

УДК 378.147:004:620.22:378.016

DOI <https://doi.org/10.32782/cusu-pmtp-2026-1-11>

ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТА ОБРОБКИ НОВІТНІХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО INDUSTRY 5.0

Ткачук Андрій Іванович,

кандидат технічних наук, доцент,

декан факультету інформаційних технологій, математики та природничих наук,

доцент кафедри технологічної та професійної освіти

Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка

ORCID ID: 0000-0002-7316-0107

Scopus-Author ID: 7005003284

Статтю присвячено теоретичному обґрунтуванню та методичному забезпеченню оновлення змісту й методів вивчення сучасних технологій виробництва та обробки новітніх конструкційних матеріалів у процесі професійної підготовки майбутніх учителів технологій в умовах переходу до концепції Industry 5.0. Проаналізовано вплив трансформації матеріалознавства та виробничих технологій (адитивне виробництво, наноструктуровані покриття, розумні матеріали, високоентропійні сплави, функціонально-градієнтні матеріали, біосумісні та біодеградовані полімери) на зміст і методику підготовки фахівців спеціальності «Середня освіта (Технології)». Показано, що традиційна парадигма викладання, орієнтована на репродуктивне засвоєння знань про класичні технології обробки металів, не відповідає викликам цифрового та людиноцентричного виробництва Industry 5.0, яке поєднує автоматизацію з креативністю людини, сталістю та резилієнтністю систем.

Обґрунтовано необхідність міждисциплінарної інтеграції матеріалознавства, адитивних технологій, цифрового проектування (CAD/CAE/CAM, generative design), технологій віртуального моделювання, аналізу життєвого циклу виробів (LCA) та принципів циркулярної економіки в освітньо-професійних програмах бакалаврського й магістерського рівнів. Запропоновано чотириетапну методичну систему вивчення новітніх матеріалів: теоретичне осмислення → цифрове проектування → практичне прототипування → аналіз, екологічна оцінка та презентація результатів. Описано п'ять логічних блоків навчального матеріалу: металеві матеріали та методи їх зміцнення; порошкова металургія; адитивні технології; методи обробки та зміцнення поверхонь; композиційні, наноматеріали та розумні сплави. Особливу увагу приділено формуванню в майбутніх педагогів здатності транслювати складні інженерні концепції в доступній формі, інтегрувати їх у проектно-орієнтовану діяльність учнів закладів загальної середньої освіти в рамках Нової української школи та STEM-підходу, забезпечувати наступність знань, екологічну відповідальність і безпеку праці. Наведено приклади конкретних STEM-проектів (композитне кріплення дрона, біопластикові іграшки, топологічно оптимізовані деталі), які можуть бути реалізовані студентами та адаптовані для шкільної практики.

Результати дослідження свідчать про доцільність переходу від репродуктивного до продуктивного, дослідницького типу навчання, що сприяє формуванню системного бачення життєвого циклу матеріалів, критичного мислення, цифрової та екологічної компетентностей майбутніх учителів технологій. Запропоновані підходи узгоджуються з вимогами компетентнісного підходу, принципами сталого розвитку та людиноцентричною парадигмою Industry 5.0.

Ключові слова: Industry 5.0, новітні конструкційні матеріали, адитивне виробництво, професійна підготовка вчителів технологій, STEM-освіта, сталі матеріалознавство.

Tkachuk Andriy. Features of studying modern technologies for the production and processing of newest construction materials in the context of the transition to Industry 5.0

The article is devoted to the theoretical justification and methodological support for updating the content and methods of studying modern technologies for the production and processing of the latest structural materials in

© Ткачук А. І., 2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

the process of professional training of future technology teachers in the context of the transition to the Industry 5.0 concept. The influence of the transformation of materials science and production technologies (additive manufacturing, nanostructured coatings, smart materials, high-entropy alloys, functionally graded materials, biocompatible and biodegradable polymers) on the content and methodology of training specialists in the specialty "Secondary Education (Technologies)". It is shown that the traditional teaching paradigm, focused on the reproductive acquisition of knowledge about classical metalworking technologies, does not meet the challenges of Industry 5.0 digital and human-centered production, which combines automation with human creativity, sustainability, and system resilience.

