

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.52

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.009

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

Рамиль Тухфатович Мурзаев^{1†}, Марьям Азаматовна Идрисова², Айрат Ахметович Назаров³

^{1,2,3}Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

¹murzaevrt@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-2691-7031>

²mariam22122000@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1488-4842>

³aanazarov@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7241-9386>

Аннотация. С использованием метода молекулярной динамики (МД) проведено исследование соединения двух нанокристаллических блоков меди путем знакопеременных взаимных смещений под действием приложенного давления, моделирующих процесс ультразвуковой сварки металлов (УЗС). Расчетная ячейка для моделирования состояла из двух блоков меди с колончатými зернами размером 6.26 нм, имеющими общую ось колонны [112] и сечение в форме правильного шестиугольника. Поверхности блоков содержали неровности, описываемые синусоидой с амплитудой 10 Å. Система вначале релаксировалась под заданным давлением от 0.25 до 2 ГПа для достижения равновесия при температуре 300 К, затем блокам сообщались синусоидальные смещения с амплитудой 5 нм в противоположных направлениях. Моделирование показало, что соединение формируется путем расширения области контакта блоков при взаимных сдвигах последних, а первоначальная полость трансформируется в пору, размер которой уменьшается с повышением давления. При некотором критическом давлении происходит полное залечивание поры и образование сплошного соединения. Нанокристалл, образовавшийся в результате соединения, имеет повышенный атомный объем, что связано с релаксацией поры под действием сдвиговых деформаций и напряжения растяжения. Знакопеременная деформация сдвига, происходящая при моделируемой УЗС, приводит к росту зерен, в том числе путем объединения зерен, первоначально принадлежавших двум разным блокам. Это является важным фактором, приводящим к формированию бездефектного соединения при УЗС.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, молекулярная динамика, твердофазное соединение, нанокристалл.

Благодарности: Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-19-00617).

Для цитирования: Мурзаев Р.Т., Идрисова М.А., Назаров А.А. Моделирование ультразвуковой сварки нанокристаллической меди // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 92-99. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.009.

Original article

SIMULATION OF ULTRASONIC WELDING OF NANOCRYSTALLINE COPPER

Ramil T. Murzaev[†], Maryam A. Idrisova², Ayrat A. Nazarov³

^{1,2,3}Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, 39 Stepan Khalturin str., 450001 Ufa, Russia

¹murzaevrt@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-2691-7031>

²illumnus102@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9341-4178>

³aanazarov@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7241-9386>

Abstract. Using the molecular dynamics (MD) method, we simulated the joining of two nanocrystalline copper blocks by alternating mutual displacements under the action of applied pressure, simulating the process of ultrasonic

welding (USW) of metals. The computational cell for the simulation consisted of two copper blocks with columnar grains 6.26 nm in size, having a common column axis [112] and a cross-section in the form of a regular hexagon. The surfaces of the blocks contained irregularities described by a sinusoid with an amplitude of 10 Å. The system was initially relaxed under a given pressure from 0.25 to 2 GPa until equilibrium was reached at a temperature of 300 K, then sinusoidal displacements with an amplitude of 5 nm in opposite directions were imparted to the blocks. The simulation showed that the joint was formed by expanding the contact area of the blocks during mutual shifts of the latter, and the initial cavity is transformed into a pore, the size of which decreases with increasing pressure. At a certain critical pressure, the pore is completely healed and a continuous joint is formed. The nanocrystal formed as a result of joining has an increased atomic volume, which is associated with the relaxation of the pore under the action of shear deformations and tensile stress. The alternating shear deformation occurring during the simulated USW leads to grain growth, including the coalescence of grains that originally belonged to two different blocks. This is an important factor leading to the formation of a defect-free joint during USW.

Keywords: ultrasonic welding, molecular dynamics, solid state joint, nanocrystal.

For citation: Murzaev, R.T., Idrisova, M.A., Nazarov, A.A. (2025). Simulation of ultrasonic welding of nanocrystalline copper. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 92–99. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.009.

