

**ПЕРСПЕКТИВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИМЕНЕНИЮ  
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ В  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Якубов Сабир Халмурадович**

*профессор кафедры естественно-научных дисциплин  
Института военной авиации Республики Узбекистан,  
доктор технических наук, профессор*

**Норкулов Элиёр Облокулович**

*доцент Института военной авиации Республики Узбекистан.*

**Ражабов Азамат Эшдавлатович**

*Института военной авиации Республики Узбекистан.*

**Аннотация:** В статье проанализированы научно-технической литературы трибологических металломатричных нанокomпозитов, учитывая расширенные междисциплинарные приложения нанокomпозитов с металлической матрицей в трибологии, были изучены будущие направления, потенциальные пути улучшения и возможные ожидаемые результаты трибологических металломатричных нанокomпозитов. Со всеми этими обсуждениями и исследованиями, учитывая расширенные междисциплинарные приложения металломатричных нанокomпозитов в трибологии, были изучены будущие направления, потенциальные пути улучшения и возможные ожидаемые результаты трибологических металломатричных нанокomпозитов.

**Ключевые слова:** нанокomпозиты с металлической матрицей, нанофазы, трибология, трение и износ, трибологические характеристики, противоизносные характеристики, эффекты упрочнения, механизмы противоизносного действия, антифрикционные и противоизносные конструкции.

**METALLOMATRITSALI NANOKOMPOZITLARNI SANOATDA  
FUNKTSIONAL QO'LLASH ISTIQBOLLARI**

**Yakubov Sabir Xalmuradovich**

*O'zbekiston Respublikasi Harbiy aviatsiya instituti tabiiy-ilmiy fanlar kafedrası  
professori, texnika fanlari doktori, professor*

**Norkulov Eliyor Oblokulovich**

*O'zbekiston Respublikasi Harbiy aviatsiya institut dotsenti.*

**Rajabov Azamat Eshdavlatovich**

*O'zbekiston Respublikasi Harbiy aviatsiya instituti.*

**Annotatsiya:** Maqolada tribologiyada metall matritsali nanokompozitlarning kengaytirilgan fanlararo qo'llanilishini hisobga olgan holda tribologik metallomatrik nanokompozitlarning ilmiy va texnik adabiyotlarini tahlil qilingan, ana shu barcha munozaralar va tadqiqotlar asosida tribologik metallomatrik nanokompozitlarning kelajakdagi yo'nalishlari, potentsial takomillashtirish yo'llari va kutilayotgan natijalari haqida mulohazalar yuritilgan.

**Kalit so'zlar:** metall matritsali nanokompozitlar, nanofazalar, tribologiya, ishqalanish va yeyilish, tribologik xususiyatlar, yeyilishga qarshi xususiyatlar, qattiqlashuv effektlari, yeyilishga qarshi mexanizmlar, ishqalanishga qarshi va yeyilishga qarshi konstruktsiyalar.

## PROSPECTS FOR FUNCTIONAL APPLICATION OF METAL-MATRIX NANOCOMPOSITES IN INDUSTRY

YAKUBOV Sabir Khalmuradovich

Professor of the Department of Natural Sciences of the Institute of Military Aviation  
of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences, Professor

NORKULOV Eliyor Oblokulovich

Associate Professor of the Institute of Military Aviation of the Republic of  
Uzbekistan.

Rajabov Azamat Eshdavlatovich

Military Aviation Institute of the Republic of Uzbekistan.

**Abstract:** The article analyzes the scientific and technical literature on tribological metal-matrix nanocomposites, taking into account the extended interdisciplinary applications of metal matrix nanocomposites in tribology, future directions, potential improvement paths and possible expected results of tribological metal-matrix nanocomposites were studied. With all these discussions and studies, considering the extended interdisciplinary applications of metal matrix nanocomposites in tribology, the future directions, potential improvement paths and possible expected results of tribological metal matrix nanocomposites have been explored.

