

КОВАЛЕВСЬКИЙ С.В., КОВАЛЕВСЬКА О.С., СИДЮК Д.М.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ

Ця стаття зосереджена на аналізі впливу магнітно-резонансної обробки на матеріали та на практичному підтвердженні результатів моделювання. Розглядаючи комплексний вплив магнітних полів та резонансних вібрацій на мікроструктуру матеріалів, стаття вносить вклад у розуміння механізмів зміцнення та підвищення властивостей матеріалів. Автори розробили математичні моделі, що описують динаміку взаємодії між магнітними полями та механічними вібраціями, і виконали серію експериментів для перевірки цих моделей. Результати демонструють підвищення твердості, зносостійкості та інших ключових характеристик оброблених матеріалів, підтверджуючи потенціал магнітно-резонансної обробки в машинобудуванні. Дослідження також акцентує на значенні цієї технології для оптимізації життєвого циклу виробів, від проектування до утилізації, сприяючи сталому розвитку індустрії.

Ключові слова: магнітно-резонансна обробка, математичне моделювання, експериментальне підтвердження, мікроструктура матеріалів, технологічні інновації в машинобудуванні, життєвий цикл виробів.

KOVALEVSKYY S.V., KOVALEVSKA O.S., SYDIUK D.M.

MODELING THE IMPACT OF MAGNETIC RESONANCE PROCESSING OF MATERIALS AND ITS EXPERIMENTAL CONFIRMATION

This article focuses on analyzing the impact of magnetic resonance processing on materials and the practical verification of modeling results. By examining the complex effects of magnetic fields and resonant vibrations on the microstructure of materials, the article contributes to understanding the mechanisms of strengthening and enhancing material properties. The authors have developed mathematical models that describe the dynamics of interaction between magnetic fields and mechanical vibrations and have conducted a series of experiments to verify these models. The results demonstrate an increase in hardness, wear resistance, and other key characteristics of the processed materials, confirming the potential of magnetic resonance processing in mechanical engineering. The study also highlights the significance of this technology for optimizing the life cycle of products, from design to disposal, contributing to the sustainable development of the industry.

Keywords: magnetic resonance processing, mathematical modeling, experimental confirmation, material microstructure, technological innovations in mechanical engineering, product life cycle.

1. Вступ. У контексті швидких змін ринкових умов та зростаючих вимог до гнучкості виробництва, інноваційні технологічні системи, які дозволяють ефективно управляти життєвим циклом виробу, набувають особливої актуальності в сучасному машинобудуванні [1]. Застосування методів магнітно-резонансної обробки робочих поверхонь значно підвищує якість деталей, їхній термін служби та експлуатаційні характеристики, що сприяє підтримці високого рівня конкурентоспроможності виробів на високотехнологічних ринках [2,3].

Життєвий цикл виробу машинобудування включає в себе критичні етапи, такі як проектування, виробництво, експлуатація та утилізація. Кожен з цих етапів вимагає інтеграції складних технологічних процесів. Важливість реконфігурації технологічних систем полягає у їх здатності підтримувати весь життєвий цикл виробу, забезпечуючи не тільки виробництво, але й оптимальне використання ресурсів на кожному з етапів [4]. Тому, значення інноваційної технології магнітно-резонансної обробки для підвищення довговічності та ефективності робочих поверхонь виробничих деталей є критично важливим для оптимізації життєвого циклу виробу. Завдяки цій технології можливе зниження часу на підвищення загальної продуктивності, що сприяє сталому розвитку в галузі машинобудування.

Одним з основних напрямків інновацій є розробка модульних технологічних платформ, які дозволяють швидко адаптувати виробничі лінії до нових видів продукції. Це включає інтеграцію автоматизованих роботизованих систем, що зменшує людський фактор і підвищує точність виробництва.

Застосування технологій цифрових двійників дозволяє вести тестування та оптимізацію процесів в реальному часі, знижуючи ризики та витрати при впровадженні нових технологій.

