. <https://doi.org/10.1134/S0031918X07100067>
8. Glezer, A.M. and Metlov, L.S., Physics of Megaplastic (Severe) Deformation in Solids, *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, pp. 1162–1169. <https://doi.org/10.1134/S1063783410060089>
9. Mazanko, V.F., Gertzriken, D.S., Bevz, V.P., Mironov, V.M., and Mironova, O.A., Mass Transfer Under the Shock Compression in Metal Systems with Interlayer, *Metallofiz. Noveish. Tekhnol.*, 2010, vol. 32, pp. 1267–1275.
10. Razumov, I.K., Gornostyrev, Y.N., and Ermakov, A.E., Scenarios of Nonequilibrium Phase Transformations in Alloys Depending on the Temperature and Intensity of Plastic Deformation, *Phys. Met. Metallogr.*, 2018, vol. 119, pp. 1133 – 1140. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18120177>
11. Shabashov, V.A., Sagaradze, V.V., Kozlov, K.A., and Ustyugov, Y.M., Atomic Order and Submicrostructure in Iron Alloys at Megaplastic Deformation, *Metals*, 2018, vol. 8, p. 995. <https://doi.org/10.3390/met8120995>
12. Korshunov, L.G., Structural Transformations During Friction and Wear Resistance of Austenitic Steels, *Phys. Metals Metallogr.*, 1992, vol. 74, pp. 150–162.
13. Shabashov, V., Lyashkov, K., Kozlov, K., Zavalishin, V., Kataeva, N., Sagaradze, V., and Ustyugov, Y., Critical Redistribution of Nitrogen in the Austenitic Cr–Mn Steel Under Severe Plastic Deformation, *Materials*, 2021, vol. 14, p. 7116. <https://doi.org/10.3390/ma14237116>
14. Shabashov, V., Korshunov, L., Kozlov, K., Lyashkov, K., Zamatovskii, A., Dorofeev, G., and Kataeva, N., Structure–Phase Transitions in the Friction Contact Zone of High-Nitrogen Chromium-Manganese Austenitic Steel, *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1433. <https://doi.org/10.3390/met13081433>
15. Saunders, I. and Nutting, J., Deformation of Metals to High Strains Using Combination of Torsion and Compression, *Metal Science*, 1984, vol. 18, pp. 571–576. <https://doi.org/10.1179/030634584790419629>
16. Degtyarev, M.V., Chashchukhina, T.I., Voronova, L.M., Patselov, A.M., and Pilyugin, V.P., Influence of the Relaxation Processes on the Structure Formation in Pure Metals and Alloys Under High-Pressure Torsion, *Acta Mater.*, 2007, vol. 55, pp. 6039–6050. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.04.017>
17. Rusakov, V.S. and Kadyrzhanov, K.K., Mössbauer Spectroscopy of Locally Inhomogeneous Systems, *Hyperfine Interact.*, 2005, vol. 164, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1007/s10751-006-9236-2>
18. Sastri, S.A. and Ray, R., Mössbauer Studies on Aging of Highly Deformed Hadfield's Manganese Steel, *Metall. Trans.*, 1974, vol. 5, pp. 1501–1503. <https://doi.org/10.1007/BF02646637>
19. Бугаев, В.Н., Гаврилюк, В.Г., Надутов, В.М., Татаренко, В.А., Взаимодействие и распределение атомов в ГЦК–сплаве Fe–Mn–C, *Доклады академии наук СССР*, 1986, т. 288(2), с. 362–366.
20. Gauzzi, F., Principi, G., Verdini, B., and Zhang, P., Microstructural Features of Hadfield Steel Work-Hardening/Mikrostrukturelle Ursachen Der Verfestigung Durch Kaltverformung in Hadfield Stahl, *Int. J. Mater. Res.*, 1990, vol. 81(4), pp. 293–297. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1990-810412>
21. Fall, I. and Génin, J.M.R., Mössbauer Analysis of Fe–N Austenites, *Hyperfine Interact.*, 1992, vol. 69, pp. 513–516. <https://doi.org/10.1007/BF02401877>
22. Huffman, G.P., Errington, P.R., and Fisher, R.M., Mössbauer Study of the Fe–Mn Carbides ($\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x$)₃C and ($\text{Fe}_{1.1}\text{Mn}_{3.9}$)C₂, *Phys. Stat. Sol. B*, 1967, vol. 22, pp. 473–481. <https://doi.org/10.1002/pssb.19670220219>
23. Fasiska, E.J. and Jeffrey, G.A., On the Cementite Structure, *Acta Cryst.*, 1965, vol. 19, pp. 463–471. <https://doi.org/10.1107/S0365110X65003602>

24. Duggin, M.J., Cox, D., and Zwell, L., Structural Studies of the Carbides Fe,Mn₃C and Fe,Mn₅C₂, *Trans. Met. Soc. AIME*, 1966, vol. 236(9), pp. 1342–1346.
25. Chipman, J. and Brush, E.F., The Activity of Carbon in Alloyed Austenite at 1000°C, *Trans. Met. Soc. AIME*, 1968, vol. 242(1), pp. 35–41.
26. Van Der Woude, F. and Sawatzky, G.A., Mössbauer Effect in Iron and Dilute Iron Based Alloys, *Phys. Rep.*, 1974, vol. 12(5), pp. 335–374. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(74\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0370-1573(74)90025-8)
27. Vincze, I. and Campbell, I.A., Mossbauer Measurements in Iron Based Alloys with Transition Metals, *J. Phys. F: Met. Phys.*, 1973, vol. 3, pp. 647–663. <https://doi.org/10.1088/0305-4608/3/3/023>
28. Patselov, A.M., Degtyarev, M.V., Pilyugin, V.P., Chashchukhina, T.I., Voronova, L.M., Chernyshev, E.G., and Taluts, G.G., Stabilization of the ε Phase of the 12Kh18N10T Steel Upon Shear Under Pressure, *Phys. Metals Metallogr.*, 2004, vol. 98(2), pp. 206–212.
29. Korshunov, L.G., Shabashov, V.A., Chernenko, N.L., and Filippova, N.P., Effect of Antiferromagnetic Ordering on Tribologic Properties of High-Manganese Austenitic Steels, *Phys. Metals Metallogr.*, 1997, vol. 84, pp. 308–315.
30. Chamberod, A., Laugier, J., and Penisson, J.M., Electron Irradiation Effects on Iron-Nickel Invar Alloys, *J. Mag. Mag. Mat.*, 1979, vol. 10, pp. 139–144. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(79\)90165-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(79)90165-3)
31. Drijver, J.W., Van der Woude, F., and Radelaar, S., Mössbauer Study of Atomic Order in Ni₃Fe. I. Determination of The Long-Range-Order Parameter, *Phys. Rev. B*, 1977, vol. 16, pp. 985–992. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.985>
32. Бернштейн, М.Л., Займовский, В.А., Козлова, А.Г., Колупаева, Т.Л., Влияние горячей деформации аустенита стали 140Г13 на его структуру и кинетику последующих превращений, *Известия Академии наук СССР. Металлы*, 1977, № 1, с. 155–160.
33. Попова, Л.Е., Попов, А.А., *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана*, Москва: Металлургия, 1991.
34. Смирнов, М.А., Счастливцев, В.М., Журавлев, Л.Г., *Основы термической обработки стали*, М.: Наука и технологии, 2002.

С. 44–58

4. Научная статья

Сведения об авторах

Шабашов Валерий Александрович, д.ф.-м.н, г.н.с. ИФМ УрО РАН, shabashov@imp.uran.ru

Козлов Кирилл Александрович, к.ф.-м.н, с.н.с. ИФМ УрО РАН, kozlov@imp.uran.ru

Катаева Наталья Вадимовна, к.т.н, с.н.с. ИФМ УрО РАН, kataeva@imp.uran.ru

Андрей Евгеньевич Заматовский, ведущий электроник ИФМ УрО РАН, zamatovsky@mail.ru

УДК 69.15-196:539.379:543.429.3

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_59-68

Поступила в редакцию 31.07.2024 г., после доработки 25.10.2024 г., принята к публикации 06.11.2024 г.

Формирование дисперсно-упрочненной структуры в стали Гадфильда при фрикционном воздействии. Часть 2

В.А. Шабашов¹, К.А. Козлов¹, Н.В. Катаева¹, А.Е. Заматовский¹

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108 Россия

Методами мессбауэровской спектроскопии и электронной микроскопии исследована градиентная структура поверхностных слоев стали Гадфильда в условиях сухого трения скольжения. В зоне контактных напряжений на поверхности стали установлены структурно-фазовые переходы: в поверхностных слоях ~ 20 мкм наблюдается индуцированное деформацией ближнее упорядочение с увеличением числа соседств атомов марганца и углерода. В более тонких слоях до 1 мкм формируется структура нанокристаллических карбидов типа (Fe,Mn)₃C.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, пластическая деформация, трение, фазовые превращения, карбиды, мессбауэровская спектроскопия

Formation of a dispersion-hardened structure in Hadfield steel under friction. Part 2

V.A. Shabashov¹, K.A. Kozlov¹, N.V. Kataeva¹, and A.E. Zamatovskii¹

¹ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

The gradient structure formed in the surface layers of Hadfield steel under dry sliding friction was studied using Moessbauer spectroscopy and electron microscopy. Structural-phase transitions are established in the contact stress zone on the steel surface. The 20- μm -thick surface layers reveal strain-induced short-range ordering with an increased number of neighboring manganese and carbon atoms. Thinner (up to 1 μm) layers are composed of nanocrystalline carbides of the $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$ type.

Keywords: Hadfield steel, plastic deformation, friction, phase transformations, carbides, Moessbauer spectroscopy

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», № 122021000033-2).

Литература

1. Schrader, A. and Rose, A. (eds.), *De Ferri Metallographia. Vol. 2, Structure of Steels*, Dusseldorf: Verlag Stahleisen mbH, 1966, 559 p.
2. Гуляев, А.П., *Металловедение*, Москва: Металлургия, 1986, 544 с.
3. Dastur, Y.N. and Leslie, W.C., Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel, *Metall. Trans. A*, 1981, vol. 12, pp. 749–759. <https://doi.org/10.1007/BF02648339>
4. Adler, P.H., Olson, G.B., and Owen, W.S., Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel, *Metall. Trans. A*, 1986, vol. 17, pp. 1725–1737. <https://doi.org/10.1007/BF02817271>
5. Korshunov, L.G., Structural Transformations during Friction and Wear Resistance of Austenitic Steels, *Phys. Metals Metallogr.*, 1992, vol. 74, pp. 150–162.
6. White, C.H. and Honeycomb, R.W.K., Structural Changes during the Deformation of High-Purity Iron–Manganese–Carbon Alloys, *J. Iron Steel Inst.*, 1962, vol. 200, no. 6, pp. 457–466.
7. Yeleussizova, A.A., Skakov, M.K., Zhilkashinova, A.M., and Rofman, O.V., Deformation Twinning in Hadfield Steel, *Adv. Mater. Res.*, 2013, vol. 772, pp. 62–67. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.772.62>
8. Nishiyama, Z., Oka, M., and Nakagawa, H., Transmission Electron Microscope Study of Cold-Rolled Hadfield Steels, *Trans. Jpn. Inst. Met.*, 1965, vol. 6, pp. 88–91. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.6.88>
9. Shabashov V.A., Korshunov L.G., and Baldokhin Yu.V., Moessbauer study of the structure of steel 110G13 deformed under friction conditions, *Phys. Metals Metallogr.*, 1989, vol. 67(6), pp. 149–155.
10. Shabashov, V.A., Korshunov, L.G., Zamatovskii, A.E., and Litvinov, A.V., Mössbauer Analysis of the Magnetic Structure of a High-Carbon Austenitic Steel upon Deformation and under Pressure, *Phys. Met. Metallogr.*, 2007, vol. 104, pp. 361–371. <https://doi.org/10.1134/S0031918X07100067>
11. Glezer, A.M. and Metlov, L.S., Physics of Megaplastic (Severe) Deformation in Solids, *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, pp. 1162–1169. <https://doi.org/10.1134/S1063783410060089>
12. Razumov, I.K., Gornostyrev, Yu.N., and Ermakov, A.E., Scenarios of Nonequilibrium Phase Transformations in Alloys Depending on the Temperature and Intensity of Plastic Deformation, *Phys. Met. Metallogr.*, 2018, vol. 119, pp. 1133–1140. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18120177>
13. Shabashov, V., Sagaradze, V., Kozlov, K., and Ustyugov, Y., Atomic Order and Submicrostructure in Iron Alloys at Megaplastic Deformation, *Metals (Basel)*, 2018, vol. 8, p. 995. <https://doi.org/10.3390/met8120995>
14. Korshunov, L.G., Shabashov, V.A., Chernenko, N.L., and Pilyugin, V.P., Influence of the Stressed State of the Zone of Friction Contact on the Formation of the Structure of a Surface Layer and Tribological Properties of Steels and Alloys, *Phys. Met. Metallogr.*, 2008, vol. 105, pp. 64–78. <https://doi.org/10.1134/S0031918X08010079>
15. Shabashov, V., Lyashkov, K., Kozlov, K., Zavalishin, V., Zamatovskii, A., Kataeva, N., Sagaradze, V., and Ustyugov, Yu., Critical Redistribution of Nitrogen in the Austenitic Cr–Mn Steel under Severe Plastic Deformation, *Materials*, 2021, vol. 14, p. 7116. <https://doi.org/10.3390/ma14237116>
16. Shabashov, V., Korshunov, L., Kozlov, K., Lyashkov, K., Zamatovskii, A., Dorofeev, G., Kataeva, N., Structure–Phase Transitions in the Friction Contact Zone of High-Nitrogen Chromium–Manganese Austenitic Steel, *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1433. <https://doi.org/10.3390/met13081433>
17. Rusakov, V.S. and Kadyrzhanov, K.K., Mössbauer Spectroscopy of Locally Inhomogeneous Systems, *Hyperfine Interact.*, 2006, vol. 164, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1007/s10751-006-9236-2>
18. Huffman, G.P., Errington, P.R., and Fisher, R.M., Mössbauer Study of the Fe–Mn Carbides $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{C}$ and $(\text{Fe}_{1.1}\text{Mn}_{0.9})\text{C}_2$, *Phys. Status Solidi B*, 1967, vol. 22, pp. 473–481. <https://doi.org/10.1002/pssb.19670220219>

