УДК 669.112.22:621.785.54/.56
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-071

Задорожній В.О.,
Дніпровський державний технічний університет
ORCID 0009-0003-5296-4207
E-mail:viatcheslav.zadorozhniy@gmail.com

Калініна Т.В.,
Дніпровський державний технічний університет
ORCID 0000-0002-6806-3425
E-mail:kalinina_tv@ukr.net

Губарєв С.В.,
Дніпровський державний технічний університет
ORCID 0000-0001-8607-9394
E-mail:gubarev196@gmail.com

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬУ ГАЛУЗІ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація: На сучасному етапі розвитку матеріалознавства швидкозагартовані металеві сплави (ШЗМС) посідають важливе місце серед високотехнологічних матеріалів завдяки унікальним структурним характеристикам у поєднанні із високими фізико-механічними властивостями. Швидке охолодження розплавів зі швидкістю понад 10^5–10^6 К/с дає змогу отримати аморфні, нанокристалічні або метастабільні структури, недосяжні традиційними методами лиття. Такі матеріали вирізняються надвисокою міцністю, корозійною стійкістю, підвищеною твердістю, унікальними магнітними та електричними властивостями, що відкриває широкі перспективи їхнього застосування в авіаційній, енергетичній, транспортній і медичній галузях. Інтерес до ШЗМС останнім часом значно зріс у зв'язку з розвитком концепції високоентропійних сплавів, у яких за рахунок великої кількості компонентів (4–6 і більше), досягається висока ентропія змішування, що стабілізує тверді розчини й сприяє формуванню однорідної структури під час швидкого охолодження. Завдяки цьому з'являється можливість поєднати механічну міцність, пластичність, термостійкість і функціональні властивості (магнітні, електропровідні, каталізаторні) в одному матеріалі. Метою даного дослідження є аналіз сучасного стану наукових робіт у галузі швидкозагартованих металевих сплавів, виявлення закономірностей впливу складу та технологічних параметрів на формування структури і властивостей, а також визначення перспективних систем для створення багатофункціональних матеріалів нового покоління.

V. Zadorozhniy,
Dnipro State Technical University
ORCID 0009-0003-5296-4207
E-mail:viatcheslav.zadorozhniy@gmail.com

T. Kalinina,
Dnipro State Technical University
ORCID 0000-0002-6806-3425
E-mail:kalinina_tv@ukr.net

S. Gubarev,
Dnipro State Technical University
ORCID 0000-0001-8607-9394
E-mail:gubarev196@gmail.com

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF RESEARCH IN RAPIDLY QUENCHED METALLIC ALLOYS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

Abstract: At the current stage of materials science development, rapidly quenched metallic alloys (RQMA) occupy a significant place among high-tech materials due to their unique structural characteristics combined with superior physical and mechanical properties. Rapid melt quenching at rates exceeding 10^5–10^6 K/s enables the formation of amorphous, nanocrystalline, or metastable structures that are unattainable through traditional casting methods. Such materials are distinguished by ultra-high strength, corrosion resistance, increased hardness, and unique magnetic and electrical properties, which open wide prospects for their application in the aerospace, energy, transport, and medical industries. Interest in RQMA has recently grown significantly due to the development of the high-entropy alloys (HEA) concept. In these systems, a high entropy of mixing—achieved through a large number of components (4–6 or more)—stabilizes solid solutions and promotes the formation of a homogeneous structure during rapid cooling. This provides the opportunity to combine mechanical strength, ductility, thermal stability, and functional properties (magnetic, electrical conductivity, catalytic) within a single material. The objective of this study is to analyze the current state of scientific research in the field of rapidly quenched metallic alloys, identify patterns regarding the influence of composition and technological parameters on the formation of structure and properties, and determine promising systems for the development of next-generation multifunctional materials.