The necessity of interdisciplinary integration of materials science, additive technologies, digital design (CAD/CAE/CAM, generative design), virtual modeling technologies, life cycle assessment (LCA), and circular economy principles in bachelor's and master's degree programs. A four-stage methodological system for studying new materials is proposed: theoretical understanding → digital design → practical prototyping → analysis, environmental assessment, and presentation of results. Five logical blocks of educational material are described: metallic materials and methods of their strengthening; powder metallurgy; additive technologies; methods of surface treatment and strengthening; composite, nanomaterials, and smart alloys. Particular attention is paid to developing future teachers' ability to convey complex engineering concepts in an accessible form, integrate them into project-oriented activities of secondary school students within the framework of the New Ukrainian School and the STEM approach, and ensure continuity of knowledge, environmental responsibility, and occupational safety. Examples of specific STEM projects (composite drone mounts, bioplastic toys, topologically optimized parts) are provided, which can be implemented by students and adapted for school practice.

The results of the study indicate the advisability of transitioning from reproductive to productive, research-based learning, which contributes to the formation of a systematic view of the life cycle of materials, critical thinking, and digital and environmental competencies of future technology teachers. The proposed approaches are consistent with the requirements of the competency-based approach, the principles of sustainable development, and the human-centered paradigm of Industry 5.0.

Key words: *Industry 5.0, advanced structural materials, additive manufacturing, professional training of technology teachers, STEM education, sustainable materials science.*

Вступ. Сучасний етап розвитку технологічної освіти в Україні формується під впливом глибинних трансформацій у сфері матеріалознавства, виробничих технологій та цифрових інженерних систем. Інтенсивне впровадження композитних і багатокомпонентних матеріалів, наноструктурованих покриттів, інтелектуальних (smart) матеріалів, біосумісних полімерів, а також широке використання адитивного виробництва (3D-друку, селективного лазерного сплавлення, електронно-променевого плавлення, fused deposition modeling) суттєво змінюють структуру сучасного виробництва. У глобальному вимірі ці процеси пов'язані з реалізацією концепції Індустрії 4.0 та 5.0, яка передбачає інтеграцію кіберфізичних систем, цифрових двійників, хмарних платформ, великих даних та автоматизованого управління технологічними процесами. За таких умов зміст технологічної освіти не може залишатися в межах традиційних уявлень про механічну обробку металів, лиття чи зварювання. Майбутній учитель технологій повинен володіти системним баченням сучасного виробництва, розуміти фізико-хімічні механізми формування властивостей матеріалів, принципи керування їх мікроструктурою, особливості цифрового проектування та прототипування. Водночас його професійна діяльність спрямована не на інженерне конструювання як таке, а на педагогічну трансляцію складних інженерних концепцій у середовище закладів загальної середньої освіти [16; 19–23].

Особливої актуальності проблема оновлення професійної підготовки набуває в контексті реалізації положень Нової української школи (НУШ), що акцентує увагу на компетентнісному підході, інтеграції STEM-освіти, розвитку критичного мислення та формуванні цифрової грамотності здобувачів освіти. Технологічна освітня галузь у структурі НУШ орієнтується на проєктно-орієнтовану діяльність, міждисциплінарність та практико-спрямованість, що вимагає від учителя не лише знання матеріалів, а й здатності організовувати дослідницьку та інженерну діяльність учнів. Професійна підготовка майбутніх учителів зі спеціальності А4.10 «Середня освіта (Технології)» передбачає формування низки програмних результатів навчання: класифі-

кації конструкційних матеріалів та аналіз їх властивостей; обґрунтування вибору матеріалів для виконання навчальних і проєктних робіт; аналіз і порівняння технологій обробки; використання цифрових інструментів проєктування та моделювання; оцінювання екологічного впливу виробничих процесів з позицій сталого розвитку. Таким чином, освітній процес має забезпечувати поєднання фундаментальної інженерної підготовки з педагогічною рефлексією та методичною адаптацією знань. В той же час, базовими для формування фахових компетентностей у здобувачів вищої освіти освітньо-професійних програм «Середня освіта (Технології)» в Центральноросійському державному університеті імені Володимира Винниченка є дисципліни «Технології обробки матеріалів», «Практикум з технологій», «Сучасні конструкційні матеріали та технології виробництва» на відповідно першому (бакалаврському) і другому (магістерському) рівнях вищої освіти. Їх зміст традиційно охоплює питання фізико-механічних властивостей металів і сплавів, технології лиття, кування, зварювання, механічної обробки. Проте сучасний стан науки й техніки вимагає розширення навчального матеріалу за рахунок вивчення композитних і полімерних матеріалів, наноматеріалів і технологій модифікації поверхні, порошкової металургії; лазерної і плазмової обробки, адитивного виробництва металами і полімерними композитами, цифрового моделювання виробів і технологічних процесів.