19. Korshunov, L.G., Sagaradze, V.V., Chernenko, N.L., and Shabashov, V.A., Friction-Induced Structural Transformations of the Carbide Phase in Hadfield Steel, *Phys. Met. Metallogr.*, 2015, vol. 116, pp. 823–828. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15080098>
20. Ino, H., Umezu, K., Kajiwara, S., and Uehara, S., Interstitial Solute Atom Configuration in Fe-N and Fe-C Based Austenite and the Relation to the Abnormal Tetragonality of Fresh Martensite, *Proc. Int. Conf. Martensitic Transformations (ICOMAT-86)*, 1986, pp. 313–318.
21. Бугаев, В.Н., Гаврилюк, В.Г., Надутов, В.М., Татаренко, В.А., Взаимодействие и распределение атомов в ГЦК–сплаве Fe–Mn–C, *Доклады академии наук СССР*, 1986, т. 288(2), с. 362–366.
22. Chipman, J. and Brush, E.F., The Activity of Carbon in Alloyed Austenite at 1000°C, *Trans. Met. Soc. AIME*, 1968, vol. 242, no. 1, pp. 35–41.
23. Gavriljuk, V., On the Correlation between Electron Structure and Short-Range Atomic Order in Iron-Based Alloys, *Acta Mater.*, 2000, vol. 48, pp. 3879–3893. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00192-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00192-0)
24. Duggin, M.J., Cox, D., and Zwell, L., Structural Studies of the Carbides Fe₃Mn₃C and Fe₃Mn₃C₂, *Trans. Met. Soc. AIME*, 1966, vol. 236, no. 9, pp. 1342–1346.
25. Endoh, Y. and Ishikawa, Y., Antiferromagnetism of γ Iron–Manganese Alloys, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1971, vol. 30, pp. 1614–1627. <https://doi.org/10.1143/jpsj.30.1614>

С. 59–68

5. Научная статья

Сведения об авторах

Полякова Вероника Васильевна, к.т.н., внс УУНиТ, vnur1k@yandex.ru

Гатина Светлана Азатовна, к.т.н., внс УУНиТ, lane_gatina@mail.ru

Новрузов Керям Мурсали, лаборант-исследователь ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, nkeryam@gmail.com

Анисимова Наталья Юрьевна, д.б.н., внс ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, n_anisimova@list.ru

Киселевский Михаил Валентинович, д.м.н., зав. лаб. ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, kisele@inbox.ru

Еникеев Нариман Айратович, д.ф.-м.н., гнс УУНиТ, nariman.enikeev@gmail.com

УДК 539.4; 539.5; 669; 620.172.2; 620.186; 617.3; 57.032

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_69-82

Поступила в редакцию 05.08.2024 г., после доработки 04.10.2024 г., принята к публикации 10.10.2024 г.

Влияние структурно-фазового состава на механические свойства и биосовместимость наноструктурированного сплава Ti-15Mo

В.В. Полякова¹, С.А. Гатина¹, К.М. Новрузов², Н.Ю. Анисимова², М.А. Киселевский²,
Н.А. Еникеев¹

¹ Лаборатория металлов и сплавов при экстремальных воздействиях,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008 Россия

² ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва, 115522 Россия

Проведено исследование влияния интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на особенности фазовых превращений и структурообразование в псевдо β -титановом сплаве Ti-15Mo (мас. %), а также изучена зависимость модуля упругости E и механических свойств наноструктурированного сплава от температуры старения в интервале 250–600 °С. Выявлено, что наноструктурирование при комнатной температуре до уровня деформации по Мизесу $\varepsilon \sim 200$ закаленного на β -раствор сплава Ti-15Mo приводит к формированию в нем однородной микроструктуры с высокой плотностью дефектов и размером структурных элементов менее 100 нм. Формирование наноструктуры обеспечило в сплаве Ti-15Mo повышение временного сопротивления σ_B на 80 % ($\sigma_B = 1550$ МПа, $\delta = 7$ %) по сравнению с аналогичными показателями состояния сплава, закаленного на β -твердый раствор. Показано, что после старения сплава Ti-15Mo в закаленном и деформированном состояниях происходит изотермический распад метастабильного β -твердого раствора с образованием ω и α -фазы. Высокая плотность дефектов наноструктурного сплава приводит к смещению температурного интервала выделения частиц α -фазы в область более низких температур (в среднем на 120 °С), а также оказывает значительное влияние на объемную долю и морфологию выделения частиц α -фазы, которая характеризуется равноосной формой, по сравнению с морфологией α -фазы игольчатой геометрии, выделяющейся при старении в

закаленном крупнозернистом состоянии сплава. После старения 600 °C в деформированном сплаве формируется равноосная $\alpha+\beta$ -структура со средним размером структурных элементов 380 нм. Анализ механических свойств после старения показал, что выделение дисперсных частиц ω -фазы дает значительный вклад в дисперсионное твердение Ti-15Mo, приводит к значительному повышению значения микротвердости на 50 % по сравнению с закаленным и деформированным состоянием, и с точки зрения макромеханического поведения является причиной охрупчивания сплава. Формирование равноосной $\alpha+\beta$ структуры, полученной интенсивной пластической деформации кручением и старением при 550 °C способствует достижению сбалансированных по прочности и пластичности механических свойств ($\sigma_B = 1270$ МПа, $\delta = 10$ %). Изменение структурно-фазового состава и соотношения фаз обеспечивает немонотонное поведение упругих характеристик сплава Ti-15Mo. Изучение биологической активности показало, что сплав Ti-15Mo в крупнозернистом и наноструктурном состоянии не проявляет цитотоксичности *in vitro* относительно лейкоцитов крови, что позволяет отнести эти образцы к биосовместимым. Однако в наноструктурных образцах наблюдалось интенсивное торможение поверхностной адгезии бактерий *S.aureus*, что потенциально может снизить риск развития постхирургических инфекционных осложнений после имплантации ортопедических металлоконструкций на основе обработанного таким образом сплава Ti-15Mo.

Ключевые слова: β -титановый сплав, наноструктурные материалы, кручение под высоким давлением, фазовый состав, деформационное поведение, биологическая активность

Effect of the structural-phase composition on the mechanical properties and biocompatibility of nanostructured Ti-15Mo alloy

V.V. Polyakova¹, S.A. Gatina¹, K.M. Novruzov², N.Yu. Anisimova², M.A. Kiselevskii², and N.A. Enikeev¹

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076, Russia

² N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, 115522 Russia

The paper is concerned with the effect of severe plastic deformation by torsion (SPDT) on phase transformations and structure formation in near- β titanium alloy Ti-15Mo (wt. %) as well as with the dependence of the elastic modulus E and mechanical properties of the nanostructured alloy on the aging temperature in the range 250–600 °C. It is revealed that room-temperature nanostructuring of the β -quenched Ti-15Mo alloy to the von Mises strain $\varepsilon \sim 200$ results in a homogeneous microstructure with a high defect density and the size of structural elements less than 100 nm. Formation of the nanostructure ensures an 80 % increase in the ultimate strength σ_B of the Ti-15Mo alloy ($\sigma_B = 1550$ МПа, $\delta = 7$ %) compared to that of the β -quenched alloy. It is shown that, after aging of the quenched and deformed Ti-15Mo alloy, the metastable β -solid solution experiences isothermal decomposition with the formation of the ω and α phases. The high defect density of the nanostructured alloy shifts the temperature range of the α -phase precipitation to lower temperatures (by 120 °C on average) and has a significant effect on the volume fraction and morphology of α -phase precipitates. The latter have an equiaxed shape compared to the needle-like α phase, which precipitates during aging of the quenched coarse-grained alloy. After aging at 600 °C, an equiaxed $\alpha+\beta$ structure with the average size of structural elements 380 nm is formed in the deformed alloy. Analysis of the mechanical properties after aging showed that the precipitation of dispersed ω -phase particles makes a significant contribution to precipitation hardening of Ti-15Mo alloy, significantly increases the microhardness (by 50 %) compared to the quenched and deformed alloy, and can be considered as a macromechanical cause of embrittlement of the alloy. The formation of an equiaxed $\alpha+\beta$ structure during SPDT and aging at 550 °C contributes to a balance between strength and ductility ($\sigma_B = 1270$ МПа, $\delta = 10$ %). The change in the structural-phase composition and phase ratio ensures a nonmonotonic behavior of the elastic characteristics of the Ti-15Mo alloy. The study of the biological activity showed that the Ti-15Mo alloy in the coarse-grained and nanostructured states does not exhibit *in vitro* cytotoxicity to blood leukocytes, which makes these specimens biocompatible. However, the nanostructured specimens demonstrate an intense inhibition of the surface adhesion of *S.aureus* bacteria, which can potentially reduce the risk of postsurgical infectious complications after implantation of orthopedic metal structures based on the Ti-15Mo alloy in the studied state.

Keywords: β -titanium alloy, nanostructured materials, high-pressure torsion, phase composition, deformation behavior, biological activity

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-69-10003.

