Ievgeniia Markova
Kherson Maritime Vocational College of the Fishing Industry, Ukraine
ORCID iD: 0000-0001-7818-0644
Oleksii Sorokunskyi
Kherson Maritime Vocational College of the Fishing Industry, Ukraine
Mykola Levko
Kherson Maritime Vocational College of the Fishing Industry, Ukraine
Yurii Karakulov
Kherson Maritime Vocational College of the Fishing Industry, Ukraine

CONVERGENCE OF MATERIALS SCIENCE, METALLURGY, AND MECHANICS IN THE ERA OF PRODUCTION DIGITALIZATION

Abstract. This paper analyzes the key points of intersection and interconnections among current trends in materials science, metallurgical production, and applied mechanics within the context of the transition toward the Industry 4.0 concept.
Keywords: industrial engineering, metallurgical synthesis, optical and scanning electron microscopy, digitalization of production.

Євгенія Маркова
Херсонський морський фаховий коледж рибної промисловості, Україна
ORCID iD: 0000-0001-7818-0644
Олексій Сорокунський
Херсонський морський фаховий коледж рибної промисловості, Україна
Микола Левко
Херсонський морський фаховий коледж рибної промисловості, Україна
Юрій Каракулов
Херсонський морський фаховий коледж рибної промисловості, Україна

КОНВЕРГЕНЦІЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА, МЕТАЛУРГІЇ ТА МЕХАНІКИ В ЕПОХУ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА

Анотація. В роботі проведено аналіз ключових точок перетину та взаємозв'язку між сучасними трендами у матеріалознавстві, металургійному виробництві та прикладній механіці в умовах переходу до концепції Індустрії 4.0.
Ключові слова: промисловий інжиніринг, металургійний синтез, оптична та растрова електронна мікроскопія, цифровізація виробництва.

Сучасний етап розвитку промислового інжинірингу характеризується відходом від ізольованого проектування технологічних процесів. Створення конкурентоспроможних машинобудівних конструкцій вимагає синергетичної інтеграції між комп'ютерним дизайном матеріалів, передовими металургійними технологіями та прецизійною механічною обробкою. Традиційні підходи, що базуються на емпіричних розрахунках та стандартних довідникових масивах, вичерпали свій потенціал у контексті зниження матеріаломісткості та підвищення експлуатаційної надійності систем [1].

Завдяки розвитку обчислювальних методів, матеріалознавство перейшло від констатації характеристик наявних сплавів до предиктивного моделювання речовин із наперед заданими властивостями. Особливу роль відіграє розробка високоентропійних сплавів (ВЕС) та металоматричних композитів, які демонструють унікальні показники питомої міцності та циклічної довговічності, що змінює класичні уявлення про межі витривалості конструкційних матеріалів. Для цього використовуються:

1.Модернізація металургійних процесів та порошкові технології. Класичні методи металургії трансформуються під впливом адитивних технологій. Застосування ультрадисперсних порошкових систем та технологій селективного лазерного плавлення (SLM) дозволяє нівелювати проблему макроліквації та внутрішніх дефектів, характерних для великогабаритних виливків. Водночас розвиток водневої ("зеленої") металургії не лише знижує екологічне навантаження, а й забезпечує отримання первинної сировини вищого ступеня чистоти від шкідливих домішок.

2.Цифрова механіка та генеративний дизайн. Сучасна прикладна механіка спирається на глибинну симуляцію напружено-деформованого стану (НДС) за допомогою методу скінченних елементів (FEA). Впровадження алгоритмів штучного інтелекту у генеративному дизайні дозволяє створювати біонічні форми деталей, де матеріал розподіляється виключно вздовж ліній головних напружень. Це забезпечує зниження ваги конструкцій до 40-50% за збереження їхньої жорсткості.

3.Гібридні методи з'єднання як фактори механічної інтеграції. Створення складних вузлів із різнорідних матеріалів (наприклад, композит–титан–алюміній) вимагає впровадження нових механічних технологій. Зварювання тертям з перемішуванням (FSW) та дифузійне з'єднання у вакуумі дозволяють уникати температурних деформацій та утворення крихких інтерметалідних фаз, що гарантує структурну гомогенність критичних вузлів [2, 3].

Для успішних досліджень в цій галузі на практиці використовують: металургійний синтез (механоактивація порошків у кульових млинах з наступним гарячим ізостатичним пресуванням (ГІП) або електроіскровим спіканням, оптичну та растрову електронну мікроскопію (РЕМ), рентгеноструктурний фазовий аналіз); механічні випробування (вимірювання мікротвердості за Віккерсом), випробування на стиск та розтяг, триботехнічні випробування за схемою "вал-колодка" без змащення та в умовах абразивного зношування.

Встановлено, що застосування технології SPS дозволяє отримати ультрадрібнозернисту металеву матрицю з рівномірним розподілом зміцнюючих частинок карбіду титану (TiC) розміром 0.5–1.5 мкм. Металургійний зв'язок на границі "матриця–наповнювач" є когерентним, що запобігає викришуванню частинок під час тертя. Введення 15 об.% (TiC) у матрицю конструкційної сталі підвищує загальну твердість матеріалу на 45–50% порівняно з незміцненим аналогом, при цьому межа плинності зростає на 30% завдяки механізмам дисперсійного зміцнення (Орована). Триботехнічні випробування показали зниження інтенсивності зношування композиту в 2.8 раза в умовах сухого тертя.

Коефіцієнт тертя стабілізується на рівні 0.32 завдяки формуванню вторинних захисних оксидних плівок на поверхні контакту [4,5].

Використання комплексного підходу до проектування структури матеріалів шляхом оптимізації режимів термічної та механічної обробки в процесі порошкової металургії надасть можливість подовжити строк дії металевих конструкцій.

Отримані матеріали рекомендуються для впровадження у виробництво деталей важкого машинобудування (футеровки млинів, лопатки змішувачів, елементи бурового устаткування), що дозволить збільшити їхній міжремонтний ресурс у 2–3 рази.

Подальший розвиток теми автори бачать в об'єднанні тріади "матеріал – технологія – конструкція" єдиним наскрізним цифровим простором. Ефективний розвиток механічної інженерії неможливий без врахування фізико-хімічних еволюцій матеріалу на всіх етапах його металургійної та фінішної обробки. Впровадження концепції "цифрових двійників" (Digital Twins), які враховують структурну спадковість металу, є магістральним шляхом до підвищення живучості машин та технічних систем нового покоління [2].

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. Progress in Materials Science. 2021. Vol. 51, No. 4. P. 427–556

2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. International Materials Reviews. 2017. Vol. 62, No. 3. P. 133–175.

3. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science. 2019. Vol. 46, No. 1. P. 1–184.

4. Падерно Ю. Б., Падерно В. Н., Філіпов В. Б. Порошкова металургія та композиційні матеріали. Київ: Наукова думка, 2020. 245 с.

5. Федорчук В. О., Лавренко В. О. Сучасні зносостійкі матеріали для важкого машинобудування. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2022. Т. 58, № 3. С. 45–52.