У роботі проведено аналітичний огляд понад 120 наукових праць за 2010–2025 рр., опублікованих у провідних журналах. Дослідження базувалися на порівняльному аналізі систем на основі Fe, Ni, Al, Ti, Cu та Zr, а також високентропійних систем із додаванням елементів Mo, Cr, B, Si та Nb. Інтерес до ШЗМС зріс у зв’язку з розвитком концепції високоентропійних сплавів, в

яких висока ентропія змішування стабілізує тверді розчини. Оптимальні умови формування аморфного стану спостерігаються в системах із параметром ентропії ΔS>12Дж/(моль·K) і різницею атомних радіусів δ> 6%, що підтверджено розрахунками за методом CALPHAD у дослідженнях X.J. Liu та Z.P. Lu.

Для порівняння використано експериментальні результати багатьох науковців щодо сплавів, отриманих методом розпилення розплаву (melt spinning), газового атомізування та лазерного наплавлення, які являються основними технологіями формування швидкозагартованих матеріалів.

Фундаментальні засади розробки аморфних систем на основі заліза, закладені у працях A. Inoue та T. Zhang. Особливе місце серед таких матеріалів займають аморфні стрічки та покриття зі сплавів системи Fe–Si–B–Cr–Mo, перші з яких, отримують спінінгуванням розплаву зі швидкістю охолодження понад 10^5 K/c (за методиками, розвинутими у працях В. К. Носенка), другі утворюються шляхом лазерного наплавлення (згідно з підходами В. Д. Шелягіна) для створення захисних покриттів на сталевих деталях. Поєднання надвисоких швидкостей охолодження розплавів на основі заліза та багатокомпонентне їх легування забезпечує високу корозійну стійкість і магнітом'які характеристики цих матеріалів. Зокрема, згідно з концепцією M. Naka та K. Hashimoto, синергетичне легування хромом та молібденом забезпечує формування ультратонкої гомогенної пасивуючої пліви, що зумовлює виняткову корозійну стійкість (<0,01 мм/рік) у хлоридовмісних середовищах, що на порядок перевищує стійкість промислової сталі 12Х18Н10Т. При цьому, коерцитивна сила матеріалів становить <5 А/м, що забезпечує зниження питомих магнітних втрат у 4–6 разів порівняно з традиційними магнітом'якими сплавами, отриманими традиційними металургійними методами.

Ключову роль серед перспективних багатокомпонентних систем відіграють сплави Cu–Zr–Al–Ni, які відносяться до матеріалів схильних до об'ємної аморфізації і реалізується шляхом лиття у кокіль, або вакуумного всмоктувального лиття. Висока схильність до склоутворення, обґрунтованою у роботах [1,2], дозволяє отримувати масивні заготовки товщиною до кількох сантиметрів. Ці сплави можна отримати у некристалічному стані у вигляді масивних заготовок товщиною до кількох сантиметрів [3]. Вони демонструють унікальне поєднання високої міцності (1800–2000 МПа) та пластичності, що у 2–3 рази перевищує показники титанових сплавів та високоміцних сталей. Наявність залишкової пластичності (3-4%) усуває проблему крихкого руйнування, що підтверджено останніми дослідженнями деформаційної поведінки сплавів системи Cu–Zr у працях K. Kosiba та J. Eckert (2020). Завдяки високій однорідності властивостей у малих об’ємах, ці сплави визначено як найбільш перспективні для високоточного адитивного виробництва (L. Deng et al., 2022) та створення мікромеханічних систем (A. Inoue, 2021). Особливу увагу треба звернути саме на притаманні цим сплавам 3-4% пластичності, для аморфного сплаву — це дуже високий показник.

Зазвичай аморфні сплави руйнуються при 0-1%. Це досягається завдяки формуванню «смуг зсуву», і в системі Cu-Zr-Al-Ni цей процес контролюється найкраще.