Литература

1. Pesode, P. and Barve, S., A Review—Metastable β Titanium Alloy for Biomedical Applications, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2023, vol. 70, p. 25. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00196-7>

2. Liu, Y.C., Xu, T.W., Zhang, S.S., Lv, B.J., and Ji, H.B., Effect of Annealing and Build Direction on Microarc Oxidation Coatings and Its Apatite Induction Ability of Ti6Al4VE Alloy Manufactured by Selective Laser Melting, *J. Mater. Res.*, 2022, vol. 39, pp. 1873–1885. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00830-9>
3. Niinomi, M., Recent Research and Development in Titanium Alloys for Biomedical Applications and Healthcare Goods, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2003, vol. 4, pp. 445–454. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2003.09.002>
4. Ishimoto, T., Ozasa, R., Nakano, K., Weinmann, M., Schnitter, C., Stenzel, M., Matsugaki, A., Nagase, T., Matsuzaka, T., Todai, M., Kim, H.S., and Nakano, T., Development of TiNbTaZrMo Bio-High Entropy Alloy (BioHEA) Super-Solid Solution by Selective Laser Melting, and Its Improved Mechanical Property and Biocompatibility, *Scripta Mater.*, 2021, vol. 194, p. 113658. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.113658>
5. Wang, K., The Use of Titanium for Medical Applications in the USA, *Mater. Sci. Eng. A*, 1996, vol. 213, pp. 134–137. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10243-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10243-4)
6. Boehlert, C.J., Microstructure, Creep, and Tensile Behavior of a Ti–12Al–38Nb (at. %) Beta+orthorhombic Alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 1999, vol. 267, pp. 82–98. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(99\)00024-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(99)00024-6)
7. Reddy, P.G., Saklani, R., Mandal, M.K., and Domb, A.J., Introduction to Biomaterials, In: Domb, A., Mizrahi, B., Farah, S. (eds), *Biomaterials and Biopolymers. AAPS Introductions in the Pharmaceutical Sciences*, 2023, vol. 7, Cham: Springer, pp. 272. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36135-7_1
8. Haase, F., Siemers, C., and Rösler, J., Two Novel Titanium Alloys for Medical Applications: Thermo-Mechanical Treatment, Mechanical Properties, and Fracture Analysis, *J. Mater. Res.*, 2022, vol. 37, pp. 2589–2603. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00605-2>
9. Nagase, T., Iijima, Y., Matsugaki, A., Ameyama, K., and Nakano, T., Design and Fabrication of Ti–Zr–Hf–Cr–Mo and Ti–Zr–Hf–Co–Cr–Mo High-Entropy Alloys as Metallic Biomaterials, *Mater. Sci. Eng. C*, 2020, vol. 107, p. 110322. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110322>
10. Kaur, M., and Singh, K., Review on Titanium and Titanium Based Alloys as Biomaterials for Orthopaedic Applications, *Mater. Sci. Eng. C*, 2019, vol. 102, pp. 844–862. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.064>
11. Lowe, T.C., and Valiev, R.Z., *Frontiers for Bulk Nanostructured Metals in Biomedical Applications (Chapter 1)* in Tiwari, A., Nordin, A.N. (eds), *Advanced Biomaterials and Biodevices*, Beverly: Wiley-Scrivener Publishing LLC, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118774052.ch1>
12. Khadija, G., Saleem, A., Akhtar, Z., Naqvi, Z., Gull, M., Masood, M., Mukhtar, S., Batool, M., Saleem, N., Rasheed, T., Nizam, N., Ibrahim, A., and Iqbal, F., Short Term Exposure to Titanium, Aluminum and Vanadium (Ti 6Al 4V) Alloy Powder Drastically Affects Behavior and Antioxidant Metabolites in Vital Organs of Male Albino Mice, *Toxicol. Rep.*, 2018, vol. 5, pp. 765–770. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.06.006>
13. ATI 15Mo Titanium Alloys Technical Data Sheet. https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/titanium/alloyed/ati_15Mo_Titanium_Alloy_en_v4%20final.pdf. (Accessed June 4, 2024).
14. Edalati, K., et al, Severe Plastic Deformation for Producing Superfunctional Ultrafine-Grained and Heterostructured Materials: An Interdisciplinary Review, *J. Alloys Compd.*, 2024, vol. 1002, p. 174667. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174667>
15. Valiev, R.Z., Zheng, Y., and Edalati, K., Review: nanoSPD-Produced Metallic Materials for Advanced Medical Devices, *J. Mater. Sci.*, 2024, vol. 59, pp. 5681–5697. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09464-0>
16. Jiang, B., Tsuchiya, K., Emura, S., and Min, X., Effect of High-Pressure Torsion Process on Precipitation Behavior of α Phase in β -Type Ti-15Mo Alloy, *Mater. Trans.*, 2014, vol. 55, pp. 877–884. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2013469>
17. Janeček, M., Čížek, J., Stráský, J., Václavová, K., Hruška, P., Polyakova, V., Gatina, S., and Semenova, I., Microstructure Evolution in Solution Treated Ti15Mo Alloy Processed by High Pressure Torsion, *Mater. Charact.*, 2014, vol. 98, pp. 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.10.024>
18. Václavová, K., Stráský, J., Polyakova, V., Stráská, J., Nejezchlebová, J., Seiner, H., Semenova, I., and Janeček, M., Microhardness and Microstructure Evolution of Ultra-Fine Grained Ti-15Mo and TIMETAL LCB Alloys Prepared by High Pressure Torsion, *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, vol. 682, pp. 220–228, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.038>
19. Semenova, I.P., Gatina, S.A., Zhernakov, V.S., and Janecek, M., Improving in Fatigue Strength of Biomedical Ti-15Mo Alloy While Retaining Low Elastic Modulus through Severe Plastic Deformation, in *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium, San Diego*, 2015, pp. 1777–1781. <https://doi.org/10.1002/9781119296126.ch298>
20. Straumal, B., Gornakova, A., Davdian, G., Mazilkin, A., Gondek, Ł., Szczerba, M., and Korneva, A., Review – Phase Transitions in Ti Alloys Driven by the High Pressure Torsion, *Mater. Trans.*, 2023, vol. 64, pp. 1820–1832. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mt-mf2022044>
21. Gatina, S., Semenova, I., Leuthold, J., and Valiev, R., Nanostructuring and Phase Transformations in the β -Alloy Ti-15Mo during High-Pressure Torsion, *Adv. Eng. Mater.*, 2015, vol. 17, pp. 1742–1747. <https://doi.org/10.1002/adem.201500104>

22. Gatina, S.A., Semenova, I.P., Ubyyovok, E.V., and Valiev, R.Z., Phase Transformations, Strength, and Modulus of Elasticity of Ti–15Mo Alloy Obtained by High-Pressure Torsion, *Inorg. Mater.: Appl. Res.*, 2018, vol. 9, pp. 14–20. <https://doi.org/10.1134/s2075113318010136>
23. Bartha, K., Stráský, J., Barribero-Vila, P., Šmilauerová, J., Doležal, P., Veselý, J., Semenova, I., Polyakova, V., and Janeček, M., In-Situ Investigation of Phase Transformations in Ultra-Fine Grained Ti15Mo Alloy, *J. Alloys Compd.*, 2021, vol. 867, p. 159027. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159027>
24. Gornakova, A.S., Korneva, A., Tyurin, A.I., Afonikova, N.S., Kilmametov, A.R., and Straumal, B.B., Omega Phase Formation and Mechanical Properties of Ti–1.5 Wt.% Mo and Ti–15 Wt.% Mo Alloys after High-Pressure Torsion, *Processes*, 2023, vol. 11, p. 221, <https://doi.org/10.3390/pr11010221>
25. Bartha, K., Stráský, J., Veverková, A., Veselý, J., Čížek, J., Málek, J., Polyakova, V., Semenova, I., and Janeček, M., Phase Transformations upon Ageing in Ti15Mo Alloy Subjected to Two Different Deformation Methods, *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1230. <https://doi.org/10.3390/met11081230>
26. Bartha, K., Veverková, A., Stráský, J., Veselý, J., Minárik, P., Corrêa, C.A., Polyakova, V., Semenova, I., and Janeček, M., Effect of the Severe Plastic Deformation by ECAP on Microstructure and Phase Transformations in Ti-15Mo Alloy, *Mater. Today Commun.*, 2020, vol. 22, p. 100811. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100811>
27. Edalati, K. and Horita, Z., A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988, *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, vol. 652, pp. 325–352. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>
28. Anisimova, N., Kiselevskiy, M., Martynenko, N., Straumal, B., Willumeit-Römer, R., Dobatkin, S., and Estrin, Y., Cytotoxicity of biodegradable magnesium alloy WE43 to tumor cells in vitro: Bioresorbable implants with antitumor activity, *J. Biomed. Mater. Res. B*, 2020, vol. 108, pp. 167–173. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34375>
29. Zháňal, P., Harcuba, P., Hájek, M., Smola, B., Stráský, J., Šmilauerová, J., Veselý, J., and Janeček, M., Evolution of ω Phase during Heating of Metastable β Titanium Alloy Ti–15Mo, *J. Mater. Sci.*, 2017, vol. 53, pp. 837–845. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1519-2>
30. Bowen, A.W., Strength Enhancement in a Metastable β -Titanium Alloy: Ti-15Mo, *J. Mater. Sci.*, 1977, vol. 12, pp. 1355–1360. <https://doi.org/10.1007/bf00540849>
31. Ivasishin, O.M., Markovsky, P.E., Semiatin, S.L., and Ward, C.H., Aging Response of Coarse- and Fine-Grained β Titanium Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, vol. 405, pp. 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.027>
32. Xu, W., Wu, X., Stoica, M., Calin, M., Kühn, U., Eckert, J., and Xia, K., On the Formation of an Ultrafine-Duplex Structure Facilitated by Severe Shear Deformation in a Ti–20Mo β -Type Titanium Alloy, *Acta Mater.*, 2012, vol. 60, pp. 5067–5078. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.042>
33. Cao, S., Chen, W., Yang, R., and Hu Q.-M., Origin of the ω -Strengthening and Embrittlement in β -Titanium Alloys: Insight from First Principles, *Phys. Mesomech.*, 2021, vol. 24, pp. 513–522. <https://doi.org/10.1134/S1029959921050027>
34. Kobelev, N., Kolyvanov, E., and Estrin, Y., Temperature Dependence of Sound Attenuation and Shear Modulus of Ultra Fine Grained Copper Produced by Equal Channel Angular Pressing, *Acta Mater.*, 2008, vol. 56, pp. 1473–1481. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.034>
35. Kardashev, B.K., Narykova, M.V., Betekhtin, V.I., and Kadomtsev A.G., Evolution of Elastic Properties of Ti and Its Alloys due to Severe Plastic Deformation, *Phys. Mesomech.*, 2020, vol. 23, pp. 193–198. <https://doi.org/10.1134/S1029959920030029>
36. Pal-Val, P., Pal-Val, L., Natsik, V., Davydenko, A., and Rybalko, A., Giant Young's Modulus Variations in Ultrafine-Grained Copper Caused by Texture Changes at Post-SPD Heat Treatment, *Arch. Metall. Mater.*, 2015, vol. 60, pp. 3073–3076. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0491>
37. Guo, S., Meng, Q., Hu, L., Liao, G., Zhao, X., and Xu, H., Suppression of Isothermal ω Phase by Dislocation Tangles and Grain Boundaries in Metastable β -Type Titanium Alloys, *J. Alloys Compd.*, 2013, vol. 550, pp. 35–38. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.081>
38. Nag, S., Banerjee, R., Srinivasan, R., Hwang, J.Y., Harper, M., and Fraser, H.L., ω -Assisted Nucleation and Growth of α Precipitates in the Ti–5Al–5Mo–5V–3Cr–0.5Fe β Titanium Alloy, *Acta Mater.*, 2009, vol. 57, pp. 2136–2147. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.01.007>
39. Ogawa, Y., Hosoi, H., Tsuzaki, K., Redarce, T., Takakuwa, O., and Matsunaga, H., Hydrogen, as an Alloying Element, Enables a Greater Strength-Ductility Balance in an Fe-Cr-Ni-Based, Stable Austenitic Stainless Steel, *Acta Mater.*, 2020, vol. 199, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.08.024>
40. Koyama, M., Sawaguchi, T., and Tsuzaki, K., TWIP Effect and Plastic Instability Condition in an Fe–Mn–C Austenitic Steel, *ISIJ Int.*, 2013, vol. 53(2), pp. 323–329. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.323>

Сведения об авторах

Ботвина Людмила Рафаиловна, д.ф.-т.н., проф., гнс ИМЕТ РАН, lbotvina@imet.ac.ru

Тютин Марат Равилевич, к.т.н., внс, зав. лаб. ИМЕТ РАН, mtyutin@imet.ac.ru

Kartik Prasad, Senior Scientist, DRML (Лаборатория оборонных металлургических исследований), kartik.dmrl@gov.in

УДК 620.178.322.1

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_83-100

Поступила в редакцию 07.08.2024 г., после доработки 29.09.2024 г., принята к публикации 23.10.2024 г.