Реалізація екологічно чистих технологій та оптимізація використання ресурсів на всіх етапах життєвого циклу виробу допомагають знижувати вплив виробництва на довкілля.

Таким чином підкреслюється важливість застосування інноваційних технологічних рішень, таких як магнітно-резонансна обробка, для підтримки ефективності та довговічності виробничих процесів у машинобудуванні. Ці технології не тільки сприяють підвищенню продуктивності, але й забезпечують оптимальне використання ресурсів на кожному етапі життєвого циклу виробу, що є критично важливим для сталого розвитку галузі [5].

Актуальність статті полягає в необхідності теоретичного аналізу та експериментального підтвердження впливу магнітно-резонансної обробки на фізико-механічні характеристики матеріалів як перспективної технології для підвищення довговічності робочих поверхонь деталей, що впливає на показники життєвого циклу виробів машинобудування.

2. Метою статті є розробка математичних моделей магнітно-резонансної обробки, які інтегрують магнітні, механічні та термодинамічні ефекти, що спрямовані на оптимізацію властивостей оброблюваних матеріалів, а також, експериментальне підтвердження можливої практичної ефективності у реальних умовах.

3. Викладення основного матеріалу та результати. Вплив постійного магнітного поля неодимового магніту на зразок, який вібрає з резонансною частотою під дією широкосмугової наноамплітудної вібрації, є досить складним і мультимодальним процесом, який включає взаємодію магнітних, механічних та термодинамічних ефектів. Пропонуються математичні моделі процесів, які відбуваються під час такої взаємодії:

1. Магнітне поле і його вплив на матеріали.

Неодимові магніти виробляють дуже сильне магнітне поле, яке може впливати на електронні та атомні структури матеріалів, вміщених у це поле. Цей вплив залежить від магнітних властивостей матеріалу зразка. В матеріалах, які є феромагнітними або парамагнітними, магнітне поле може індукувати магнітні домени або вирівнювати магнітні моменти атомів, змінюючи таким чином їхні фізичні властивості [6,7].

2. Резонансна частота вібрації.

Коли зразок піддається вібрації на резонансній частоті, його атоми або молекули коливаються з максимально можливою амплітудою при даній зовнішній частоті збудження. Це призводить до збільшення внутрішнього енергетичного стану матеріалу, що може впливати на його механічні та термодинамічні характеристики [8].

3. Широкосмугова наноамплітудна вібрація.

Введення широкосмугових наноамплітудних вібрацій додає ще один рівень складності. Такі вібрації, що діють з малою амплітудою, але в широкому діапазоні частот, можуть забезпечувати більш рівномірний і постійний вплив на структуру матеріалу. Це може впливати на дефекти в кристалічній ґратці, зміцнення матеріалу або навіть на його хімічні властивості через посилення дифузійних процесів [9].

4. Термодинамічні ефекти.

Під час резонансної вібрації в матеріалі можуть генеруватися теплові ефекти через внутрішнє тертя та інші процеси перетворення енергії [10]. У поєднанні з сильним магнітним полем, це може призводити до зміни термічних властивостей матеріалу, його розширення або навіть до фазових перетворень.

Спільний вплив магнітного поля, резонансних вібрацій та широкосмугових коливань може призвести до складних, але контрольованих змін у матеріалі. Це може включати зміцнення механічних властивостей, зміну електромагнітних властивостей, а також покращення зносостійкості та корозійної стійкості.

Загалом, вплив постійного магнітного поля і широкосмугової наноамплітудної вібрації на зразок є високоефективним способом маніпулювання його властивостями на молекулярному та атомному рівнях, відкриваючи можливості для інженерії матеріалів і створення високопродуктивних виробів [11].

Розробка математичної моделі для такого впливу з окремих рівнянь впливу зазначених вище факторів може бути досить складною, але ось приклад моделі, яка може бути вихідним пунктом [12].