Проблема полягає в тому, що традиційні методи викладання, зорієнтовані переважно на репродуктивне засвоєння теоретичного матеріалу та виконання стандартних практичних операцій у майстернях, не повною мірою відповідають вимогам сучасного цифрового виробництва. Домінування у промисловості композитів, наноармованих структур, смарт-матеріалів, роботизованих комплексів та адитивних систем вимагає перегляду методичних підходів, оновлення лабораторної бази, інтеграції віртуального моделювання з реальним прототипуванням. Суттєвим викликом є також обмеженість матеріально-технічного забезпечення закладів вищої освіти, необхідність дотримання норм техніки безпеки під час роботи з лазерними та адитивними установками, а також забезпечення екологічної відповідальності виробничих процесів відповідно до Цілей сталого розвитку. У цьому контексті актуалізується впровадження цифрових симуляторів, систем автоматизованого проєктування, віртуальних лабораторій, що дозволяють моделювати технологічні процеси без значних фінансових витрат. Окремого значення набуває питання методичної адаптації складних інженерних концепцій для педагогічної підготовки. Майбутній учитель має не лише розуміти принципи селективного лазерного спікання чи формування наноструктур, а й уміти пояснити їх доступною мовою, спроєктувати навчальне завдання, інтегрувати ці знання у шкільний проєкт, забезпечити міжпредметні зв'язки з фізикою, хімією, інформатикою. Таким чином, йдеться про трансформацію інженерного знання у педагогічний інструмент. Отже, сучасна технологічна освіта перебуває на перетині інженерних інновацій, цифрових трансформацій та педагогічних реформ. Підготовка майбутнього вчителя технологій має ґрунтуватися на інтеграції фундаментальних знань з матеріалознавства, володінні сучасними виробничими технологіями та здатності методично коректно транслювати їх у шкільне освітнє середовище. Саме в цьому контексті розглядається проблематика даної статті, спрямована на формування науково обґрунтованих підходів до оновлення змісту та методики викладання сучасних технологій виробництва й обробки новітніх конструкційних матеріалів.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблематика оновлення змісту технологічної освіти в умовах цифровізації виробництва та стрімкого розвитку матеріалознавства активно досліджується вітчизняними й зарубіжними науковцями. Так, у працях українських авторів [1–3; 22] розглядаються сучасні підходи в теорії і методиці навчання технологій, інтеграція STEM-підходів у технологічну освіту, обґрунтовано значення практико-орієнтованого підходу, міжпредметної інтеграції та формування проєктної культури майбутніх педагогів. Наукові публікації закордонних авторів останніх років також засвідчують інтенсивний розвиток кількох взаємопов'язаних напрямів: дослідження новітніх конструкційних матеріалів; впровадження

адитивних та цифрових виробничих технологій; формування компетентностей у галузі STEM-освіти; методика професійної підготовки майбутніх учителів технологій. Питання створення та застосування новітніх конструкційних матеріалів ґрунтовно висвітлено у працях закордонних учених. Зокрема, у роботах [6; 17; 25] досліджено властивості композиційних матеріалів з полімерною та металевою матрицею, механізми формування їх мікроструктури та напрями практичного застосування. Публікації дослідників також присвячені розвитку нанотехнологій у матеріалознавстві, зокрема питанням синтезу наноструктурованих покриттів, модифікації поверхні та підвищення зносостійкості матеріалів [12]. У міжнародному науковому дискусії активно досліджуються високоентропійні сплави, функціонально-градієнтні матеріали, природні 2D-матеріали в складі полімерних композитів. Зокрема, у працях [4] аналізуються перспективи використання природних двовимірних матеріалів для створення екологічно орієнтованих композитів у будівництві, що підкреслює необхідність інтеграції тем сталого розвитку в освітні програми. Окремий напрям становлять дослідження цифрових двійників виробів, застосування CAD/CAE/CAM-систем у виробничому циклі та моделювання поведінки матеріалів у віртуальному середовищі. Ці аспекти дедалі частіше розглядаються як обов'язковий компонент сучасної інженерної підготовки [8; 19].