K_S циклической вязкости разрушения с позиций физики и механики разрушения

Л.Р. Ботвина¹, М.Р. Тютин^{1,2}, К. Prasad³

¹ Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, Москва, 119334 Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, 105005 Россия

³ Defence Metallurgical Research Laboratory (Лаборатория оборонных металлургических исследований), Kanchanbagh P.O., Hyderabad, 500058 India

В работе проанализирована стадийность и кинетические особенности роста усталостной трещины. Особое внимание уделено второй стадии усталостного разрушения, состоящей из двух подобластей — Π_a и Π_b . Предложен параметр, коэффициент интенсивности напряжений K_S , определяющий границу между ними, соответствующий длине l_S трещины стабильного роста в условиях плоскодеформированного состояния и характеризующий циклическую вязкость разрушения. Предположено, что значение параметра K_S отвечает коэффициенту интенсивности напряжений K_{GY} , оцененному по циклическому пределу текучести и длине очаговой усталостной трещины. Увеличение размера пластической зоны в вершине трещины и переход к плосконапряженному состоянию при $K \geq K_S$ приводит к изменению ряда закономерностей усталостного разрушения, в том числе, к появлению переломов на зависимостях от K_{max} параметров акустической эмиссии, интенсивности фазовых превращений в метастабильной стали и расстояния между усталостными бороздками: после достижения K_S рост усталостной трещины происходит по механизму «бороздка за цикл». Кроме того, показано, что значение $K = K_S$ соответствует точке поворота диаграмм роста трещины, построенных для стали, испытанной в условиях смешанных мод нагружения.

Ключевые слова: Механика разрушения, циклическая вязкость разрушения, циклическое нагружение, рост усталостной трещины

On the cyclic fracture toughness parameter, K_S , from the standpoint of fracture physics and mechanics

L.R. Botvina¹, M.R. Tyutin^{1,2}, and K. Prasad³

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

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

³ Defense Metallurgical Research Laboratory, Kanchanbagh P.O. Hyderabad, 500058 India

The paper analyzes the stages and kinetic features of fatigue crack growth. Particular attention is paid to fatigue stage II consisting of two substages, namely, Π_a and Π_b . The stress intensity factor K_S is proposed to determine the boundary between them (corresponds to the stable crack length l_S under plane-strain conditions) and to characterize the cyclic fracture toughness. It is assumed that K_S corresponds to the stress intensity factor K_{GY} estimated by the cyclic yield stress and the length of a focal fatigue crack. Enlargement of the plastic zone at the crack tip and the transition to a plane-stress state at $K \geq K_S$ change the fatigue fracture pattern, which manifests as knee points in the K_{max} dependences of acoustic emission parameters, phase transformation rate in metastable steel, and distance between fatigue striations: after reaching K_S , the fatigue crack grows by the one-striation-per-cycle pattern. In addition, it is shown that the value of $K = K_S$ corresponds to the turning point of the crack growth curve plotted for the steel tested in mixed loading modes.

Keywords: fracture mechanics, cyclic fracture toughness, cyclic loading, fatigue crack growth

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00784).

Литература

1. Milella P.P., *Fatigue and Corrosion in Metals*, Cham: Springer International Publishing, 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51350-3>
2. Jiang, Z., Sun, J., Berto, F., Wang, X., Qian, G., Усталость и разрушение сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного плавления, *Физ. мезомех.*, 2023, т. 26, № 2, с. 5–29. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_2_5
3. Панин, С.В., Богданов, А.А., Алексенко, В.О., Бочкарева, С.А., Любутин, П.С., Панов, И.Л., Дэфан, Т., Анализ деградации свойств при усталости слоистых полимерных композитов (полиэфирэфиркетон/полиэфиримид, ПЭЭК/ПЭИ) и препрега на основе углеволоконной ткани с использованием корреляции цифровых изображений, *Физ. мезомех.*, 2024, т. 27, № 3, с. 58–78. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2024_27_3_58-78
4. Изюмова, А.Ю., Вшивков, А.Н., Плехов, О.А., Развитие экспериментальной методики оценки эволюции усталостной трещины в титановых сплавах на основе энергетического подхода, *Физ. мезомех.*, 2023, т. 26, № 5, с. 61–70. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_5_61
5. Paris, P. and Erdogan, F., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *J. Basic Eng.*, 1963, vol. 85(4), pp. 528–533. <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
6. Ritchie, R.O., Near-Threshold Fatigue Crack Propagation in Ultra-High Strength Steel: Influence of Load Ratio and Cyclic Strength, *J. Eng. Mater. Technol.*, 1977, vol. 99(3), pp. 195–204. <https://doi.org/10.1115/1.3443519>
7. Ritchie, R.O., Influence of Microstructure on Near-Threshold Fatigue-Crack Propagation in Ultra-High Strength Steel, *Met. Sci.*, 1977, vol. 11(8–9), pp. 368–381. <https://doi.org/10.1179/msc.1977.11.8-9.368>
8. Ritchie, R.O., Mechanism of Fatigue-Crack Propagation in Ductile and Brittle Materials, *Int. J. Fract.*, 1998, vol. 100, pp. 55–83. <https://doi.org/10.1023/A:1018655917051>
9. Birkbeck, G., Inckle, A.E., and Waldron, G.W.J., Aspects of Stage II Fatigue Crack Propagation in Low-Carbon Steel, *J. Mater. Sci.*, 1971, vol. 6(4), pp. 319–323. <https://doi.org/10.1007/BF02403099>
10. Grinberg, N., Stage II Fatigue Crack Growth, *Int. J. Fatigue*, 1984, vol. 6(4), pp. 229–242. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(84\)90054-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(84)90054-9)
11. Inckle, A.E., Birkbeck, G., and Waldron, G.W.J., The Application of Fractography to Demonstrate the Presence of Crack Tip Residual Stresses during Programmed Fatigue Crack Propagation in Mild Steel, *Metall. Trans. A*, 1976, vol. 7(11), pp. 1655–1660. <https://doi.org/10.1007/BF02817882>
12. Wang, Y., Ma, H., and Zhang, Y., Fatigue Crack Growth Behavior for Gas Tungsten Arc Welded Joint of TC2 Titanium Alloys Sheets, *Mater. Sci. Eng. A*, 2023, vol. 881, p. 145385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145385>
13. King, J.E., Effects of Grain Size and Microstructure on Threshold Values and near Threshold Crack Growth in Powder-Formed Ni-Base Superalloy, *Met. Sci.*, 1982, vol. 16(7), pp. 345–355. <https://doi.org/10.1179/030634582790427479>
14. Yoshinaka, F., Nakamura, T., and Takaku, K., Effects of Vacuum Environment on Small Fatigue Crack Propagation in Ti–6Al–4V, *Int. J. Fatigue*, 2016, vol. 91, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.024>
15. Okuyama, Y., Tanaka, M., and Morikawa, T., Temperature Independences of Fatigue Crack Growth in Ti–0.49 mass%O, *Mater. Trans.*, 2022, vol. 63(4), pp. 600–606. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2021211>
16. Anne, B.R., Tanaka, M., Yamasaki, S., and Morikawa, T., Effects of Temperature and Stress Ratio on Stage II Fatigue Crack Propagation in Bimodal Ti–6Al–4V, *Mater. Trans.*, 2021, vol. 62(7), pp. 968–974. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020399>
17. Ботвина, Л.Р., Ярема, С.Я., Гречко, В.В., Лимарь, Л.В. Кинетика усталостного разрушения титанового сплава ВТЗ-1, *ФХММ*, 1981, № 6, с. 39–45.
18. Ботвина, Л.Р., Клевцов, Г.В., Козлов, П.М., Степанов, Г.А., Связь фазовых превращений в аустенитных сталях с размахом коэффициента интенсивности напряжений, *ФММ*, 1982, т. 54, № 3, с. 507–511.
19. Kumar, J., Ahmad, S., Mukhopadhyay, C.K., Jayakumar, T., and Kumar V., Acoustic Emission Studies for Characterization of Fatigue Crack Growth Behavior in HSLA Steel, *Nondestruct. Test. Eval.*, 2016, vol. 31(1), pp. 77–96. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1070850>
20. Iost, A. and Lesage, J., On the Existence of a Pivot Point for Stage II Fatigue Crack Growth, *Eng. Fract. Mech.*, 1990, vol. 36(4), pp. 585–596. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(90\)90114-V](https://doi.org/10.1016/0013-7944(90)90114-V)
21. Ботвина, Л.Р., Ильченко, Б.В., Структурные эффекты при смешанных модах статического и циклического нагружения, *Деформация и разрушение материалов*, 2008, № 9, с. 12–19.
22. Ботвина, Л.Р., Шабалина, В.Н., Жегина, И.П., Стойда, Ю.М., Микрорельеф усталостных изломов образцов из алюминиевых сплавов при высокочастотном нагружении, *ФХММ*, 1980, № 5, с. 41–43.
23. Иванова, В.С., Маслов, Л.И., Ботвина, Л.Р., Фрактографические особенности и вязкость разрушения стали при циклическом нагружении, *Проблемы прочности*, 1972, № 2, с. 37–41.

24. Гуревич, С.Е., Едидович, Л.Д., О скорости распространения трещины и пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения, *Усталость и вязкость разрушения металлов*, 1974, с. 36–78.
25. Ботвина, Л.Р., Лимарь, Л.В., О зависимости шага усталостных бороздок от размаха коэффициента интенсивности напряжений, *ФХММ*, 1985, т. 2, № 2, с. 46–55.
26. Шабалин, В.И., О разрыве в кривых усталости дуралюмина, *Докл. АН СССР*, 1958, т. 122, № 4, С. 600–604.
27. Ботвина, Л.Р., Критерий усталостного разрушения, характеризующий начало развитого пластического течения в вершине трещины, *Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов*, 1981. С. 53–59.
28. Ботвина, Л.Р., Шабалина, В.Н., О разрыве кинетических диаграмм усталостного разрушения, *Проблемы Прочности*, 1986, т. 9, с. 62–67.
29. Ботвина, Л.Р., Клевцов, Г.В., Кинетика развития зон пластической деформации при усталостном разрушении стали 20, *ФХММ*, 1983, № 1, с. 39–44.
30. Ботвина, Л.Р., Тютин, М.Р. Формирование каскада пластических зон при циклическом нагружении малоуглеродистой стали, *Доклады Академии Наук*, 2007, т. 417, № 5, с. 635–638.
31. Du, Y.N., Zhu, M.L., and Xuan, F.Z., Transitional Behavior of Fatigue Crack Growth in Welded Joint of 25Cr2Ni2MoV Steel, *Eng. Fract. Mech.*, 2015, vol. 144, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.065>.
32. Zhuang, B.B., Du, Y.N., Weng, S., Zhu, M.L., and Xuan, F.Z., On the Significance of Transition Behavior in Fatigue Crack Growth, *Eng. Fract. Mech.*, 2022, vol. 262, p. 108271. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108271>.
33. Pelloux, R.M.N., Crack Extension by Alternating Shear, *Eng. Fract. Mech.*, 1970, vol. 1(4), pp. 697–704. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(70\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0013-7944(70)90008-1).
34. Neumann, P., Coarse Slip Model of Fatigue, *Acta Metall.*, 1969, vol. 17(9), pp. 1219–1225. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(69\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(69)90099-6).
35. Rice, J.R., Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue, Fatigue Crack Propagation, *West Conshohocken: ASTM International*, 1967. p. 247. <https://doi.org/10.1520/STP47234S>
36. Ботвина, Л.Р., *Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности*, М: Наука, 2008.
37. Plumbridge, W.J. and Ryder, D.A., The Influence of Specimen Geometry on the Mode of Fatigue Crack Growth in Aluminium, *Acta Metall.*, 1969, vol. 17(12), pp. 1449–1452. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(69\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(69)90008-X).
38. Plumbridge, W.J., Review: Fatigue-Crack Propagation in Metallic and Polymeric Materials, *J. Mater. Sci.*, 1972, vol. 7(8), pp. 939–962. <https://doi.org/10.1007/BF00550441>.
39. Newman, Jr. J.C., Swain, M.H., and Phillips, E.P., *An Assessment of the Small-Crack Effect for 2024-T3 Aluminum Alloy, Proc. 2nd Eng. Foundation Int. Conf. Workshop*, ed. Ritchi R.O., Lankford J. Metallurgical Soc., Inc., 1986. pp. 427–452.
40. Broek, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2558-8>
41. Klevtsov, G.V., Valiev, R.Z., Klevtsova, N.A., Glezer, A.M., and Pigaleva, I.N., Local State of Stress of the Material at the Crack Tip for Various Types of Loading, *Russ. Metall.*, 2021, vol. 2021(10), pp. 1177–1182. <https://doi.org/10.1134/S0036029521100165>.
42. González-Velázquez, J.L., *Fatigue Fracture in Fractography and Failure Analysis*, Cham: Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76651-5>
43. Maruschak, P., Vorobel, R., Student, O., Ivasenko, I., Krechkovska, H., Berehulyak, O., Mandziy, T., Svirskia, L., and Prentkovskis, O., Estimation of Fatigue Crack Growth Rate in Heat-Resistant Steel by Processing of Digital Images of Fracture Surfaces, *Metals*, 2021, vol. 11(11), p. 1776. <https://doi.org/10.3390/met11111776>.
44. Ботвина, Л.Р., *Кинетика разрушения конструкционных материалов*, Москва: Наука, 1989.
45. Bates, R.C., Clark, W.G., and Moon, D.M. *Correlation of Fractographic Features with Fracture Mechanics Data in Electron Microfractography*, West Conshohocken: ASTM International, 1969. <https://doi.org/10.1520/STP47362S>
46. Bajaj, D., Sundaram, N., and Arola, D. An Examination of Fatigue Striations in Human Dentin:in Vitro Andin Vivo, *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.*, 2008, vol. 85(1), pp. 149–159. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30927>.
47. Amsterdam, E. and Grooteman, F., The Influence of Stress State on the Exponent in the Power Law Equation of Fatigue Crack Growth, *Int. J. Fatigue.*, 2016, vol. 82, pp. 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.013>.
48. Zuidema, J., Veer, F., Van Kranenburg, C., Shear Lips on Fatigue Fracture Surfaces of Aluminum Alloys, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2005, vol. 28(1–2), pp. 159–167. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2004.00837.x>.
49. Tanaka, K. and Matsuoka, S., A Tentative Explanation for Two Parameters, C and m, in Paris Equation of Fatigue Crack Growth, *Int. J. Fract.*, 1977, vol. 13(5), pp. 563–583. <https://doi.org/10.1007/BF00017293>.