Модель розглядає зразок як систему з N атомів, кожен з яких має магнітний момент $\vec{\mu}_i$. Зразок піддається вібрації з амплітудою A і частотою f . Постійне магнітне поле \vec{B} впливає на кожен атом з силою:

$$\vec{F}_i = \vec{m}_i \times \vec{B}, \quad (1)$$

де \times означає векторний добуток.

Вплив вібрації на магнітний момент кожного атому описується через зміну цього моменту в часі, що задається рівнянням:

$$\frac{d\vec{\mu}_i}{dt} = \vec{v}_i = A f \cos(2\pi f t), \quad (2)$$

де t — час. Це рівняння показує, що швидкість зміни магнітного моменту атома (\vec{v}_i) пропорційна амплітуді вібрації A , частоті f і косинусу від фази вібрації.

Рух кожного атома з часом t , відкидаючи вплив інших атомів і зовнішніх факторів, можна описати як:

$$\vec{r}_i(t) = \vec{r}_i(0) + \int_0^t \vec{v}_i(t') dt'. \quad (3)$$

де $\vec{r}_i(0)$ — початкова позиція атома, а інтеграл від швидкості $\vec{v}_i(t')$ по часу t' дає переміщення атома.

Модель в основному зосереджена на взаємодії між магнітним полем і вібраціями зразка, яка потенційно може впливати на фізико-механічні властивості матеріалів. Цей вплив може бути значно різним для сталей, кольорових металів та неметалічних матеріалів через їх різноманітні магнітні та механічні характеристики. Розглянемо декілька ключових аспектів, які демонструють, як ця модель може бути пов'язана з властивостями різних матеріалів. Математичні моделі, які можуть описати вплив магнітних полів і вібрацій на різні типи матеріалів, представлені наступним чином [2,3,]:

Сталі (феромагнітні матеріали).

Для сталі, як феромагнітного матеріалу, зміна доменної структури під впливом зовнішнього магнітного поля може бути описана за допомогою магнітострикційного ефекту. Магнітострикція є явищем зміни форми або розмірів феромагнітного матеріалу внаслідок намагнічування:

$$\Delta l = \lambda \cdot l \cdot H \quad (4)$$

де: Δl — зміна довжини матеріалу, λ — коефіцієнт магнітострикції, l — первинна довжина матеріалу, H — магнітне поле.

Кольорові метали (наприклад, мідь, алюміній).

Для кольорових металів, які є слабомагнітними або немагнітними, можна розглянути ефекти, пов'язані з індукцією електричних струмів у металі, які з'являються через зміну магнітного поля або через рух матеріалу в магнітному полі:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (5)$$

де: ε — Електрорушійна сила (ЕРС), N — кількість витків (для котушок), Φ_B — магнітний потік.

Це може спричинити нагрівання матеріалу, відоме як "ефект Джоуля".

Неметалічні матеріали (наприклад, кераміка, полімери).

У випадку неметалів, де магнітні властивості зазвичай ігноруються, важливими є механічні вібрації. Вони можуть впливати на мікроструктуру через механічні напруження і деформації:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (6)$$

де: σ — напруження, E — модуль Юнга (модуль еластичності), ϵ — деформація.

Ці вібрації можуть викликати руйнування або структурні зміни, особливо при резонансних частотах.

Для аналізу впливу механічних вібрацій на матеріали в контексті зміцнення матеріалу, зменшення втоми та впливу на текучість і деформацію, можна розглянути наступні математичні моделі:

Зміцнення матеріалу.

Модель, що описує зміцнення матеріалу через впорядкування дефектів у структурі, може використовувати принцип суперпозиції стресів та їх релаксації. Вплив вібрацій можна розглядати як періодичне прикладання та зняття навантаження, що веде до поступової релаксації напружень навколо дефектів і, відповідно, до зменшення їхнього впливу на міцність матеріалу:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t), \quad (7)$$

де $\sigma(t)$ — миттєве напруження в матеріалі, σ_0 — початкове напруження, β — коефіцієнт релаксації, ω — кутова частота вібрацій.