Введение

В последние годы значительно возрос интерес материаловедов к ультразвуковой сварке (УЗС), которая является одним из перспективных методов твердофазного соединения металлов [1-3]. Этот интерес, прежде всего, связан с возрастанием возможностей метода. В частности, изобретение ультразвуковой аддитивной технологии расширило область применения УЗС в сторону получения объемных материалов и конструкций [4]. В исследовании механизмов формирования соединений при УЗС, влияния различных параметров сварки (давления, амплитуды и т.п.) на структуру и прочность соединений, наряду с экспериментальными исследованиями, играет большую роль моделирование. В частности, молекулярно-динамическое (МД) моделирование способно предоставить сведения о процессах, происходящих при УЗС на атомном уровне.

В настоящее время работ, посвященных МД моделированию УЗС, сравнительно мало. В первых работах главным образом исследовалось взаимодействие двух одинаково ориентированных блоков кристаллов, приведенных в соприкосновение, при взаимных синусоидальных перемещениях параллельно плоскости соприкосновения [5-9]. При этом поверхности кристаллов считались либо атомно-плоскими [6], либо на них задавались полуцилиндрические или синусоидальные выступы, моделирующие шероховатость [5,7-9]. Взаимное проскальзывание блоков моделировалось в условиях их фиксированного положения вдоль норма-

ли к плоскости соприкосновения или их сближения с небольшой скоростью. В ряде работ анализировалась диффузия в области соединения при моделируемой УЗС однородных или разнородных металлов [6,9]. В работе [6] исследовалось также распределение температуры при моделируемой сварке блоков алюминия. Ма и др. [7,8] подробно исследовали процессы образования и разрушения соединения при проскальзывании блоков Al и Cu с выступами.

В работе [10] впервые было осуществлено моделирование УЗС меди в условиях постоянного давления в нормальном направлении, наиболее реалистично отражающих условия процесса УЗС. При этом также впервые была рассмотрена система, в которой решетки блоков разориентированы друг по отношению к другу, и было показано, что наличие разориентировки существенно ускоряет образование соединения и удаление пор. В предыдущей работе авторов [11] было проведено моделирование эволюции атомной структуры при УЗС системы с разориентацией решеток блоков в зависимости от амплитуды колебаний.

Обычно свариваемые материалы представляют собой поликристаллы, и представляет наибольший интерес моделирование УЗС таких материалов. Настоящая работа посвящена исследованию эволюции атомной структуры, пористости и температуры при ультразвуковой сварке нанокристаллической меди методом МД.

Методика моделирования

Для исследования была создана компьютерная модель, включающая два блока нанокристаллической меди размерами $187.83 \times 445.8 \times 13.28 \text{ \AA}^3$ с нанокристаллической структурой и неровностями, которые имитируют шероховатости (Рис. 1). Нанокристаллические блоки состояли из колончатых зерен, поперечное сечение которых представляло собой правильный шестиугольник, большая диагональ которого, принятая за размер зерен, составляла величину 6.26 нм. Зерна имели общую кристаллографическую ориентацию [112] в направлении оси колонн и были развернуты на случайные углы вокруг этой оси по отношению к заданной исходной ориентации. Соответственно, границы между зернами представляли собой границы наклона [112] со случайным углом разориентировки. Профиль поверхности описывался синусоидой с амплитудой 10 \AA , то есть разность уровней пиков и впадин составляла 20 \AA . Атомная система была разделена на три разные области: внешние слои с жестко зафиксированными атомами, находящиеся под ними слои-термостаты с температурой, поддерживаемой на уровне 300 К, и внутренние слои с атомами, движущимися свободно в соответствии с законами Ньютона («ньютоновские» атомы). Толщина фиксированных и термостатных слоев в верхнем и нижнем блоках составляла 10.22 \AA . Построенная таким образом расчетная ячейка содержала 87554 атома.

Моделирование процесса ультразвуковой сварки включало три этапа. На первом этапе осуществлялась релаксация системы при абсолютном нуле температуры и заданном внешнем давлении вдоль оси y . При этом атомы внешнего слоя верхнего блока были жестко закреплены, а к атомам внешнего слоя нижнего блока прикладывались внешние силы в направлении оси y , которые обеспечивали заданное давление. Моделирование осуществлялось при давлениях в интервале $p = 0.25 - 2.00 \text{ ГПа}$.