50. Shlyannikov, V.N., Botvina, L.R., and Itchenko, B.V. Mechanisms of Crack Growth in Mixed Modes Fracture Conditions Depending on the Steel Structure Type, *Book of Abstract Proc. 7th Int. Conf. on Mech. Behavior of Mater.*, vol 995, pp. 173–190.
51. Richard, H.A., *Specimens for Investigating Biaxial Fracture and Fatigue Processes in Biaxial and Multiaxial Fatigue, EFG3*, London: Mechanical Engineering Publications, 1989.
52. Шлянников, В.Н., Долгоруков, В.А., Метод определения характеристик циклической трещиностойкости для смешанных форм развития трещин, Заводская лаборатория, 1987, т. 53, № 8, с. 67–71.
53. Tenhaeff, D., *Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Rissen bei überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung*, Kaiserslautern: Diss., Univ., 1987, 114 p.
54. Лимарь, Л.В., Ботвина, Л.Р., Ярема, С.Я., Структурные аспекты роста усталостной трещины в титановом сплаве ВТ3-1, *ФХММ*, 1989, № 1, с. 83–88.
55. Amsterdam, E., Wiegman, J.W.E., Nawijn, M., and De Hosson, J. Th. M., The Effect of Crack Length and Maximum Stress on the Fatigue Crack Growth Rates of Engineering Alloys, *Int. J. Fatigue*, 2022, vol. 161, p. 106919. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106919>.
56. Клевцов, Г.В., Ботвина, Л.Р., Клевцова, Н.А., Лимарь, Л.В., *Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций*, Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2007.
57. Moorthy, V., Jayakumar, T., and Baldev, R., Influence of Micro Structure on Acoustic Emission Behavior during Stage 2 Fatigue Crack Growth in Solution Annealed, Thermally Aged and Weld Specimens of AISI Type 316 Stainless Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 1996, vol. 212(2), pp. 273–280. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10206-9](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10206-9).
58. Chai, M., Zhang, J., Zhang, Z., Duan, Q., and Cheng, G., Acoustic Emission Studies for Characterization of Fatigue Crack Growth in 316LN Stainless Steel and Welds, *Appl. Acoust.*, 2017, vol. 126, pp. 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.014>.

C. 83–100

7. Научная статья

Сведения об авторах

Ерисов Ярослав Александрович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ОМД, Самарский Университет, erisov@ssau.ru

Гречников Федор Васильевич, д.т.н., ак. РАН, научный руководитель, СамНЦ РАН, presidium@ssc.smr.ru

Сурудин Сергей Викторович, к.т.н., доцент кафедры ОМД, Самарский Университет, surudin.sv@ssau.ru

Разживин Василий Андреевич, ассистент кафедры ОМД Самарский Университет, razzhivin.va@ssau.ru

Арышенский Евгений Владимирович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ОМДиМ, СибГИУ, arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Коновалов Сергей Валерьевич, д.т.н., профессор, проректор по НИИД, СибГИУ, konovalov@sibsiu.ru

УДК 539.4; 539.5; 669; 620.172.2; 620.186; 617.3; 57.032

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_101-119

Поступила в редакцию 07.08.2024 г., после доработки 26.09.2024 г., принята к публикации 08.10.2024 г.

Разработка модели фестонообразования с учетом кристаллографической текстуры листового металла при осесимметричной вытяжке

Я.А. Ерисов¹, Ф.В. Гречников^{1,2}, С.В. Сурудин^{1,2}, В.А. Разживин¹,
Е.В. Арышенский³, С.В. Коновалов³

¹ Самарский университет, Самара, 443086 Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самара, 443001 Россия

³ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007 Россия

Разработана модель, позволяющая рассчитывать фестонообразование на основе феноменологического критерия пластичности с учетом кристаллографической текстуры материала при цилиндрической вытяжке металлических материалов. Адекватность модели была проверена сравнением фестонистости, полученной в ходе расчетов и определенной экспериментально после вытяжки алюминиевой заготовки. Дальнейшее моделирование показало, что ориентировки деформационного типа ($\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{110\}\langle 112 \rangle$, $\{123\}\langle 634 \rangle$)

и $\{100\}\langle 011\rangle$) ведут к образованию фестонов под углом 45° к направлению прокатки, а ориентировки рекристаллизационного типа ($\{100\}\langle 001\rangle$ и $\{110\}\langle 001\rangle$) — в направлении прокатки и поперечном направлении. Кристаллографическая ориентировка $\{110\}\langle 001\rangle$ ведет к максимальному фестонообразованию, а ориентировка $\{123\}\langle 634\rangle$ — к минимальному. Во всех рассмотренных случаях вклад пластической анизотропии и анизотропии предела текучести в фестонообразование практически одинаков с небольшим преобладанием влияния анизотропии предела текучести. Изменение характера фестонов показано на примере двухкомпонентной текстуры, состоящей из ориентировок $\{112\}\langle 111\rangle$ и $\{100\}\langle 001\rangle$: с увеличением доли ориентировки $\{112\}\langle 111\rangle$ уменьшаются фестоны в направлении прокатки и поперечном направлении, фестоны образуются под углом 45° к направлению прокатки. Такое влияние этих ориентировок приводит к тому, что при доле компонента $\{112\}\langle 111\rangle$ в 55–60 % достигается минимальный коэффициент фестонообразования.

Ключевые слова: фестонообразование, кристаллографическая текстура, критерий пластичности, алюминий, цилиндрическая вытяжка.

Development of an Earing Model with Consideration for the Crystallographic Texture of Sheet Metal During Axisymmetric Drawing

Ya. Erisov¹, F. Grechnikov^{1,2}, S. Suridin^{1,2}, V. Razzhivin¹,
E. Aryshenskii³, and S. Konovalov³

¹ Samara University, Samara, 443086 Russia

² Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Samara, 443001 Russia

³ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia

This A calculation model is developed for earing during cylindrical drawing of metallic materials, which is based on the phenomenological criterion of plasticity and takes into account the crystallographic texture of the material. The model was verified by comparing the calculated earing defects with those observed in drawing tests on an aluminum preform. Further simulation shows that deformation orientations ($\{112\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{123\}\langle 634\rangle$, and $\{100\}\langle 011\rangle$) lead to earing at an angle of 45° to the rolling direction, while recrystallization orientations ($\{100\}\langle 001\rangle$ and $\{110\}\langle 001\rangle$) lead to earing in the rolling and transverse directions. Crystallographic orientation $\{110\}\langle 001\rangle$ gives maximum earing, while orientation $\{123\}\langle 634\rangle$ leads to minimum one. In all the cases, the contribution of plastic anisotropy and yield stress anisotropy to earing is almost the same, with a slight predominance of the influence of the yield strength anisotropy. The earing pattern changes in materials with a two-component ($\{112\}\langle 111\rangle + \{100\}\langle 001\rangle$) texture: as the proportion of the $\{112\}\langle 111\rangle$ orientation grows, earing defects in the rolling and transverse directions are reduced, while they form at an angle of 45° to the rolling direction. Considering such influence, the minimum earing coefficient is achieved at 55–60% of the $\{112\}\langle 111\rangle$ component.

Keywords: aluminum alloys, scandium, hafnium, heat treatment, atomic probe tomography, transmission microscopy

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00590, <https://rscf.ru/project/24-19-00590/>

Литература

1. Швейкин, А.И., Вшивкова, А.А., Трусов, П.В., О способах учета изменяющихся температурно-скоростных условий в многоуровневых конститутивных моделях для описания деформирования металлов (аналитический обзор), *Физ. мезомех.*, 2023, т. 26, № 6, с. 27–48. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_6_27
2. Балохонов, Р.Р., Сергеев, М.В., Романова, В.А., Моделирование деформации и разрушения поликристаллов алюминиевого сплава в условиях динамического нагружения, *Физ. мезомех.*, 2023, т. 26, № 1, с. 31–46. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_1_31
3. Грибов, Д.С., Трусов, П.В., Дислокационно-ориентированная трехуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритм реализации, примеры применения для исследования сложного циклического нагружения, *Физ. мезомех.*, 2022, т. 25, № 4, с. 94–105. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_94
4. Ташкинов, М.А., Шалимов, А.С., Моделирование влияния микромасштабных морфологических параметров на деформационное поведение пористых материалов с металлической матрицей, *Физ. мезомех.*, 2021, т. 24, № 5, с. 130–137. <https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-5-130-137>
5. Гречников, Ф.В., Ерисов, Я.А., Научные основы создания листовых материалов для аэрокосмической техники с заданной кристаллографией структуры, *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2018, т. 1, с. 15–19. <https://doi.org/10.30906/mitom.2018.1.15-19>