Зменшення втоми матеріалу.

Зменшення втоми можна моделювати, використовуючи модифіковану модель Палмгрена-Майнера для накопичення пошкоджень. Якщо припустити, що вібрації зменшують швидкість накопичення втомних пошкоджень, модель може виглядати наступним чином:

$$D(t) = \int_0^t \frac{dN}{N_f(\sigma(t'))} dt', \quad (8)$$

де $D(t)$ — ступінь втомного пошкодження, dN — кількість циклів навантаження, N_f — кількість циклів до руйнування при даному максимальному напруженні $\sigma(t')$.

Вплив на текучість і деформацію.

Для неметалічних матеріалів, як-от полімерів, можна використовувати модель, яка враховує залежність в'язко-пружних властивостей від частоти вібрацій. Релаксація напружень в полімерах може бути описана через комплексний модуль пружності, що залежить від частоти:

$$\sigma(t) = E^*(\omega) \epsilon(t), \quad (9)$$

де $E^*(\omega)$ — комплексний модуль пружності, який залежить від частоти вібрацій, $\epsilon(t)$ — деформація.

Комплексний модуль включає в себе як зсувну, так і в'язку складову, що дозволяє моделювати часові зміни деформації під впливом постійних вібрацій.

Ці моделі дають базове розуміння того, як вібрації можуть впливати на різні типи матеріалів, забезпечуючи зміцнення, зменшення втоми та зміну в'язко-пружних властивостей.

Модель, яка розглядає термодинамічні ефекти внаслідок вібрацій в магнітному полі, включає декілька кроків: від генерації тепла в матеріалі до впливу цього тепла на термічне розширення і напруження. Модель потрібно розглядати з урахуванням енергетичного балансу та механічної взаємодії між структурами матеріалу.

Моделювання введення вібраційної енергії.

$$\dot{Q} = f(A, f, \rho, c_p, V), \quad (10)$$

де: \dot{Q} — швидкість генерації тепла, A — амплітуда вібрацій, f — частота вібрацій, ρ — щільність матеріалу, c_p — теплоємність матеріалу, V — об'єм матеріалу.

Ця функція має враховувати, як вібрації в магнітному полі перетворюються на теплову енергію, що поглинається матеріалом.

Рівняння термічного розширення.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (11)$$

де: ΔL — зміна довжини матеріалу, α — коефіцієнт термічного розширення, L — початкова довжина, ΔT — зміна температури.

Зміна температури ΔT може бути зв'язана з генерацією тепла через:

$$\Delta T = \frac{Q}{mc_p} \Delta t, \quad (12)$$

де m — маса матеріалу, а Δt — час впливу вібрацій.

Моделювання термічних напружень.

$$\sigma_{thermal} = E\alpha\Delta T, \quad (13)$$

де: $\sigma_{thermal}$ — термічні напруження, E — модуль Юнга (еластичність) матеріалу.

Це рівняння показує, як термічне розширення викликає механічні напруження всередині матеріалу, що можуть вплинути на його міцність та інші механічні властивості.

Математичне моделювання термодинамічних ефектів у магнітному полі, яке гальмує наноамплітудні вібрації, дозволяє розуміти і прогнозувати поведінку матеріалів під час такого впливу. Врахування цих ефектів є важливим для розробки нових матеріалів та технологій, особливо в галузях, де високі температури та висока точність вимірювань є критичними факторами.

Особливий науковий інтерес представляє дослідження впливу на атомний і субатомний рівень матеріалів зразків, частинки яких піддаються вібраціям у сильному рівномірному магнітному полі на власних резонансних частотах з амплітудами нанометричного діапазону.