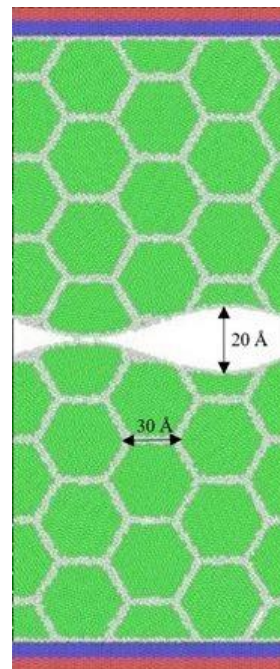


Рис. 1. Исходная структура, использованная для атомистического моделирования процесса УЗС. Поверхностные слои с ограничениями изображены красным цветом, термостаты – синим, слои со свободными атомами – зеленым цветом.

Fig. 1. Initial structure used for atomistic simulation of USW. Fixed surface atoms are represented by red, thermostats by blue and free atoms by green colors

На втором этапе координаты всех атомов и размеры расчетной ячейки умножались на 1.004, чтобы согласовать параметр решетки с температурой $T=300 \text{ К}$, и система приводилась к равновесию в течение 100 пс при этой температуре при сохранении тех же ограничений на внешние слои и при том же давлении.

На третьем этапе моделирования атомам верхнего и нижнего фиксированных слоев задавались периодические синусоидальные смещения в противоположных направлениях вдоль оси x при сохранении координат y : $x(t) = \pm x_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$, где амплитуда x_0 составляла 5 нм, а период колебаний $T = 500 \text{ пс}$. Шаг по времени при моделировании составлял 2 фс.

После каждого полупериода колебаний сохранялись координаты и скорости атомов, на основе которых анализировались кинетические энергии атомов и температурные профили вблизи границы раздела. В соответствии с концепцией локальной квазitemпературы [12], для каждого атома рассчитывалась квазitemпера-

тура $T_i(t) = \frac{2}{3k_B} K_i(t)$, где кинетическая энергия хаотического движения атомов вычислялась как $K_i(t) = \frac{1}{2} m [\langle v_i(t)^2 \rangle - \langle v_i(t)^2 \rangle]$, где угловые скобки обозначают усреднение по времени. Усреднение осуществлялось по скоростям атомов, сохраненным для 1000 последних шагов каждого полуцикла. Для построения температурного профиля расчетная ячейка была поделена на 30 слоев, параллельных оси x , в каждом из которых определялась температура путем усреднения по всем атомам, находящимся в этом слое.

Для определения значения давления в процессе сдвиговых колебаний рассчитывалась компонента F_y суммарной силы, действующей на все атомы нижнего фиксированного слоя. Для уменьшения флуктуационного разброса эта сила усреднялась по 250 шагам времени.

Для моделирования была использована программа молекулярной динамики XMD, межатомные взаимодействия описывались с помощью потенциала для меди, основанного на методе погруженного атома [13]. Для визуализации и структурного анализа использовалась программа Ovito [14]. Для идентификации дефектов (дислокаций, дефектов упаковки, границ зерен и т.д.) применялся метод анализа общих соседей, который встроен в программу OVITO.

Результаты и обсуждение

На Рис. 2 представлены атомные структуры системы после релаксации при температуре $T = 300$ К под давлением $p = 0.25$ ГПа и последующих циклов синусоидального сдвига.

Видно, что под влиянием сдвигов возрастает площадь контакта между блоками, и первоначально широкая полость трансформируется в пору. При этом объем поры оказывается несколько меньше, чем до начала сдвигов. Так, при данном значении давления площадь поперечного сечения полости равна примерно 2600 \AA^3 до начала сдвигов и 2240 \AA^3 после 5 циклов сдвига.

Чем выше давление, тем меньше размер остающейся поры. На Рис. 3 изображены атомные структуры системы после 5 циклов сдвига при давлениях $p = 0.50, 0.75$ и 1.00 ГПа. Таблица 1 показывает значения площади поперечного сечения полости до сдвига S_0 и после 5 циклов сдвига S_5 при различных давлениях. При увеличении давления до 0.75 ГПа объем поры уменьшается постепенно, но при значении давления между 0.75 и 1.00 МПа происходит скачкообразное уменьшение до нуля. То есть, при давлении выше некоторого критического, значение которого, видимо, зависит от размера исходных неровностей, происходит полное заживление пор при синусоидальных сдвигах.