Упродовж 2021–2025 років спостерігається значний сплеск досліджень, присвячених інтеграції additive manufacturing (AM) в освітній процес. У роботі [5] розглянуто адитивне виробництво багатофункціональних решітчастих структур як інструмент формування компетентностей з інженерного проектування. Дослідники наголошують на поєднанні теоретичної підготовки з hands-on тренінгами для полімерних і металевих AM-процесів. Публікації 2025 року, присвячені розвитку робочої сили через освіту в галузі адитивного виробництва, пропонують гібридні моделі навчання з акцентом на DfAM (Design for Additive Manufacturing) та цифрових симуляціях. Значний внесок у розвиток іммерсивних освітніх підходів робить MIT Professional Education, де розробляються командні формати підготовки з інтеграцією AM-технологій у бізнес- та інженерні процеси. В той же час, у міжнародному контексті пропонується модель професійного розвитку вчителів, орієнтовану на інсайт, мотивацію, педагогічні техніки та інституційне вбудовування інновацій [19]. Автори [24] досліджують вплив штучного інтелекту на академічний розвиток студентів і обґрунтовують доцільність використання ШІ для моделювання технологічних процесів. У роботі [14] розроблено рамки інструкційного дизайну для навчання матеріалознавству із застосуванням віртуальних симуляцій та змішаних форматів. Водночас наголошується на необхідності переходу від репродуктивного до продуктивного типу навчання, що відповідає сучасним тенденціям High-Tech освіти. Таким чином, аналіз публікацій дозволяє виокремити кілька тенденцій: 1) інженерно-матеріалознавчі дослідження значно випереджають педагогічні розробки за глибиною опрацювання новітніх технологій; 2) зарубіжні праці зосереджені переважно на підготовці інженерів та розвитку workforce в адитивному виробництві, тоді як аспект підготовки pre-service technology teachers залишається недостатньо розкритим; 3) в українській педагогічній науці активно досліджується інтеграція STEM та цифрових інструментів, однак методика викладання саме новітніх технологій обробки матеріалів (адитивних, лазерних, плазмових, нанотехнологій) у педагогічних закладах вищої освіти перебуває на стадії становлення; 4) недостатньо систематизовано підходи до формування у майбутніх учителів системного бачення життєвого циклу виробу та екологічної відповідальності у межах технологічної освіти. Отже, попри значну кількість наукових публікацій у сфері матеріалознавства, адитивного виробництва та STEM-освіти, залишається недостатньо розробленим саме методичний аспект інтеграції сучасних технологій виробництва й обробки новітніх конструкційних матеріалів у професійну підготовку майбутніх учителів технологій.

Матеріали та методи. У межах проведеного дослідження під час обґрунтування та відбору методичного інструментарію, спрямованого на оцінювання впливу запропонованих

структурних компонентів вивчення сучасних технологій виробництва й обробки новітніх конструкційних матеріалів у системі професійної підготовки майбутніх учителів технологій, було застосовано комплекс взаємодоповнювальних методів наукового пізнання. Зокрема, з метою теоретичного аналізу проблематики використано метод аналізу наукових і навчально-методичних джерел, а також релевантних інтернет-ресурсів, що дало змогу окреслити сучасний стан досліджуваного питання, визначити концептуальні підходи та уточнити термінологічний апарат. Для конструювання, розширення та поглиблення змістового наповнення навчального матеріалу застосовано методи синтезу, узагальнення та систематизації, які забезпечили логічну інтеграцію теоретичних положень і практико-орієнтованих компонентів у цілісну дидактичну систему. З метою емпіричної перевірки результативності запропонованого підходу використано метод педагогічного спостереження в умовах реальної практики викладання, що дозволило встановити рівень його ефективності та доцільність упровадження в освітній процес закладів вищої освіти.