**Keywords:** metal matrix nanocomposites, nanophases, tribology, friction and wear, tribological performance, antiwear performance, strengthening effects, antiwear mechanisms, antifricition and antiwear structures.

**Введение.** С развитием трибологической промышленности появляется все больше областей применения, в которых имеет важную значение нанокomпозиты с металлических матрицей. При этом, учитывая нанокomпозиты с металлических матрицей могут сочетаться с развивающимися антифрикционными и противоизносными конструкциями и технологиями

металлов и их сплавов для достижения большего потенциала в дальнейшем повышении трибологических характеристик [1-5]. А также следует отметить, их применения в захватывающих биомедицинских, энергетических, электронных областях и т.д.

**Методы.** Из анализа научно-технической литературы [6-40] известно, что для достижения хороших трибологических характеристик высокая прочность должна сочетаться с однородным деформационным поведением, позволяющим переносить пластическую деформацию без образования трещин и локальных разрушений [18]. Не отвечая этим требованиям, существующие трибопленки в целом хрупкие, с высокой собственной прочностью на сдвиг и легко разрываются [21, 26, 39]. Совсем недавно для снижения износа в системах сплавов (например, TiNbZr-Ag) была предложена новая реактивная и динамическая противоизносная конструкция [18]. Был получен аморфно-кристаллический оксидный нанокompозитный поверхностный слой (с сочетанием высокой прочности и высокой пластичности) при сухом скольжении. Основная идея этого достижения заключается в использовании высокой прочности металлического стекла при одновременном улучшении его однородной пластической деформируемости на поверхности за счет снижения локализации деформации в полосах сдвига (например, путем введения нескольких полос сдвига) [17, 18]. Сосуществование нанокристаллической и аморфной фаз помогает достичь этой цели, как показано на рис. 1(a).