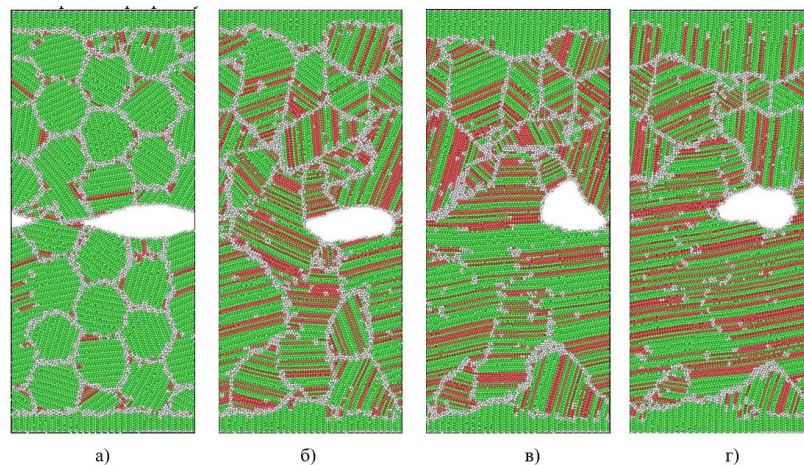


Рис. 2. Атомные структуры системы после релаксации под давлением $p = 0.25$ МПа при температуре $T = 300$ К (а) и после 1 (б), 3 (в) и 5 (г) циклов синусоидального сдвига.

Fig. 2. Atomic structures of the system after relaxation under pressure $p = 0.25$ МПа at temperature $T = 300$ К (а) and after 1 (б), 3 (с) and 5 (д) cycles of sinusoidal shear.

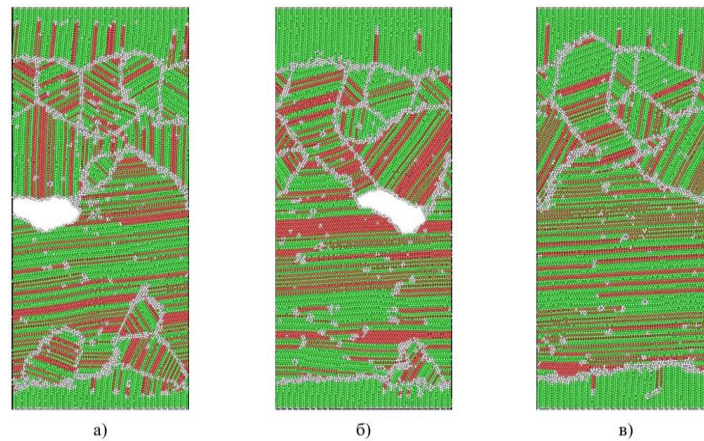


Рис. 3. Структуры системы после 5 циклов сдвига при давлениях $p = 0.50$ (а), 0.75 (б) и 1.00 (в) ГПа.

Fig. 3. Structures of the system after 5 shear cycles at pressures $p = 0.50$ (a), 0.75 (b) and 1.00 (c) GPa.

Интересно посчитать свободный объем системы в состоянии с залеченной порой после 5 циклов сдвига под давлением 1 ГПа. Под этим давлением размер системы в направлении оси y составляет 426.08 \AA , откуда, с учетом других размеров расчетной ячейки при температуре 300 К и количества атомов, можно получить среднее значение атомного объема $v_a = 12.24 \text{ \AA}^3$ против равновесного атомного объема кристалла меди при той же температуре $v_{a0} = 11.95 \text{ \AA}^3$. Следовательно, избыточный объем составляет 2.4%. Чтобы понять природу такого большого избыточного объема, оценим давление вдоль оси y , которое действует на систему. Для этого были рассчитаны усредненные по 250 шагам значения полной силы, действующей на атомы нижнего фиксированного слоя, которые испытывают только заданные смещения вдоль оси x . На Рис. 4 показаны значения этой силы в течение пятого цикла колебаний. Эти силы испытывают значительный разброс, однако видно, что они отрицательны, то есть, растягивают систему. Для оценки возьмем значение $3 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$, близкое к среднему значению этих сил. Тогда напряжение растяжения, которое они вызывают, составляет примерно 1.2 ГПа. Взяв для модуля Юнга меди величину $E = 120 \text{ ГПа}$, можно тогда определить величину упругой деформации системы $\varepsilon \approx 1\%$.