Реалізація запропонованого і розробленого методу магнітно-резонансної обробки матеріалів шляхом впливу на зразок, розміщений в рівномірному магнітному полі малопотужним акустичним сигналом з рівно ймовірнісним розподілом сигналів однакової амплітуди в діапазоні 20-20000 Гц. Дослідження використання рівномірного потоку магнітного поля, утвореного потужними постійними магнітами, виконано для впливу на об'єм матеріалу непереточувальних пластин ріжучого інструменту CNMG 120508E-M. Надана схема впливу рівномірного магнітного потоку, ініційованого в результаті резонансних коливань зразка, викликаних широкосмуговим впливом рівній амплітуди за допомогою генератора «білого шуму» і п'єзо випромінювача для варіантів взаємного розташування елементів складання для експериментальних досліджень магніторезонансної обробки евтектоїдної сталі з хімічним складом: C = 0,8%; Si=0,15%; Mn=0,15%; P=0,012%; S=0,017%; Cr=0,10%; Al=0,009%; Cu=0,10% (рис.1a і 1b).

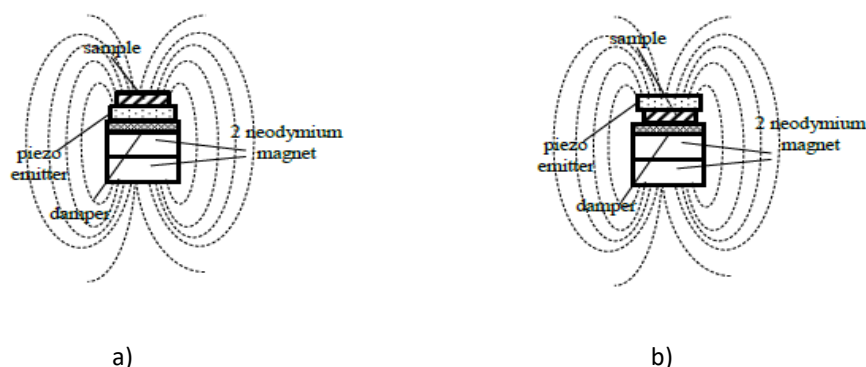


Рисунок 1 – Принципові схеми розташування зразків (sample) для зміцнення, неодимових магнітів (neodymium magnet), п'єзозбуджувача (piezo emitter) і демфера (damper) з верхнім (a) і нижнім (b) положенням зразка.

Додавання зразкам механічних коливань в рівномірному постійному магнітному полі дозволив максимально досягти об'ємного зміцнення зразків від 145 НВ до 197 НВ. Зразки твердого сплаву, що поміщені в магнітне поле постійного магніту, піддані резонансним коливанням, викликаним широкосмуговим впливом постійної амплітуди - «білим шумом», змінюють твердість і досягають максимального значення вже після 20...30 хвилин магніторезонансної обробки і після цього стабілізують значення твердості. Порівняльна ефективність магніторезонансної обробки зразків за представленими схемами забезпечена широкосмуговим п'єзоелектричним збудником потужністю до 5 Вт.

Деякі результати металографічних досліджень представлені на рис.2.



Рисунок 2 – структура сталевих зразків: (а) - до магніторезонансної обробки, НВ = 145; (б) - після магніторезонансної обробки, НВ = 197.

Фотографії структури отримані протравлюванням 4% спиртовим розчином HNO. Межі зерен проявляються після протравлювання по розірваній ферритній сітці в поздовжньому напрямку. При цьому спостерігалось формування в обсязі матеріалу зразків сітки армуючого характеру з пластинчастого перлиту. Збільшення амплітуди коливань п'єзоелектричного резонатора і, отже, зразків призводить до зростання твердості матеріалу і тривалості досягнення встановленого значення його твердості, проте характер таких змін носить екстремальний характер. Отримані результати дозволяють зробити висновок про перспективність магніторезонансної обробки для підвищення зносостійкості неперетачуваних пластин ріжучого інструменту, для підвищення довговічності елементів механічних деталей і конструкцій. Також, з'являється можливість розширити перелік технологічних впливів на робочі поверхні деталей машин поряд з поверхнево-пластичним деформуванням і термообробкою.