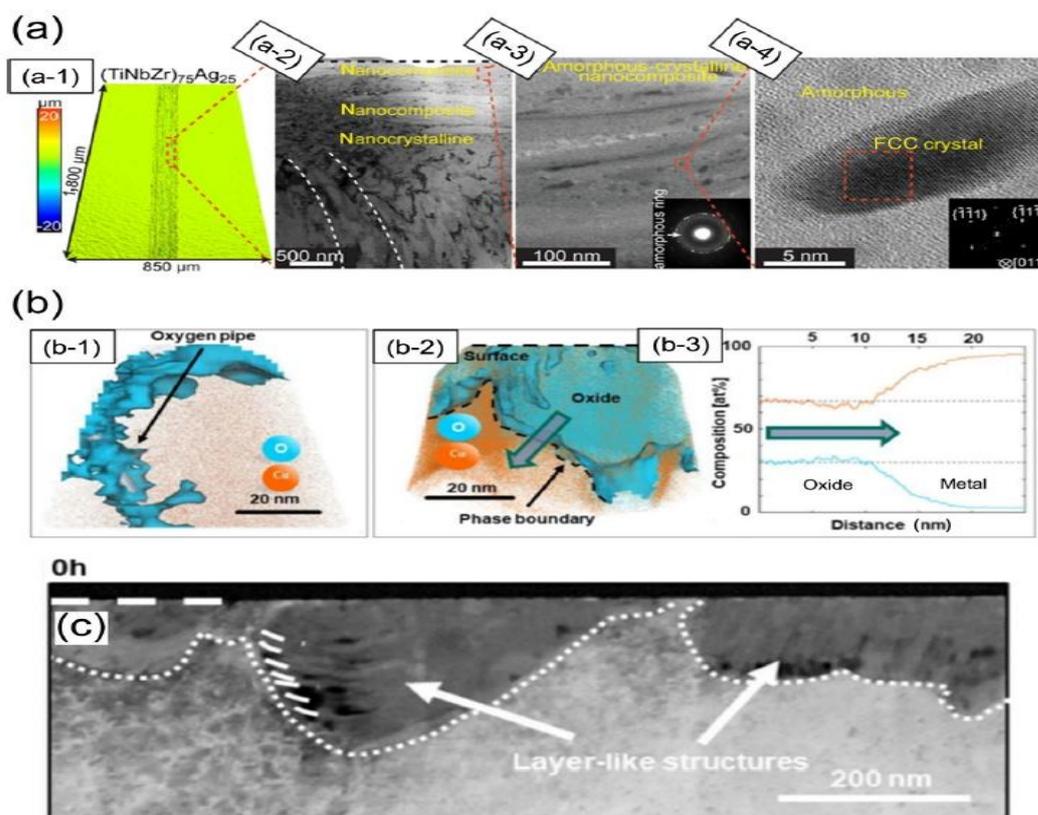


Рис. 1. (а) Использование нанокристаллическо-аморфной нанокомпозитной трибопленки в металлическом стекле TiNbZr-Ag для достижения динамического противоизносного контроля; (б) Характеристика путей диффузии кислорода в Cu во время испытания на износ; (с) STEM-изображение образца меди с высоким угловым кольцевым темным полем (HAADF) сразу после трибологической деформации со скоростью 1,5 мм/с в течение 1000 циклов.

Помимо изменения состава трибослоя, толщина трибослоя также может быть изменена с помощью инженерии границ зерен, инженерии границ фаз и т. д. для получения различной толщины оксидного слоя и достижения различных антифрикционных и противоизносных целей [30], как показано на рис. 1(с).

Из вышеизложенных, в металломатричных нанокомпозитах уже имеют нанофазы в (нано-)кристаллической структуре и обычно располагаются вблизи границ зерен и т.д. [25, 35], то после детального изучения химической термодинамики и эволюции материалов из нанокомпозитов с металлической матрицей потенциально могут получить аналогичный аморфно-кристаллический оксидный нанокомпозитный поверхностный слой с надежным контролем диффузионного пути окисления для создания более перспективных антифрикционных и противоизносных конструкций.

**Обсуждения.** Кроме непосредственного трибологического дизайна за счет микроструктурного и интерфейсного управления, нанокомпозиты с металлической матрицей могут сочетать в себе и другие функциональные возможности при использовании в качестве трибологических материалов, которые в свою очередь, во многом может определять их функциональные применения.

Во-первых, в нанокомпозитах с металлической матрицей может быть реализована надежная механическая конструкция, позволяющая реализовать больше механических функций: Например, из различных нанокомпозитов с металлической матрицей могут быть получены наполненные полими частицами синтактические пены с металлической матрицей, но их механические и трибологические характеристики сильно отличаются [20]. Это приведет к более высокому удельному поглощению энергии и более высокой удельной прочности плато, а также добавит свободу проектирования макроскопической геометрии для металломатричных нанокомпозитов [20]. С недавним пониманием и развитием деаллоирования элементов [6, 9], преференциального удаления дефектов [11, 31] и т.д., этот функциональный механический дизайн геометрически новых металломатричных нанокомпозитов может удовлетворить многие требования различных промышленных секторов трибологии, а их параметры, такие как размер пористости и распределение нанофаз, могут быть более контролируемы.

Более того, некоторые матрицы могут обладать динамическими характеристиками, такими как фазовый переход, вызванный деформацией. В условиях фрикционных и износных нагрузок условие деформации уже выполнено, и в перспективе можно разрабатывать адаптивные интеллектуальные нанокompозиты с металлической матрицей.

Во-вторых, все большее внимание привлекают биоприложения, которые обычно требуют трибологического дизайна для достижения конечных целей (например, имплантация костей уравнивает прочность, трибологические характеристики и и трибокоррозионные реакции металлических материалов) [11, 22, 37]. Недавние разработки и исследования в различных металлических матрицах уже показали большой потенциал нанокompозитов с металлической матрицей [12, 13, 32], как показано на рис. 2. Таким образом, включив глубокое понимание трибологических характеристик металломатричных нанокompозитов в разработку биосовместимых металлов или их сплавов, мы сможем расширить сферу биоприменения нанокompозитов с металлической матрицей, и эта захватывающая область принесет множество результатов как для научных исследований, так и для промышленности.