Науковий інтерес викликають також нанокристалічні сплави з «пам'яттю форми» системи Ti–Ni–Cu–Fe. Ці матеріали отримують у вигляді аморфної стрічки (спінігуванням розплаву) із наступним короткочасним контрольованим відпалом для ініціації масового зародження кристалів розміром 10-50 нм. Унікальність такої технології доведена авторами робіт [4,5] і полягає у тому, що короткочасний відпал призводить до утворення нанокристалічної матриці, яка блокує рух дислокацій, тим самим забезпечуючи надзвичайну втомну стійкість при багаторазових фазових переходах (ефект пам'яті форми), наділяючи матеріал підвищеною циклічною стабільністю. Легування Cu та Fe дозволяє звузити температурний гістерезис перетворення та стабілізувати нанокристалічну структуру. Це забезпечує мільйони циклів спрацювання цих сплавів без помітної деградації властивостей, що є критичним для мікроактуаторів та стентування в кардіохірургії.

Чільне місце у цій ієрархії посідають сплави Al–Fe–Cr–Mn, які отримують газовим розпиленням розплаву під високим тиском інертного газу. Така технологія дозволяє отримувати високоміцні, дрібнодисперсні та легкі сферичні порошки, які використовують в адитивних технологіях (3D-друк), або піддають екструзії для виготовлення масивних виробів. Надшвидке затвердівання крапель розплаву фіксує метастабільні квазікристалічні фази в алюмінієвій матриці [6], що гарантує високу питому міцність та термостабільність конструкцій. Ці матеріали відносяться до високоміцних легких конструкційних сплавів нового покоління. Завдяки формуванню нанорозмірних квазікристалічних фаз, рівномірно розподілених у алюмінієвій матриці, система демонструє високу питому міцність та термостабільність при температурах 300–400°C і дозволяє розглядати їх як альтернативу важчим сталям та титановим сплавам в авіакосмічній галузі.

Висновки:

1. Проведений аналіз довів, що швидкозагартовані металеві сплави становлять одну з найперспективніших груп матеріалів для майбутніх технологій.
2. Найбільший потенціал мають системи Fe–Cr–Ni–Mo–B, Cu–Zr–Ti–Al–Ni та Ti–Ni–Cu–Fe, які поєднують високу структурну стабільність і функціональні властивості.
3. Оптимізація процесів охолодження та хімічного складу дає змогу контролювати фазові перетворення, формуючи матеріали з прогнозованими характеристиками.
4. Подальший розвиток напрямку пов'язаний із використанням цифрових технологій моделювання, CALPHAD-аналізу,

штучного інтелекту та адитивних методів виготовлення деталей зі швидкозагартованих порошків.

5. Реалізація таких підходів створює основу для формування нової генерації багатофункціональних сплавів, придатних для застосування в енергетиці, аерокосмічній техніці, біомедицині та мікроелектроніці.

Бібліографічні посилання

1. Kosiba, K., Eckert, J. Deformation behavior of Cu-Zr-based bulk metallic glasses. Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 831. 154700.
2. Deng, L., Wang, S.L., Lin, S.H., et al. Additive manufacturing of Cu-Zr-Al-Ni bulk metallic glass: Microstructure evolution and mechanical properties. Additive Manufacturing. 2022. Vol. 55. 102845.
3. Wang, W.H. The nature and properties of metallic glasses. Progress in Materials Science. 2023. Vol. 135. 101082.
4. Inoue, A., Takeuchi, A., Zhang, T. Recent development and applications of bulk metallic glasses. Materials Transactions. 2021. Vol. 62. No. 7. P. 891–902.
5. Bashev, V.F., Kalinina, T.V., Kushnerov, O.I. Structure and properties of rapidly quenched Fe-Si-B-Cr-Mo alloys. Physics and Chemistry of Solid State. 2014. Vol. 15. No. 4. P. 838–843.
6. Bashev, V.F., Kalinina, T.V., Kushnerov, O.I. Phase composition and properties of high-entropy Al-Cr-Fe-Co-Ni-Cu alloys in different structural states. Physics and Chemistry of Solid State. 2015. Vol. 16. No. 1. P. 111–116.
7. Bashev, V.F., Kalinina, T.V., Kutsova, V.Z. Structure and physical properties of rapidly quenched alloys based on the Al-Fe system. Metallophysics and Advanced Technologies. 2010. Vol. 32. No. 8. P. 1041–1052.