Висновки.

Підтверджено, що магнітно-резонансна обробка сприяє підвищенню якості та довговічності матеріалів машин і спрямована на оптимізацію терміну служби машинобудівної продукції та її конкурентоспроможності на високотехнологічних ринках. Розроблено математичну модель у вигляді низки математичних рівнянь, які описують складні взаємодії між магнітними, механічними та термодинамічними ефектами під час магнітно-резонансної обробки. Модель демонструє, як поєднання постійних магнітних полів і резонансних вібрацій може бути використане для контролю мікроструктури та властивостей матеріалів. Експериментальні дані засвідчили здатність магнітно-резонансної обробки збільшувати твердість матеріалів на 35-40%, а також стабілізувати ці властивості протягом тривалого часу, що є критично важливим для промислового застосування. Технологія магнітно-резонансної обробки сприяє оптимізації всіх етапів життєвого циклу виробу, включаючи проектування, виробництво, експлуатацію та утилізацію, забезпечуючи високу ефективність використання ресурсів і зниження впливу на довкілля. Результати статті відкривають нові можливості для подальших досліджень у сфері магнітно-резонансної обробки, особливо у зв'язку з розробкою модульних технологічних платформ, які дозволяють швидко адаптувати виробничі процеси до змінних умов ринку.

Список літератури:

1. Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 38-58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>.
2. Ковалевський, С., Ковалевська, О. (2022). Нові можливості для обробки матеріалів у сильному магнітному полі. // *Технічні науки та технології*, 4(26), 7-14. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4\(26\)-7-14](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-7-14).
3. Ковалевський, С. В., Ковалевська, О. С., Пелипенко, О. О. (2022). Магніторезонансна обробка металевих немагнітних зразків матеріалів. // *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2022): Матеріали тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції (Том 2, с. 46-47). Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. Доступно на: <https://conference-chemihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-1-46-47.pdf>*.
4. Andersen, R., Napoleone, A., Andersen, A.-L., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. (2024). A systematic methodology for changeable and reconfigurable manufacturing systems development. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 449-462. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.008>
5. Zheng, X., He, Y., Liao, R., & Yu, S. (2024). Reliability oriented key quality characteristics driven integrated built-in reliability activity chain and approach for manufacturing process. *Computers & Industrial Engineering*, 191, Article 110166. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110166>.
6. Nguyen, H. N., Nguyen, H. H., & Nguyen, H. L. (2023). Recent developments in hard magnetic nanostructured materials. In A. S. M. A. Haseeb (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Electronics* (pp. 803-819). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819728-8.00098-X>
7. Sola, A., Trinchì, A., & Hill, A. J. (2023). Self-assembly meets additive manufacturing: Bridging the gap between nanoscale arrangement of matter and macroscale fabrication. *Smart Materials in Manufacturing*, 1, Article 100013. <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2022.100013>
8. Qayyum, F., Umar, M., Dölling, J., Guk, S., & Prah, U. (2024). 3.03 - Mechanics of new-generation metals and alloys. In V. Silberschmidt (Ed.), *Comprehensive Mechanics of Materials (First Edition)*, pp. 31-57. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90646-3.00020-4>.
9. Martin, P., Aguilar, C., & Cabrera, J. M. (2024). A review on mechanical alloying and spark plasma sintering of refractory high-entropy alloys: Challenges, microstructures, and mechanical behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 1900-1928. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.205>.
10. Lambiase, F., Balle, F., Blaga, L.-A., Liu, F., & Amancio-Filho, S. T. (2021). Friction-based processes for hybrid multi-material joining. *Composite Structures*, 266, Article 113828. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113828>.
11. Sypniewska-Kamińska, G., Awrejcewicz, J., & Mazur, O. (2024). Analysis of resonant/nonresonant vibrations of simply-supported Kirchhoff nanoplates under in-plane magnetic field based on a strongly coupled two-mode model. *Thin-Walled Structures*, 199, Article 111832. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111832>.
12. Vidal, J. V., Carneiro, P. M. R., & Soares dos Santos, M. P. (2024). A complete physical 3D model from first principles of vibrational-powered electromagnetic generators. *Applied Energy*, 357, Article 122387. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122387>.