6. Гречников, Ф.В., Ерисов, Я.А., Разработка критерия пластичности для расчётов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок, *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2012, т. 1, № 32, с. 94–99.
7. Gandin, C.A., Rappaz, M., West, D., and Adams, B.L., Grain Texture Evolution During the Columnar Growth of Dendritic Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, 1995, vol. 26, pp. 1543–1551. <https://doi.org/10.1007/BF02647605>
8. Farajollahi, R., Aval, H.J., and Jamaati, R., Evaluating of the Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of AA2024-Al3NiCu Composites Fabricated by the Stir Casting Process, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2022, vol. 37, pp. 204–218. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.013>
9. Zhang, Y.X., Lan, M.F., Wang, Y., Fang, F., Lu, X., Yuan, G., and Wang, G. D., Microstructure and Texture Evolution of Thin-Gauge Non-Oriented Silicon Steel with High Permeability Produced by Twin-Roll Strip Casting, *Mater. Charact.*, 2019, vol. 150, pp. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.02.001>
10. Kocks, U.F., Tomé, C.N., and Wenk, H.R., *Texture and Anisotropy: Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Materials Properties*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
11. Gupta, A., Khatirkar, R., and Singh, J., A Review of Microstructure and Texture Evolution During Plastic Deformation and Heat Treatment of β -Ti Alloys, *J. Alloys Compd.*, 2022, vol. 899, p. 163242. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163242>
12. Ghosh, A. and Ghosh, M., Effect of Heat Treatment and Severe Plastic Deformation on Microstructure and Texture Evolution of 7075 Alloy, *Mater. Today: Proc.*, 2020, vol. 33(8), pp. 5239–5242. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.947>
13. Hamada, J.I. and Inoue, H., Texture and Planar Anisotropy of R-Value in Duplex Stainless Steel Sheet, *Mat. Trans.*, 2010, vol. 51(4), pp. 644–651. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MG200908>
14. Grigoriev, A.K., Silnikova, E.F., and Pevzner M.Z., Influence of Rolling Texture of Aluminum Alloys on The Size of Scallops Formed During Drawing, *Non-Ferr. Met.*, 1983, vol. 3, pp. 85–86.
15. Engler, O., Control of Texture and Earing in Aluminium Alloy AA 3105 Sheet for Packaging Applications, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, vol. 538, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.015>
16. Cheng, P. and Yao, Y.L., The Influence of Sheet Metal Anisotropy on Laser Forming Process, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2005, vol. 127, pp. 572–582. <https://doi.org/10.1115/1.1949620>
17. Kuroda, M. and Yoshida, K., Correlation Between Texture and Formability of Aluminum Alloy Sheets: Crystal Plasticity Predictions, *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 2010, vol. 12, pp. 504–509.
18. Banabic, D., *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
19. Трусков, П.В., Швейкин, А.И., *Многоуровневые модели моно-поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения*, Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. <https://doi.org/10.15372/MULTILEVEL2019TPV>
20. Швейкин, А.И., Ашихмин, В.Н., Трусков, П.В., О моделях ротации решетки при деформировании металлов, *Вестник ПНИПУ, Механика*, 2010, т. 1, с. 111–127.
21. Raabe, D., Roters, F., Barlat, F., and Chen, L.Q., *Continuum Scale Simulation of Engineering Materials: Fundamentals-Microstructures-Process Applications*, Weinheim: John Wiley & Sons, 2004.
22. Habraken, A.M., Modelling the Plastic Anisotropy of Metals, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2004, vol. 11, pp. 3 – 96. <https://doi.org/10.1007/BF02736210>
23. Roters, F., Eisenlohr, P., Hantcherli, L., Tjahjanto, D.D., Bieler, T.R., and Raabe, D., Overview of Constitutive Laws, Kinematics, Homogenization and Multiscale Methods in Crystal Plasticity Finite-Element Modeling: Theory, Experiments, Applications, *Acta Mater.*, 2010, vol. 58(4), pp. 1152–1211. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.10.058>
24. Арышенский, Е.В., Коновалов, С.В., Арышенский, В.Ю., Беглов, Э.Д., Разработка метода математического моделирования текстурных составляющих при прокатке, *Цветные металлы*, 2023, т. 6, с. 65–72. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.06.09>
25. Erisov, Y.A., Grechnikov, F.V., and Surudin, S.V., Yield Function of the Orthotropic Material Considering the Crystallographic Texture, *Struct. Eng. Mech.*, 2016, vol. 58(4), pp. 677–687. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2016.58.4.677>
26. Романовский, В. П., *Справочник по холодной штамповке*, М.: Машиностроение, 1979.
27. Сторожев, М.В., Попов, Е.А., *Теория обработки металлов давлением*, М.: Машиностроение, 1977.
28. Yoon, J.W., Dick, R.E., and Barlat, F., A New Analytical Theory for Earing Generated from Anisotropic Plasticity, *Int. J. Plast.*, 2011, vol. 27(8), pp. 1165–1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.01.002>
29. Chung, K., Kim, D., and Park, T., Analytical Derivation of Earing in Circular Cup Drawing Based on Simple Tension Properties, *Eur. J. Mech. A. Solids*, 2010, vol. 30(3), pp. 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.01.006>
30. Юшин, Р.Ю., О возможности учета пластической анизотропии при изгибе круглых пластин, *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*, 2010, т. 1, с. 134–140.
31. Костиков, И.Е., Кузнецов, Е.Е., Матченко, Н.М., Экспериментальное исследование пластической анизотропии листовых прокатных материалов из алюминиевых сплавов, *Вестник Государственного*

университета просвещения. Серия: Физика-Математика, 2017, т. 2., с. 64–71. <https://doi.org/10.18384/2310-7251-2017-2-64-71>

32. Ямщиков, Н.В., Прасолов, П.Ф., Авторское свидетельство № 1495676, *БИ*, 1989, № 27.
33. Арышенский, Ю.М., *Теория листовой штамповки анизотропных материалов*, Саратов: Издательство Саратовского университета, 1973.
34. Адамеску, Р.А., Гельд, П.В., Митюшов, Е.А., *Анизотропия физических свойств металлов*, М: Металлургия, 1985.
35. S.G. Lekhnitsky, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Moscow: Nauka, 1977.
36. Chung, K., Lee, S.Y., Barlat, F., Keum, Y.T., and Park, J.M., Finite Element Simulation of Sheet Forming Based on a Planar Anisotropic Strain-Rate Potential, *Int. J. Plast.*, 1996, vol. 12, no. 1, pp. 93–115. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(95)00046-1)
37. Barlat, F., Panchanadeeswaran, S., and Richmond, O., Earing in Cup Drawing Face-Centered Cubic Single Crystals and Polycrystals, *Metall. Trans. A.*, 1991, vol. 22, pp. 1525–1534. <https://doi.org/10.1007/BF02667366>
38. Yoon, J.W., Dick, R.E., and Barlat, F.A., New Analytical Theory for Earing Generated from Anisotropic Plasticity, *Int. J. Plast.*, 2011, vol. 27(8), pp. 1165–1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.01.002>
39. Арышенский В.Ю., Разработка механизма формирования заданной анизотропии свойств в процессе прокатки алюминиевых лент для глубокой вытяжки с утонением, *Дис. ... докт. техн. наук*, Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева, 2002, 312 с.
40. Yashin, V.V., Aryshenskii, E.V., Konovalov, S.V., Aryshenskii, V.Yu., and Latushkin, I.A., A Study of Texture Component Distribution Over the Cross Section of An Aluminum Alloy 8011 Billet with Hot Rolling in A Four-Stand Continuous Group, *Met. Sci. Heat Treat.*, 2019, vol. 61, pp. 300–304. <https://doi.org/10.1007/s11041-019-00420-3>
41. Hirsch, J., Texture Evolution and Earing in Aluminium Can Sheet, *Mater. Sci. Forum. Trans. Tech. Publications Ltd*, 2005, vol. 495, pp. 1565–1572. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.495-497.1565>
42. Engler, O., Löchte, L., and Hirsch, J., Through-Process Simulation of Texture and Properties During the Thermomechanical Processing of Aluminium Sheets, *Acta Mater.*, 2007, vol. 55(16), pp. 5449–5463. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.06.010>
43. Engler, O. and Vatne, H.E., Modeling the Recrystallization Textures of Aluminum Alloys After Hot Deformation, *JOM*, 1998, vol. 50, pp. 23–27. <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0123-y>
44. Hjelen, J., Ørsund, R., and Nes, E., On the Origin of Recrystallization Textures in Aluminium, *Acta Metall. Mater.*, 1991, vol. 39(7), pp. 1377–1404. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90225-P](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90225-P)
45. Zhao, Q., Liu, Zh., Hu, Ya., Li, Sh. and Bai, S., Evolution of Goss Texture in An Al–Cu–Mg Alloy During Cold Rolling, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 2020, vol. 20, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00023-3>
46. Bunge, H.J., *Texture Analysis in Materials Science*, Mathematical Methods, Elsevier, 1969.
47. Numerical data and functional relationships in science and technology. Vol. 3. 2009.
48. Choi, S.H., Cho, J.H., Barlat, F., Chung, K., Kwon, J. W., and Oh, K. H., Mechanical Behavior-Prediction of Yield Surfaces of Textured Sheet Metals, *Metall. Mater. Trans. A.*, 1999, vol. 30(2), pp. 377–386. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0327-y>
49. Erisov, Y., Grechnikov, F., Surudin, S., and Razhivin, V., A Simplified Yield Criterion of the Orthotropic Material Considering the Crystallographic Texture, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci.*, 2020, vol. 986(1), p. 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/986/1/012031>
50. Richards, T.L., and Pugh, S.F., Structural Changes in 99.990% Pure Aluminium During Rolling and Annealing, *J. Inst. Met.*, 1960, vol. 88, pp. 399–405.
51. Lücke, K., Rolling and Recrystallization Texture of Aluminum. Texture of Cold-Rolled Aluminum, *Z. Metallkd.*, 1954, vol. 45, pp. 86–92.

C. 101–119

8. Научная статья

Сведения об авторах

Рагазин Александр Алексеевич, аспирант, Кафедра технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский университет, aleksander.ragazin@samara-metallurg.ru

Арышенский Евгений Владимирович, д. т. н., доцент, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК СибГИУ, arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Арышенский Владимир Юрьевич, д. т. н., доцент, профессор, Кафедра обработки металлов давлением, Самарский университет, arishenskiy.vyu@ssau.ru

Распосиенко Дмитрий Юрьевич, кд. т. н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией цветных сплавов, ИФМ УрО РАН, rasposienko@imp.uran.ru

Лукьянчук Антон Алексеевич, научный сотрудник, лаб №321, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Anton.Lukyanchuk@itep.ru

Коновалов Сергей Валерьевич, д. т. н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности СибГИУ, konovalov@sibsiu.ru

УДК 539.4; 539.5; 669; 620.172.2; 620.186; 617.3; 57.032

DOI 10.55652/1683-805X_2025_28_2_120-133

Поступила в редакцию 07.08.2024 г., после доработки 14.08.2024 г., принята к публикации 10.10.2024 г.

Исследование влияния гафния на формирование микроструктуры при высокотемпературной термической обработке алюминиевых высокомагниевого сплава со скандиево-циркониевым микролегированием

А.А. Рагазин¹, Е.В. Арышенский², В.Ю. Арышенский¹,
Д.Ю. Распосиенко³, А.А. Лукьянчук⁴, С.В. Коновалов²

¹ Самарский университет, Самара, 443086 Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007 Россия

³ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург, 620108 Россия

⁴ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182 Россия

В работе исследовано влияние добавок гафния на формирование микроструктуры и механические свойства при высокотемпературном отжиге в алюминиевых высокомагниевого сплава со скандиево-циркониевым микролегированием. Для изучения были отлиты два близких по химическому составу алюминиевых сплава с добавками и без добавок гафния. Сплавы были подвергнуты термической обработке при 440 °С с выдержкой 48 ч. Литой и термически обработанный материал изучены с помощью механических испытаний, а также посредством оптической сканирующей и просвечивающей микроскопии. Исследован структурно-фазовый состав данных сплавов и проанализировано влияние гафния на механические характеристики. Для более детального изучения внутренней структуры наночастиц Al_3Sc была проведена атомно-зондовая томография. Исследования показали, что в обоих сплавах отсутствует прерывистый распад пересыщенного твердого раствора. Кроме того, было обнаружено, что добавление гафния приводит к уменьшению размера наночастиц Al_3Sc . Показано, что гафний действует схожим с цирконием образом, формируя вокруг частиц Al_3Sc термостабилизирующую оболочку, что предотвращает рост частиц и делает их распределение более мелкодисперсным.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, скандий, гафний, термообработка, атомно-зондовая томография, просвечивающая микроскопия.