В-третьих, в связи с тем, что в начале XXI века планируется достичь глобальной углеродной нейтральности, высокоэффективное преобразование и хранение энергии становится актуальной темой. Металломатричных нанокompозитов с превосходными трибологическими свойствами могут обеспечить необходимый технологический прогресс в материальном аспекте для достижения растущих целей по производству энергии и сокращению выбросов.

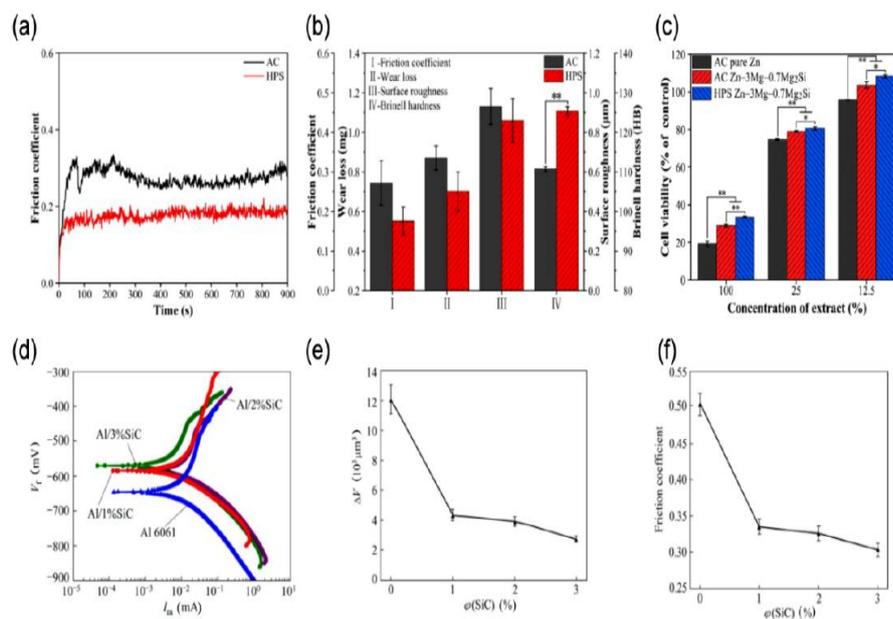


Рис. 2. (a) Кривые коэффициента трения и (b) гистограммы коэффициента трения, потерь на износ, шероховатости поверхности и твердости по Бринеллю литых и обработанных в HPS композитов Zn-3Mg-0,7Mg<sub>2</sub>Si в качестве

материала для костных имплантатов, испытанных в растворе Хенкса; (с) Жизнеспособность клеток MG-63 после культивирования с экстрактами чистого Zn в виде отливки, композитов Zn-3Mg-0,7Mg2Si в виде отливки и HPS-обработки в течение 3 дней при различных концентрациях; (d) График поляризации Тафеля нанокompозитов AA6061 и AA6061-SiC в 3%-ном растворе NaCl. Влияние содержания SiC на (e) потери от коррозионного износа и (f) коэффициент трения нанокompозитов AA6061-SiC в 3%-ном растворе NaCl.

Например, во многих новых системах производства и хранения энергии жидкие рабочие жидкости, включая  $SCO_2$ , расплавленные соли [8], расплавленные сплавы [7], серу [14, 15, 16] и т.д., обладают превосходными термогидравлическими свойствами, но при этом не вызывают серьезных проблем с коррозией и эрозией на поверхности защитных материалов. Поэтому после длительной эксплуатации этих систем будет существовать межфазное трибологическое взаимодействие, которое может существенно повлиять на производительность и стабильность системы [5]. Металломатричных нанокompозитов с более совершенной микроструктурой и способностью противостоять трибологической деградации могут быть использованы для изготовления таких систем, чтобы противостоять быстрой эрозии и другим трибологическим процессам, с синергетически настроенными тепловыми свойствами [28] и антикоррозионными характеристиками [10, 34]. Более интересно, что в последние годы все больше внимания уделяется наножидкостям в энергетических областях [36, 38]. Однако потеря нанофаз в результате спекания или агломерации во время работы системы является одной из самых больших проблем для расширения масштабов применения наножидкостей [36, 38]. При использовании нанокompозитов с металлических матрицей высвобождающиеся нанофазы могут образовывать наножидкости, которые компенсируют потери нанофаз и помогают поддерживать стабильность и устойчивость наножидкостей [36, 38]. Динамический баланс между трибологической деградацией и модификацией жидкостей может повысить долговечность и экономичность энергетических инфраструктур и станет интересной темой для будущих исследований.