Таким образом, свободный объем нанокристалла вызван большим напряжением растяжения. Релаксация этого напряжения приводит к увеличению свободного объема в дефектных участках (ядрах дислокаций, границах зерен), в которых сосредотачивается 1.4% свободного

объема, а оставшийся 1% деформации сохраняет упругий характер.

Таблица 1. Значения площади поперечного сечения полости до сдвига S_0 и после 5 циклов сдвига S_5 при различных давлениях

Table 1. Values of the cross-sectional area of a pore before shear S_0 and after 5 shear cycles S_5 at different pressures

| Давление, ГПа | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 |
|----------------------|------|------|------|------|
| $S_0, \text{ \AA}^3$ | 2600 | 2465 | 2300 | 1580 |
| $S_5, \text{ \AA}^3$ | 2240 | 1680 | 1580 | 0 |

Из Рис. 2 видно, что уже при сжатии системы нормальным давлением в зернах начинается пластическая деформация. Границы зерен испускают частичные дислокации, которые пересекают все зерно и поглощаются противоположными границами, образуя в зернах дефекты упаковки (их следы обозначены красными атомами). Сдвиги приводят к резкому повышению дислокационной активности в зернах по тому же механизму испускания границами частичных дислокаций. Этот механизм был исследован в ряде работ, посвященных пластической деформации нанокристаллов [15].

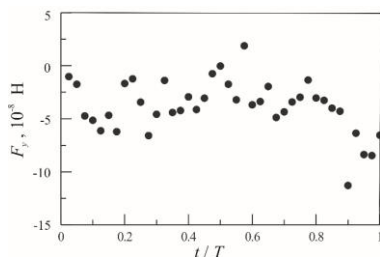


Рис. 4. Зависимость суммарной силы F_y , действующей на атомы нижнего слоя от времени в течение пятого цикла колебаний

Fig. 4. Dependence of the total force F_y acting on the atoms of the lower layer on time during the fifth cycle of oscillations

Характерной особенностью является рост зерен в нанокристалле в процессе знакопеременной сдвиговой деформации. Такой рост зерен многократно наблюдался в моделировании деформации нанокристаллических металлов в условиях монотонной деформации [16,17]. Как видим, аналогичный рост зерен может происходить и при знакопеременной сдвиговой деформации. В области первоначальной границы между блоками рост зерен приводит к объединению зерен, принадлежащих к разным блокам. В работах, посвященных экспериментальным исследованиям, неоднократно отмечалось, что подобное объединение зерен через границу контакта приводит к формированию сварных соединений с наименьшим количеством дефектов [18-20].

Анализ температуры при различных давлениях показывает, что ее величина и распределение только незначительно зависят от количества циклов и практически не зависят от давления. На Рис. 5 представлены профили температуры при давлении 0.75 ГПа в течение 5 циклов деформации. Ввиду малого размера системы, повышение температуры незначительно, а значения ее испытывают большой пространственный разброс. Максимальное повышение температуры в области соединения составляет примерно 150 К.

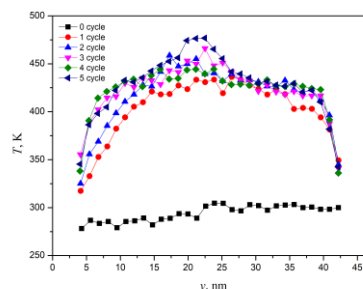


Рис. 5. Профили температуры в системе во время циклических сдвигов под давлением 0.75 МПа

Fig. 5. Temperature profiles in the system during cyclic shifts under pressure of 0.75 MPa

Выводы

Таким образом, методом молекулярной динамики было проведено моделирование процесса ультразвуковой сварки двух блоков нанокристаллической меди с неровностями под различными давлениями. Моделирование показало, что соединение формируется путем расширения области контакта блоков при взаимных сдвигах последних, а первоначальная полость трансформируется в пору, размер которого уменьшается с повышением давления.