Effect of Hafnium on the Microstructure Formation during High-Temperature Treatment of High-Magnesium Aluminum Alloys Microalloyed with Scandium and Zirconium

A.A. Ragazin¹, E.V. Aryshenskii², V.Yu. Aryshenskii¹, D.Yu. Rasposienko³,
A.A. Lukyanchuk⁴, and S.V. Kononov²

¹ Samara University, Samara, 443086, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007, Russia

³ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia

⁴ Kurchatov Institute National Research Center, Moscow, 123182 Russia

The paper studies the effect of hafnium additives on the microstructure and mechanical properties during high-temperature annealing of high-magnesium aluminum alloys microalloyed with scandium and zirconium. The objects of investigation are two cast aluminum alloys alloyed and unalloyed with hafnium. The alloys are heat treated at 440 °C for 48 h. The cast and heat-treated material is studied in mechanical tests, as well as under optical scanning and transmission microscopes. The structural-phase composition of these alloys is detected, and the effect of hafnium on the mechanical properties is analyzed. Atomic probe tomography is used for a more detailed examination of the internal structure of Al_3Sc nanoparticles. It is shown that both alloys lack discontinuous precipitation of the supersaturated solid solution. The addition of hafnium decreases the size of Al_3Sc nanoparticles. Like zirconium, hafnium forms a thermostabilizing shell around Al_3Sc particles, thus preventing the growth of particles and contributing to their fine dispersion.

Keywords: aluminum alloys, scandium, hafnium, heat treatment, atomic probe tomography, transmission microscopy

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>

Литература

1. Ryen, Ø., Holmedal, B., Nijs, O., Nes, E., Sjölander, E., and Ekström, H.E., Strengthening Mechanisms in Solid Solution Aluminum Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, 2006, vol. 37, pp. 1999–2006. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0142-7>
2. Lathabai, S. and Lloyd, P., The Effect of Scandium on the Microstructure, Mechanical Properties and Weldability of a Cast Al–Mg Alloy, *Acta Mater.*, 2002, vol. 50, pp. 4275–4292. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00259-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00259-8)
3. Kissell, R.J. and Ferry, R.L., *Aluminium Structures. A Guide to Their Specifications and Design*, Hoboken: John Wiley & Sons Limited, 2002.
4. Lloyd, D.J., The Deformation of Commercial Aluminum-Magnesium Alloys, *Metall. Trans. A*, 1980, vol. 11, pp. 1287–1294. <https://doi.org/10.1007/BF02653482>
5. Pan, Y., Yue, X., Di, Z., Jishan, Z., Guxin, Z., and Yujing, L., Mechanical Properties, Corrosion Behavior and Microstructure Evolution of Zinc and Scandium Co-Strengthened 5xxx Alloy, *J. Rare Earth.*, 2022, vol. 41, pp. 1819–1826. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.09.005>
6. Jia, Q., Zhang, F., Rometsch, P., Li, J., Mata, J., Weyland, M., and Wu, X., Precipitation Kinetics, Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of a Developed Al–Mn–Sc Alloy Fabricated by Selective Laser Melting, *Acta Mater.*, 2020, vol. 193, pp. 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.015>
7. Dorin, T., Babaniaris, S., Jiang, L., Cassel, A., Race, C. P., Eggeman, A., and Robson, J. D. Stability and Stoichiometry of L12 Al₃(Sc, Zr) Dispersoids in Al-(Si)-Sc-Zr Alloys, *Acta Mater.*, 2021, vol. 216, p. 117117. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117117>
8. Dorin, T., Ramajayam, M., Vahid, A., and Langan, T. Aluminium Scandium Alloys, Fundamentals of Aluminium Metallurgy, in *Fundamentals of Aluminum Metallurgy*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2018, pp. 439–494. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00012-6>
9. Zakharov, V.V., Effect of Scandium on the Structure and Properties of Aluminum Alloys, *Met. Sci. Heat Treat.*, 2003, vol. 45, no. 7, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1023/A:1027368032062>
10. Röyset, J. and Ryum, N., Scandium in Aluminium Alloys, *Int. Mater. Rev.*, 2005, vol. 50, pp. 19–44. <https://doi.org/10.1179/174328005X14311>
11. Yashin, V., Beglov, E., Aryshensky, E., and Latushkin, I., Large Size Metal-Clad Ingots Rolling Process Analysis Using Finite Elements Method, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2018, vol. 11(4), pp. 419–426. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0064>
12. Taendl, J., Palm, F., Anders, K., Gradinger, R., and Poletti, C., Investigation of the Precipitation Kinetics of a New Al-Mg-Sc-Zr Alloy, *Mater. Sci. Forum*, 2014, vol. 794, pp. 1038–1043. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.1038>
13. Davydov, V.G. Elagin, V.I., Zakharov, V.V., and Rostoval, D., Alloying Aluminum Alloys with Scandium and Zirconium Additives, *Met. Sci. Heat Treat.*, 1996, vol. 38(8), pp. 347–352. <https://doi.org/10.1007/BF01395323>
14. Hallem, H., Forbord, B., and Marthinsen, K., Investigation of Al-Fe-Si Alloys with Additions of Hf, Sc and Zr, *Mater. Forum*, 2004, vol. 28, pp. 825–831.
15. Hallem, H., Lefebvre, W., Forbord, B., Danoix, F., and Marthinsen, K., The Formation of Al₃(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})-Dispersoids in Aluminium Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, vol. 421, pp. 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.11.063>
16. Rogozhkin, S.V., Aleev, A.A., Lukyanchuk, A.A., Shutov, A.S., Raznitsyn, O.A., and Kirillov, S.E., An Atom Probe Tomography Prototype with Laser Evaporation, *Instrum. Exp. Tech.*, 2017, vol. 60, pp. 428–433. <https://doi.org/10.1134/S002044121702021X>
17. RF Software Certificate No. 2018661876 <http://www1.fips.ru/>
18. Bas, P., Bostel, A., Deconihout, B., and Blavette, D., A General Protocol for the Reconstruction of 3D Atom Probe Data, *Appl. Surf. Sci.*, 1995, vol. 87, pp. 298–304. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(94\)00561-3](https://doi.org/10.1016/0169-4332(94)00561-3)
19. Shutov, A.S., Lukyanchuk, A.A., Rogozhkin, S.V., Raznitsyn, O.A., Nikitin, A.A., Aleev, A.A., and Kirillov, S.E., Optimization of Mass Reconstruction Algorithm for Atom Probe Tomography Analysis, *Phys. At. Nucl.*, 2019, vol. 82, pp. 1292–1301. <https://doi.org/10.1134/S1063778819090096>

20. Rokhlin, L.L., Bocharov, N.R., Boselli, J., and Dobatkina, T.V., Investigation of the Phase Relations in the Al-rich Alloys of the Al–Sc–Hf System in Solid State, *J. Phase Equilib. Diff.*, 2010, vol. 31, pp. 327–332. <https://doi.org/10.1007/s11669-010-9710-z>
21. Zakharov, V. V., Effect of Scandium on the Structure and Properties of Aluminum Alloys, *Met. Sci. Heat Treat.*, 2003, vol. 45(7-8), pp. 246–253. <https://doi.org/10.1023/A:1027368032062>
22. Benarieb, I., Dynin, N. V., Zaitsev, D. V., and Sbitneva, S. V., The Structure and Properties of Wrought Al–Mg–Sc Aluminum Alloys with Different Scandium Content, *Phys. Met. Metallogr.*, 2023, vol. 124(1), pp. 65–73. <https://doi.org/10.1134/S0031918X22601639>
23. Hirsch, P., Howie, A., Nicholson, R.B., Pashley, and D.W. Whelan, M.J., *Electron Microsc. Thin Crystals*, London: Butterworths, 1965.
24. Williams, D.B., Carter, B.C., in *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science in Microscopy and Microanalysis*, vol. 16, is. 1, p. 111, New York: Springer, 2009. <https://doi.org/10.1017/S1431927609991140>
25. Radetic, T., Popovic, M., and Romhanji, E., Microstructure Evolution of a Modified AA5083 Aluminum Alloy During a Multistage Homogenization Treatment, *Mater. Charact.*, 2012, vol. 65, pp. 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.12.006>
26. Aryshenskii, E., Lapshov, M., Hirsch, J., Konovalov, S., Bazhenov, V., Drits, A., and Zaitsev, D., Influence of the Small Sc and Zr Additions on the As-Cast Microstructure of Al–Mg–Si Alloys with Excess Silicon, *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1797. <https://doi.org/10.3390/met11111797>
27. Zakharov, V.V., Kinetics of Decomposition of the Solid Solution of Scandium in Aluminum in Binary Al–Sc alloys, *Met. Sci. Heat Treat.*, 2015, vol. 57, pp. 410–414. <https://doi.org/10.1007/s11041-015-9897-z>
28. Riddle, Y.W. and Sanders, T.H.J., Recrystallization Performance of AA7050 Varied with Sc and Zr, *Mat. Sci. Forum*, 2000, vol. 331, pp. 799–804. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.799>
29. Jones M.J. and Humphreys F.J., Interaction of Recrystallization and Precipitation: The Effect of Al₃Sc on the Recrystallization Behaviour of Deformed Aluminium, *Acta Mater.*, 2003, vol. 51(8), pp. 2149–2159. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00002-8)
30. Marquis, E. A. and Seidman, D. N., Nanoscale Structural Evolution of Al₃Sc Precipitates in Al(Sc) Alloys, *Acta Mater.*, 2001, vol. 49(11), pp. 1909–1919. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00116-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00116-1)
31. Iwamura, S., Nakayama, M., and Miura, Y., Coherency between Al₃Sc Precipitate and the Matrix in Al Alloys Containing Sc, *Mater. Sci. Forum.*, 2002, vol. 396, pp. 1151–1156. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.396-402.1151>
32. Iwamura, S. and Miura, Y., Loss in Coherency and Coarsening Behavior of Al₃Sc Precipitates, *Acta Mater.*, 2004, vol. 52(3), pp. 591–600. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.09.042>
33. Marquis, E.A., Seidman, D.N., and Dunand, D.C., Effect of Mg Addition on the Creep and Yield Behavior of an Al–Sc Alloy, *Acta Mater.*, 2003, vol. 51(16), pp. 4751–4760. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00288-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00288-X)
34. Engler, O. and Lücke, K., Mechanisms of Recrystallization Texture Formation in Aluminium Alloys, *Scr. Metal. Mater.*, 1992, vol. 27, pp. 1527–1532. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90139-6)
35. Hansen, N., Hall–Petch Relation and Boundary Strengthening, *Scr. Mater.*, 2004, vol. 51(8), pp. 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
36. Дриц, А.М., Швечков, Е.И., Соседков, С.М., Телешов, В.В., Лебедев, Г.Д., Арышенский, В.Ю., Гречникова, А.Ф., Характеристики трещиностойкости и сопротивления усталости листов из сплава В95пчАТ2 с разной величиной зерна, *Технология легких сплавов*, 2011, № 3, с. 31–41.
37. Арышенский, В.Ю., Гречникова, А.Ф., Дриц, А.М., Соседков, С.М., Выбор технологических параметров для снижения размера зерна в основе и плакировке обшивочных листов из алюминиевых сплавов, *Технология легких сплавов*, 2010, № 3, с. 22–30.
38. Yang, C., Shao, D., Zhang, P., Kuang, J., Wu, K., Liu, G., and Sun, J., The Influence of Sc Solute Partitioning on Ductile Fracture of Sc-Microalloyed Al–Cu Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 717, pp. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.078>

C. 120–133

9. Научная статья

Сведения об авторах

Mandeep Kaur, Thapar Institute of Engineering and Technology, India, mkaur2_phd23@thapar.edu
 Satish Kumar, Dr., Thapar Institute of Engineering and Technology, India, satishk.sharma@thapar.edu
 Vikas Sharma, Dr., Lovely Professional University, India, vikassharma10a@yahoo.co.in

Исследование динамики горизонтально поляризованных поперечных волн в сэндвич-структурах в рамках согласованной моментной теории упругости с учетом размерного параметра

M. Kaur¹, S. Kumar¹, V. Sharma²

¹ Инженерно-технический институт Тапара, Патиала, Пенджаб, 147004 Индия

² Профессиональный университет Лавли, Пхагвара, Пенджаб, 144411 Индия

Сэндвич-структуры с тонкими, жесткими и тяжелыми облицовочными пластинами используют в гражданском и аэрокосмическом машиностроении, в то время как конструкции с толстыми, мягкими и легкими облицовочными пластинами предпочтительны в качестве осадительных пластин. Изучение поведения горизонтально поляризованных поперечных волн в сэндвич-структурах может способствовать разработке более упругих и эффективных композитных материалов с улучшенными характеристиками в условиях динамической нагрузки. Проведен анализ динамического поведения симметричных сэндвич-структур с использованием согласованной моментной модели упругости. Получены решения уравнения распространения гармонических волн в образцах со свободными и фиксированными границами при условии непрерывности напряжений и смещений на интерфейсах между сердцевинной и облицовочными пластинами. Анализ проведен в рамках согласованной размернозависимой моментной теории упругости, которая учитывает параметр длины (характерную длину), имеющий тот же порядок, что и внутренняя микроструктура материала. Выведены дисперсионные соотношения распространения горизонтально поляризованных поперечных волн при свободных и фиксированных граничных условиях. Математические результаты представлены в графическом виде для наглядного представления влияния характерной длины и толщины сердцевинной и облицовочных пластин на фазовую скорость при симметричных и кососимметричных условиях.