**Заключение.** И последнее, но не менее важное: мы живем в мире с огромной потребностью и потреблением электронных устройств. При дальнейшем развитии нанокompозитов с металлических матрицей их можно будет использовать в различных электронных приложениях (например, в трибоэлектрических наногенераторах), где необходимы как трибологические, так и электрические характеристики [29, 40]. Предыдущие систематические исследования уже доказали, что нанокompозитов с металлических матрицей могут обладать особым электрическим поведением, таким как межфазная

локализация электронов [5, 27, 23, 24]. Поскольку некоторые электронные детали нуждаются в частых контактах и разъединениях, сбалансированные электрические и трибологические характеристики в нанокompозитах с металлических матрицей могут значительно повысить долгосрочную стабильность работы электроники.

Интересно, что связи трибологии с материаловедением, нанонаукой, энергетическими технологиями, биомедицинскими приложениями и электроникой через ММНК предвидят многообещающий и широкий сценарий применения этих новинок и развивающихся материалов.

### Использованная литература:

1. Якубов С.Х., Норкулов Э.О. Критический обзор по металломатричных нанокompозитов в трибологии // “Avionika jihozlari ekspluatatsiyasida uchraydigan muammolar va yechimlar. Rivojlanish istiqbollari”. Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – Qarshi: O‘RHA I, 2024. – В. 64-71.

2. Якубов С.Х., Норкулов Э.О., Холмуродов Д.С. Разработки технологии ультрадисперсных порошков на основе тугоплавких металлов // Методы и перспективы инновационного преподавания общетехнических дисциплин: Материалы Республиканского научно-теоретической конференции (31 октября 2024 г.) // Редкол.: Якубов С.Х. (Отв. ред.). – Карши: Институт военной авиации Республики Узбекистан, 2024. - С. 47-52.

3. Якубов С.Х., Норкулов Э.О. Критический обзор по металломатричных нанокompозитов в трибологии // “Samo qalqonlari” ilmiy-axborot jurnali 11 (3) 2024.- С. 351-360.

4. Якубов С.Х., Рузматов Р. А. Краткий обзор работ по исследованию и промышленных потребностей металломатричных композитов // Искусственный интеллект и компьютерные технологии: Сборник материалов Международного научно-практического конференции (Денау, 17-18 апреля 2025 г.). - Денау: ДИПиП, 2025. - С. 255-259.

5. Якубов С.Х., Рузматов Р.А. Систематический обзор исследования и промышленных потребностей композиционных материалов с металлической матрицей // Научный потенциал. ISSN: 2218-7774. № 2(49). 2025. - С. 11- 14.

6.[181] Badwe N, Chen X, Schreiber D K, Olszta M J, Overman N R, Karasz E K, Tse A Y, Bruemmer S M, Sieradzki K. Decoupling the role of stress and corrosion in the intergranular cracking of noble-metal alloys. Nat Mater 17(10): 887–893 (2018)

7.[188] Binder S, Haussener S. Design guidelines for Al-12%Si latent heat storage encapsulations to optimize performance and mitigate degradation. Appl Surf Sci 505: 143684 (2020)

8.[187] Brosseau D, Kelton J W, Ray D, Edgar M, Chisman K, Emms B. Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy

- storage systems in parabolic trough power plants. *J Sol Energy Eng* 127(1): 109–116 (2005)
- 9.[180] Erlebacher J, Aziz M J, Karma A, Dimitrov N, Sieradzki K. Evolution of nanoporosity in dealloying. *Nature* 410(6827):450–453 (2001)
- 10.[192] Geng R, Jia S Q, Qiu F, Zhao Q L, Jiang Q C. Effects of nanosized TiC and TiB<sub>2</sub> particles on the corrosion behavior of Al-Mg-Si alloy. *Corros Sci* 167: 108479 (2020)
- 11.[183] Ghosh S K, Celis J P. Tribological and tribocorrosion behaviour of electrodeposited CoW alloys and CoW–WC nanocomposites. *Tribol Int* 68: 11–16 (2013)
- 12.[185] Guan Z Y, Linsley C S, Pan S H, DeBenedetto C, Liu J K, Wu B M, Li X C. Highly ductile Zn-2Fe-WC nanocomposite as biodegradable material. *Metall Mater Trans A* 51(9):4406–4413 (2020)
- 13.[186] Guan Z, Linsley C S, Pan S H, Yao G C, Wu B M, Levi D, Li X C. Study on anti-aging Zn-Mg-WC nanocomposites for bioresorbable cardiovascular stents: Microstructure, mechanical properties, fatigue, and in vitro corrosion. SSRN Scholarly PaperID 3873674; Social Science Research Network: Rochester, NY, 2021.
- 14.[190] Jin K, Barde A, Nithyanandam K, Wirz R E. Sulfur heat transfer behavior in vertically-oriented isochoric thermal energy storage systems. *Appl Energy* 240: 870–881 (2019)
- 15.[3] Jin K Y, Pan S H, Wang T L, Zhang Z N. Non-negligible corrosion process in a novel sulfur-based energy storage system. *J Power Sources* 490: 229529 (2021)
- 16.[189] Jin K Y, Wirz R E. Sulfur heat transfer behavior in vertically-oriented and nonuniformly-heated isochoric thermal energy storage systems. *Appl Energy* 260: 114287 (2020)
- 17.[177] Katnagallu S, Wu G, Singh S P, Nandam S H, Xia W Z, Stephenson L T, Gleiter H, Schwaiger R, Hahn H, Herbig M, et al. Nanoglass–nanocrystal composite—A novel material class for enhanced strength–plasticity synergy. *Small* 16(39):2004400 (2020)
- 18.[1] Liu C, Li Z M, Lu W J, Bao Y, Xia W Z, Wu X X, Zhao H, Gault B, Liu C L, Herbig M, et al. Reactive wear protection through strong and deformable oxide nanocomposite surfaces. *Nat Commun* 12(1): 5518 (2021)
- 19.[184] Lu Z, Li C, Han J H, Zhang F, Liu P, Wang H, Wang Z L, Cheng C, Chen L H, Hirata A, et al. Threedimensional bicontinuous nanoporous materials by vapor phase dealloying. *Nat Commun* 9(1): 276 (2018)
- 20.[5] Moghadam A D, Schultz B F, Ferguson J B, Omrani E, Rohatgi P K, Gupta N. Functional metal matrix composites: Self-lubricating, self-healing, and nanocomposites-an outlook. *JOM* 66(6): 872–881 (2014)