При некотором критическом давлении происходит полное залечивание поры и образование сплошного соединения. Нанокристалл, образовавшийся в результате соединения, имеет повышенный атомный объем, что связано с релаксацией поры под действием сдвиговых деформаций и напряжения растяжения.

Знакопеременная деформация сдвига, происходящая при моделируемой УЗС, приводит к росту зерен, в том числе путем объединения зерен, первоначально принадлежавших двум разным блокам. Это является важным фактором, приводящим к формированию бездефектного соединения при УЗС.

Список литературы

1. Ni Z.L., Ye F.X. Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: A review // J. Manuf. Process. 2018. V. 35. P. 580-594.
2. Shayakhmetova E.R, Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Structure and shear strength of ultrasonically welded nickel joints // Lett. Mater. 2023. V. 13. P. 456-461.

3. Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure of a titanium sample produced by ultrasonic consolidation // *Lett. Mater.* 2022. V. 12. P. 153-157.
4. Hehr A., Norfolk M. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing // *Rapid Prototyp. J.* 2019. V. 26. P. 445–458.
5. Long Y., He B., Cui W., Ji Y., Zhuang X., Twiefel J. Investigations on the mechanism of micro-weld changes during ultrasonic wire bonding by molecular dynamics simulation // *Mater. Design.* 2020. V. 192. 108718.
6. Mostafavi S., Bamer F., Markert B. Molecular dynamics simulation of interface atomic diffusion in ultrasonic metal welding // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. V. 118. P. 2339-2353.
7. Ma Q., Ma J., Zhou J., Ji H. Intrinsic dependence of welding quality and recrystallization on the surface-contacted micro-asperity scale during ultrasonic welding of Cu-Cu joints // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 17. P. 353-364.
8. Ma Q., Song, C., Zhou J., Zhang L., Ji H. Dynamic weld evolution during ultrasonic welding of Cu–Al joints. *Mater. Sci. Eng. A.* 2021. V. 823. 141724.
9. Yang J., Zhang J., Qiao J. Molecular dynamics simulations of atomic diffusion during the Al–Cu ultrasonic welding process. *Materials.* 2019. V. 12. 2306.
10. Nazarov A.A., Bachurin D.V., Ni Z. Atomistic simulation of ultrasonic welding of copper // *Metals.* 2022. V. 12. 2033.
11. Murzaev R.T., Idrisova M.A., Nazarov A.A. Simulation of ultrasonic welding of copper: effect of the amplitude of vibrations // *Lett. Mater.* 2024. V. 14. P. 45-50.
12. Hayashi K., Sakudo N., Kawai T. A new measure of local temperature distribution in non-equilibrium molecular dynamics simulation of friction // *Surf. Coat. Technol.* 1996. V. 83. P. 313–316.
13. Foiles S.M., Baskes M.I., Daw M.S. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys // *Phys. Rev. B.* 1986. V. 33. P. 7983–7991.
14. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool // *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 2010. V. 18. 15012
15. Wolf D., Yamakov V., Phillpot S.R., Mukherjee A., Gleiter H. Deformation of nanocrystalline materials by molecular-dynamics simulation: relationship to experiments? // *Acta Materialia.* 2005. V. 53. P. 1-40.
16. Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Механизмы деформационно-индуцированного роста зерен двумерного нанокристалла при различных температурах деформации // *ФММ.* 2014. Т. 115. С. 607-614.
17. Haslam A.J., Moldovan D., Yamakov V., Wolf D., Phillpot S.R., Gleiter H. Stress-enhanced grain growth in a nanocrystalline material by molecular-dynamics simulation // *Acta Materialia.* 2003. V. 51. P. 2097-2112.
18. Haddadi F., Tsivoulas D. Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding // *Mater. Charact.* 2016. V. 118. P. 340–351.
19. Yang J., Cao B., Lu Q. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints // *Materials.* 2017. V. 10. 193.
20. Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Mukhametgalina A.A., Nazarov A.A. Structure evolution in ultrafine-grained nickel induced by ultrasonic welding // *Lett. Mater.* 2024. V. 14. P. 91-96.