Ключевые слова: горизонтально поляризованные поперечные волны, сэндвич-структура, моментная теория, характерная длина, свободная граница, жестко закрепленная граница

Dynamics of horizontal shear waves propagating in size-dependent sandwich plates using consistent couple stress theory

M. Kaur¹, S. Kumar^{1*}, and V. Sharma²

¹ Department of Mathematics, Thapar Institute of Engineering and Technology, Patiala, Punjab, 147004 India

² Department of Mathematics, Lovely Professional University, Phagwara, Punjab, 144411 India

Sandwich structures with thin, stiff and heavy facings compared to the core are employed in civil and aerospace engineering, while those with thick, soft and lighter facings are preferred in precipitator plate applications. Insights gained into the behavior of horizontally polarized shear (SH) waves in sandwich structures can guide the design of more resilient and efficient composites, enhancing their performance under dynamic loading conditions. The dynamic behavior of a sandwich structure with symmetric facings is rigorously analyzed within the framework of the consistent couple stress model of elasticity. Harmonic wave solutions are derived, provided that they satisfy either traction-free or fixed boundary conditions on the faces, while maintaining continuity of tractions and displacements at the interfaces between the core and facings. This analysis uses the size-dependent consistent couple stress elasticity, which incorporates a length parameter (characteristic length) assumed to be of the same order as the internal microstructures of the material. Dispersion relations for the propagation of SH waves are calculated under both stress-free and fixed boundary conditions. Detailed mathematical results are provided, accompanied by graphical illustrations that show the impacts of characteristic length parameters and thicknesses of the core and facings on the phase velocity under both symmetrical and skew-symmetrical conditions.

Keywords: horizontal shear waves, sandwich plates, couple stress theory, characteristic length, stress-free boundary conditions, rigidly fixed boundary conditions

References

1. Wang, Z., Jen, C.K., and Cheeke, J.D.N., Mass Sensitivities of Shear Horizontal Waves in Three-Layer Plate Sensors, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1994, vol. 41(3), pp. 397–401. <https://doi.org/10.1109/58.285475>

2. Jensen, A.E. and Irgens, F., Thickness Vibrations of Sandwich Plates and Beams and Delamination Detection, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 1999, vol. 10(1), pp. 46–55. <https://doi.org/10.1177/1045389X9901000106>
3. Castainings, M. and Hosten, B., Guided Waves Propagating in Sandwich Structures Made of Anisotropic, Viscoelastic, Composite Materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, vol. 113(5), pp. 2622–2634. <https://doi.org/10.1121/1.1562913>
4. Kaplunov, J., Prikazchikov, D.A., and Prikazchikova, L.A., Dispersion of Elastic Waves in Laminated Glass, *Procedia Eng.*, 2017, vol. 199, pp. 1489–1494. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.428>
5. Chen, H., Li, X.P., Chen, Y.Y., and Huang, G.L., Wave Propagation and Absorption of Sandwich Beams Containing Interior Dissipative Multi-Resonators, *Ultrasonics*, 2017, vol. 76, pp. 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.12.014>
6. Prikazchikova, L., Aydın, Y.E., Erbaş, B., and Kaplunov, J., Asymptotic Analysis of an Anti-Plane Dynamic Problem for a Three-Layered Strongly Inhomogeneous Laminate, *Math. Mech. Solids*, 2020, vol. 25(1), pp. 3–16. <https://doi.org/10.1177/1081286518790804>
7. Zupančič, B., Prokop, Y., and Nikonov, A., FEM Analysis of Dispersive Elastic Waves in Three-Layered Composite Plates with High Contrast Properties, *Finite Elem. Anal. Des.*, 2021, vol. 93, p. 103553. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103553>
8. Linh, N.T.K., Vinh, P.C., Thang, L.T., and Giang, P.T.H., Lamb Waves in Sandwich Orthotropic Elastic Plates, *Waves Random Complex Media*, 2024, vol. 34(3), pp. 1502–1520. <https://doi.org/10.1080/17455030.2021.1940352>
9. Lee, P.C.Y. and Chang, N., Harmonic Waves in Elastic Sandwich Plates, *J. Elasticity*, 1979, vol. 9, pp. 51–69. <https://doi.org/10.1007/BF00040980>
10. Sayir, M. and Koller, M.G., Dynamic Behaviour of Sandwich Plates, *Z. Angew. Math. Phys.*, 1986, vol. 37, pp. 78–103. <https://doi.org/10.1007/BF00955520>
11. Liu, L. and Bhattacharya, K., Wave Propagation in a Sandwich Structure, *Int. J. Solids Struct.*, 2009, vol. 46(17), pp. 3290–3300. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.04.023>
12. Chimenti, D.E., Guided Waves in Plates and their Use in Materials Characterization, *Appl. Mech. Rev.*, 1997, vol. 50(5), pp. 247–284. <https://doi.org/10.1115/1.3101707>
13. Josse, F., Bender, F., and Cernosek, R.W., Guided Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Sensors for Chemical and Biochemical Detection in Liquids, *Anal. Chem.*, 2001, vol. 73(24), pp. 5937–5944. <https://doi.org/10.1021/ac010859e>
14. Li, W. and Cho, Y., Quantification and Imaging of Corrosion Wall Thinning Using Shear Horizontal Guided Waves Generated by Magnetostrictive Sensors, *Sens. Actuators A: Phys.*, 2015, vol. 232, pp. 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.06.008>
15. Miao, H. and Li, F., Shear Horizontal Wave Transducers for Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing: A Review, *Ultrasonics*, 2021, vol. 114, p. 106355. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106355>
16. Vardoulakis, I. and Georgiadis, H.G., HS Surface Waves in a Homogeneous Gradient-Elastic Half-Space with Surface Energy, *J. Elasticity*, 1997, vol. 47, pp. 147–165. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00065-7)
17. Nakamura, K., Shear-Horizontal Piezoelectric Surface Acoustic Waves, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 46(7S), pp. 4421–4427. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.4421>
18. Yang, P.S., Liu, S.W., and Sung, J.C., Transient Response of HS Waves in a Layered Half-Space with Sub-Surface and Interface Cracks, *Appl. Math. Model.*, 2008, vol. 32(4), pp. 595–609. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.01.006>
19. Goyal, R., Kumar, S., and Sharma, V., Microstructural Considerations on SH-Wave Propagation in a Piezoelectric Layered Structure, *J. Theor. Appl. Mech.*, 2018, vol. 56(4), pp. 993–1004. <https://doi.org/10.15632/jtampl.56.4.993>
20. Dua, N. and Sharma, V., Characteristics of Shear Horizontal Waves in a Microstructural Layer Imperfectly Bounded between an Initially Stressed Half-Space and an Inhomogeneous Half-Space, *Mech. Solids*, 2023, vol. 58, pp. 2162–2177. <https://doi.org/10.3103/S0025654423601374>
21. Jiangong, Y., Viscoelastic Shear Horizontal Wave in Graded and Layered Plates, *Int. J. Solid. Struct.*, 2011, vol. 48(16–17), pp. 2361–2372. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.04.011>
22. Gitis, A. and Sauer, D.U., The Propagation of Horizontally Polarized Shear Waves in Plates Bordered with Viscous Liquid, *Ultrasonics*, 2016, vol. 71, pp. 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.06.018>
23. Zagrouba, M. and Bouhdima, M.S., Investigation of HS Wave Propagation in Piezoelectric Plates, *Acta Mech.*, 2021, vol. 232, pp. 3363–3379. <https://doi.org/10.1007/s00707-021-02990-x>
24. Sharma, V. and Kumar, S., A Comprehensive Analysis of Horizontally Polarized Shear Waves in a Thin Microstructural Plate, *Struct. Eng. Mech.*, 2023, vol. 85(4), pp. 501–510. <https://doi.org/10.12989/sem.2023.85.4.501>
25. Kumar, S. and Sharma, V., Influence of Diverse Boundary Conditions on HS and P-SV Wave Dynamics in Micropolar Plates, *Thin-Walled Struct.*, 2024, vol. 198, p. 111708. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111708>
26. Simonetti, F. and Cawley, P., On the Nature of Shear Horizontal Wave Propagation in Elastic Plates Coated with Viscoelastic Materials, *Proc. R. Soc. A*, 2004, vol. 460(2048), pp. 2197–2221. <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1284>

27. Alshits, V.I., Deschamps, M., and Lyubimov, V.N., Dispersion Anomalies of Shear Horizontal Guided Waves in Two- and Three-Layered Plates, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, vol. 118(5), pp. 2850–2859. <https://doi.org/10.1121/1.2046807>
28. Kuznetsov, S.V., SH-Waves in Laminated Plates, *Quart. Appl. Math.*, 2006, vol. 64(1), pp. 153–165. <https://doi.org/10.1090/S0033-569X-06-00992-1>
29. Son, M.S. and Kang, Y.J., The Effect of Initial Stress on the Propagation Behavior of HS Waves in Piezoelectric Coupled Plates, *Ultrasonics*, 2011, vol. 51(4), pp. 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.11.016>
30. Djeran-Maigre, I. and Kuznetsov, S.V., Velocities, Dispersion, and Energy of SH-Waves in Anisotropic Laminated plates, *Acoust. Phys.*, 2014, vol. 60, pp. 200–207. <https://doi.org/10.1134/S106377101402002X>
31. Pang, Y., Feng, W., Liu, J., and Zhang, C., HS Wave Propagation in a Piezoelectric/Piezo Magnetic Plate with an Imperfect Magnetoelastoelectroelastic Interface, *Waves Random Complex Media*, 2019, vol. 29(3), pp. 580–594. <https://doi.org/10.1080/17455030.2018.1539277>
32. 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>
33. Hadjesfandiari, A.R. and Dargush, G.F., Couple Stress Theory for Solids, *Int. J. Solids Struct.*, 2011, vol. 48(11), pp. 2496–2510. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.05.002>
34. Wang, C., Chen, X., Wei, P., and Li, Y., Reflection of Elastic Waves at the Elastically Supported Boundary of a Couple Stress Elastic Half-Space, *Acta Mech. Solida Sin.*, 2017, vol. 30(2), pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.camss.2017.03.004>
35. Vavva, M.G., Protopappas, V.C., Gergidis, L.N., Charalambopoulos, A., Fotiadis, D.I., and Polyzos, D., Velocity Dispersion of Guided Waves Propagating in a Free Gradient Elastic Plate: Application to Cortical Bone, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, vol. 125(5), pp. 3414–3427. <https://doi.org/10.1121/1.3110203>
36. Lee, P.C.Y. and Yu, J.D., Governing Equations for a Piezoelectric Plate with Graded Properties Across the Thickness, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1998, vol. 45(1), pp. 236–250. <https://doi.org/10.1109/58.646928>