- 21.[154] Mazaheri Y, Karimzadeh F, Enayati M H. Tribological behavior of A356/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface nanocomposite prepared by friction stir processing. *Metall Mat Trans A* 45(4):2250–2259 (2014)
- 22.[141] Mosleh-Shirazi S, Akhlaghi F, Li D Y. Effect of SiC content on dry sliding wear, corrosion and corrosive wear of Al/SiC nanocomposites. *Trans Nonferrous Met Soc China* 26(7): 1801–1808 (2016)
23. [198] Pan S H, Guan Z Y, Yao G C, Cao C Z, Li X C. Study on electrical behaviour of copper and its alloys containing dispersed nanoparticles. *Curr Appl Phys* 19(4): 452–457(2019)
- 24.[199] Pan S H, Yao G C, Yuan J, Li X C. Electrical performance of bulk Al–ZrB<sub>2</sub> nanocomposites from 2 K to 300 K. In *Nanocomposites VI: Nanoscience and Nanotechnology in Advanced Composites*. Srivatsan T S, Gupta M, Eds. Cham: Springer, 2019: 63–70.
- 25.[110] Pan S H, Yao G C, Sokoluk M, Guan Z Y, Li X C. Enhanced thermal stability in Cu-40 wt% Zn/WC nanocomposite. *Mater Des* 180: 107964 (2019)
- 26.[4] Pan S H, Yao G C, Guan Z Y, Yu N, Sokoluk M, Li X C. Kinetics and dynamics of surface thermal oxidation in Al-ZrB<sub>2</sub> nanocomposites. *Corros Sci* 176: 108890 (2020)
- 27.[2] Pan S, Yuan J, Zhang P, Sokoluk M, Yao G C, Li X C. Effect of electron concentration on electrical conductivity in in situ Al-TiB<sub>2</sub> nanocomposites. *Appl Phys Lett* 116(1): 014102 (2020)
- 28.[54] Pan S H, Yuan J, Zheng T Q, She Z Y, Li X C. Interfacial thermal conductance of in situ aluminum-matrix nanocomposites. *J Mater Sci* 56(24): 13646–13658 (2021)
- 29.[166] Pan S H, Zhang Z N. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction* 7(1):2–17 (2019)
- 30.[178] Rau J S, Balachandran S, Schneider R, Gumbsch P, Gault B, Greiner C. High diffusivity pathways govern massively enhanced oxidation during tribological sliding. *Acta Mater* 221: 117353 (2021)
- 31.[182] Singaravelu A S S, Williams J J, Goyal H D, Niverty S, Singh S S, Stannard T J, Xiao X H, Chawla N. 3D time-resolved observations of fatigue crack initiation and growth from corrosion pits in Al 7XXX alloys using in situ synchrotron X-ray tomography. *Metall Mater Trans A* 51(1):28–41 (2020)
- 32.[100] Tong X, Cai W H, Lin J X, Wang K, Jin L F, Shi Z M, Zhang D C, Lin J G, Li Y C, Dargusch M, Wen C E. Biodegradable Zn–3Mg–0.7Mg<sub>2</sub>Si composite fabricated by high-pressure solidification for bone implant applications. *Acta Biomater* 123: 407–417 (2021)
- 33.[191] Vasu A, Hagos F Y, Noor M M, Mamat R, Azmi W H, Abdullah A A, Ibrahim T K. Corrosion effect of phase change materials in solar thermal energy storage application. *Renew Sust Energy Rev* 76: 19–33 (2017)

- 34.[193] Wu C L, Zhang S, Zhang C H, Zhang J B, Liu Y, Chen J. Effects of SiC content on phase evolution and corrosion behavior of SiC-reinforced 316L stainless steel matrix composites by laser melting deposition. *Opt Laser Technol* 115: 134–139 (2019)
- 35.[52] Xu J Q, Chen L Y, Choi H, Li X C. Theoretical study and pathways for nanoparticle capture during solidification of metal melt. *J Phys Condens Matter* 24(25): 255304 (2012)
- 36.[194] Xuan Y M, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int J Heat Fluid Flow* 21(1): 58–64 (2000)
- 37.[176] Yan Y, Neville A, Dowson D, Williams S. Tribocorrosion in implants—Assessing high carbon and low carbon Co–Cr–Mo alloys by in situ electrochemical measurements. *Tribol Int* 39(12): 1509–1517 (2006)
- 38.[195] Yu W, Xie H Q. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. *J Nanomater* 2012:435873 (2012)
- 39.[85] Zabihi A, Soltani R. Tribological properties of B4C reinforced aluminum composite coating produced by TIG re-melting of flame sprayed Al-Mg-B4C powder. *Surf Coat Technol* 349: 707–718 (2018)
- 40.[197] Zhang J J, Zheng Y B, Xu L, Wang D A. Oleic-acid enhanced triboelectric nanogenerator with high output performance and wear resistance. *Nano Energy* 69: 104435 (2020)