References (transliterated)

1. Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 38-58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>.
2. Kovalevskyy, S., & Kovalevska, O. (2022). Novi mozhyvosti dlia obrobky materialiv u sylnomu mahnitnomu poli. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 4(26), 7-14. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4\(26\)-7-14](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-7-14).
3. Kovalevskyy, S. V., Kovalevska, O. S., & Pylypenko, O. O. (2022). Mahnitorezonansna obrobka metalovykh nemahnitnykh zrazkiv materialiv. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2022): Матеріали тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції (Том 2, с. 46-47). Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. Доступно на: <https://conference-chemihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-1-46-47.pdf>*.
4. Andersen, R., Napoleone, A., Andersen, A.-L., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. (2024). A systematic methodology for changeable and reconfigurable

- manufacturing systems development. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 449-462. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.008>
5. Zheng, X., He, Y., Liao, R., & Yu, S. (2024). Reliability oriented key quality characteristics driven integrated built-in reliability activity chain and approach for manufacturing process. *Computers & Industrial Engineering*, 191, Article 110166. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110166>.
 6. Nguyen, H. N., Nguyen, H. H., & Nguyen, H. L. (2023). Recent developments in hard magnetic nanostructured materials. In A. S. M. A. Haseeb (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Electronics* (pp. 803-819). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819728-8.00098-X>
 7. Sola, A., Trinchì, A., & Hill, A. J. (2023). Self-assembly meets additive manufacturing: Bridging the gap between nanoscale arrangement of matter and macroscale fabrication. *Smart Materials in Manufacturing*, 1, Article 100013. <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2022.100013>
 8. Qayyum, F., Umar, M., Dölling, J., Guk, S., & Prah, U. (2024). 3.03 - Mechanics of new-generation metals and alloys. In V. Silberschmidt (Ed.), *Comprehensive Mechanics of Materials (First Edition)*, pp. 31-57. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90646-3.00020-4>.
 9. Martín, P., Aguilar, C., & Cabrera, J. M. (2024). A review on mechanical alloying and spark plasma sintering of refractory high-entropy alloys: Challenges, microstructures, and mechanical behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 1900-1928. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.205>.
 10. Lambiase, F., Balle, F., Blaga, L.-A., Liu, F., & Amancio-Filho, S. T. (2021). Friction-based processes for hybrid multi-material joining. *Composite Structures*, 266, Article 113828. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113828>.
 11. Sypniewska-Kamińska, G., Awrejcewicz, J., & Mazur, O. (2024). Analysis of resonant/nonresonant vibrations of simply-supported Kirchhoff nanoplates under in-plane magnetic field based on a strongly coupled two-mode model. *Thin-Walled Structures*, 199, Article 111832. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111832>.
 12. Vidal, J. V., Carneiro, P. M. R., & Soares dos Santos, M. P. (2024). A complete physical 3D model from first principles of vibrational-powered electromagnetic generators. *Applied Energy*, 357, Article 122387. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122387>.

Поступила (received) 06.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Ковалевський Сергій Вадимович (Sergiy Kovalevskyi) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>; тел.: (050)-478-03-94; e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Ковалевська Олена Сергіївна (Olena Kovalevska) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5884-0430>; тел.: (095)-159-50-37; e-mail: olenakovalevska@gmail.com.

Сидюк Дар'я Миколаївна (Daria Sydiuk) – аспірантка кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ-Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0516-6694>; тел. (095)-290—33-03; e-mail: sidyukdarija@gmail.com.