Информация об авторах

Р.Т. Мурзаев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

М.А. Идрисова – аспирант, стажер-исследователь Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

А.А. Назаров – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

References

1. Ni, Z.L., Ye, F.X. (2018). Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: A review. *J. Manuf. Process*, 35, 580-594.
2. Shayakhmetova, E.R., Mukhametgalina, A.A., Murzinova, M.A., & Nazarov, A.A. (2023) Structure and shear strength of ultrasonically welded nickel joints. *Lett. Mater.*, 13, 456-461.
3. Mukhametgalina, A.A., Murzinova, M.A., & Nazarov, A.A. (2022). Microstructure of a tita-

- nium sample produced by ultrasonic consolidation. *Lett. Mater.*, 12, 153-157.
4. Hehr, A., & Norfolk, M. (2019). A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. *Rapid Prototyp. J.*, 26, 445–458.
 5. Long, Y., He, B., Cui, W., Ji, Y., Zhuang, X., & Twiefel, J. (2020). Investigations on the mechanism of microweld changes during ultrasonic wire bonding by molecular dynamics simulation. *Mater. Design*, 192, 108718.
 6. Mostafavi, S., Bamer, F., & Markert, B. (2022). Molecular dynamics simulation of interface atomic diffusion in ultrasonic metal welding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 118, P. 2339-2353.
 7. Ma, Q., Ma, J., Zhou, J., & Ji, H. (2022). Intrinsic dependence of welding quality and recrystallization on the surface-contacted micro-asperity scale during ultrasonic welding of Cu-Cu joints. *J. Mater. Res. Technol.*, 17, 353-364.
 8. Ma, Q., Song, C., Zhou, J., Zhang, L., & Ji, H. (2021). Dynamic weld evolution during ultrasonic welding of Cu–Al joints. *Mater. Sci. Eng. A*, 823, 141724.
 9. Yang, J., Zhang, J., & Qiao, J. (2019). Molecular dynamics simulations of atomic diffusion during the Al–Cu ultrasonic welding process. *Materials*, 12, 2306.
 10. Nazarov, A.A., Bachurin, D.V., & Ni, Z. (2022). Atomistic simulation of ultrasonic welding of copper. *Metals*, 12, 2033.
 11. Murzaev, R.T., Idrisova, M.A., & Nazarov, A.A. (2024). Simulation of ultrasonic welding of copper: effect of the amplitude of vibrations. *Lett. Mater.*, 14, 45-50.
 12. Hayashi, K., Sakudo, N., & Kawai, T. (1996). A new measure of local temperature distribution in non-equilibrium molecular dynamics simulation of friction. *Surf. Coat. Technol.*, 83, 313–316.
 13. Foiles, S.M., Baskes, M.I., & Daw, M.S. (1986). Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. *Phys. Rev. B*, 33, 7983–7991.
 14. Stukowski, A. (2010). Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO. the Open Visualization Tool. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 18, 15012
 15. Wolf, D., Yamakov, V., Phillpot, S.R., Mukherjee A., & Gleiter H. (2005). Deformation of nanocrystalline materials by molecular-dynamics simulation: relationship to experiments? *Acta Materialia*, 53, 1-40.
 16. Korznikova, E.A., & Dmitriev, S.V. (2014). Mechanisms of deformation-induced grain growth of a two-dimensional nanocrystal at different deformation temperatures. *Phys. Metals Metallogr.*, 115, 570–575.
 17. Haslam, A.J., Moldovan, D., Yamakov, V., Wolf D., Phillpot S.R., & Gleiter H. (2003). Stress-enhanced grain growth in a nanocrystalline material by molecular-dynamics simulation. *Acta Materialia*, 51, 2097-2112.
 18. Haddadi, F., & Tsivoulas, D. (2016). Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding, *Mater. Charact.*, 118, P. 340–351.
 19. Yang, J., Cao, B., & Lu, Q. (2017). The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints. *Materials*, 10, 193.
 20. Shayakhmetova, E.R., Murzinova, M.A., Mukhametgalina, A.A., & Nazarov, A.A. (2024). Structure evolution in ultrafine-grained nickel induced by ultrasonic welding. *Lett. Mater.*, 14, 91-96.

Information about the authors

R. T. Murzaev - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

M.A. Idrisova – PhD student, Probation Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

A.A. Nazarov – Doctor of Science, Principal Researcher, Deputy Director at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences..

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

Статья поступила в редакцию 08.11.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 08 Nov. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.