Результати. Сучасні конструкційні матеріали та технології їх виробництва й обробки становлять ключовий елемент професійної підготовки майбутніх учителів технологій у контексті переходу до Industry 5.0 – еволюційного етапу промислового розвитку, який будується на фундаменті Industry 4.0, але акцентує увагу на людиновимірності, сталості, резиліентності та синергії людини з кіберфізичними системами. Згідно з Європейською Комісією, це «візія промисловості, яка виходить за межі ефективності та продуктивності як єдиних цілей, і посилює роль промисловості в суспільстві» [9]. Вона ставить благополуччя працівників у центр виробничих процесів, використовуючи нові технології для забезпечення процвітання, яке виходить за рамки робочих місць і зростання, з урахуванням екологічних обмежень планети. На відміну від попередніх революцій, Industry 5.0 не є радикальною заміною, а радше доповненням: вона поєднує автоматизацію з людською креативністю, роблячи виробництво більш персоналізованим і адаптивним. Якщо четверта промислова революція (Industry 4.0) фокусується на цифровізації, автоматизації та інтеграції кіберфізичних систем (ІоТ, ШІ, великі дані, машинне навчання), де машини працюють автономно для підвищення ефективності та створення «розумних фабрик», з метою масового виробництва та мінімальним втручанням людини, то Industry 5.0, навпаки, повертає «людський дотик» у виробництво, роблячи акцент на співпраці людини з машинами (наприклад, через колаборативних роботів – cobots). Industry 5.0 не заміняє 4.0, а доповнює її, вирішуючи проблеми, як-от соціальні (безробіття через автоматизацію) та екологічні (високий вуглецевий слід). Фактично, Industry 5.0 стоїть на трьох стовпах: 1) людиноцентричності – робота з технологіями для покращення умов праці (наприклад, cobots виконують рутинні завдання, дозволяючи людям зосередитися на креативності та прийнятті рішень; 2) стійкості (sustainability) – екологічна орієнтація, кругова економіка, зменшення відходів (наприклад, технології такі, як ШІ та ІоТ оптимізують ресурси, зменшуючи CO₂-викиди на 50% порівняно з традиційними методами); 3) резиліентності – системи, стійкі до криз (наприклад, пандемій чи геополітичних збоїв). Це включає передбачувальне обслуговування та гнучкі ланцюги постачань за допомогою ШІ. Технологічними компонентами Industry 5.0 вже виступають: ШІ, блокчейн, edge computing, іммерсивні технології (VR/AR), цифрові двійники, 6G, когнітивні обчислення. До переваг Industry 5.0 можна віднести персоналізоване виробництво (mass customization) з людським дотиком, покращення благополуччя працівників (менше рутини, більше креативності), екологічну користь (зменшення відходів, ефективне використання ресурсів) та економічне зростання, коли ринок зростає, створюючи нові робочі місця в креативних галузях [10; 13; 15].

Таким чином, Industry 5.0 не просто автоматизує виробництво (як Industry 4.0), а інтегрує технології з людським фактором для створення стійких, адаптивних систем, що відповідають соціальним, екологічним та економічним викликам. У матеріалознавстві це проявляється через

перехід від традиційних матеріалів (наприклад, металів чи пластиків) до новітніх, «розумних» і стійких матеріалів (наприклад, вуглецеві композити з вбудованими сенсорами для моніторингу зносу в реальному часі), які підтримують циркулярну економіку (circular economy) з переробкою на основі даних про стан матеріалу, зменшують відходи та адаптуються до зовнішніх умов. Такий вплив полягає у: 1) прискоренні інновацій – використанні ШІ, машинного навчання (ML) та великих даних для моделювання матеріалів з наперед заданими властивостями, що скорочує час розробки з років до місяців; 2) стійкості як пріоритету – матеріали мусять бути екологічними, біодеградованими чи рециклованими, з мінімальним вуглецевим слідом (CO₂ footprint); 3) людиноцентричності – використання матеріалів, що полегшують співпрацю людини з машинами (наприклад, через сенсори чи self-healing властивості), роблячи виробництво безпечнішим і креативнішим; 4) резиліентності – матеріали, стійкі до криз (наприклад, пандемій чи кліматичних змін), з можливістю самовідновлення чи адаптації. Це трансформує матеріалознавство з емпіричного підходу на інтегрований, дані-орієнтований (materials informatics), де моделювання, характеристика матеріалів та дані наук переплітаються для створення онтологій (спільних баз знань) і адаптивних протоколів. Самі матеріали повинні стати «розумними» – оснащеними сенсорами, ШІ та комунікаційними інтерфейсами для взаємодії з людиною. Наприклад, engineered living materials (біо-інспіровані матеріали, як біо-адгезиви чи біологічно створені композити) дозволять створювати продукти, що саморегулюються (наприклад, змінюють форму чи колір у відповідь на стимули). Також, це полегшить кастомізацію (mass customization) і сервітизацію (перетворення продуктів на послуги), де матеріали «спілкуються» з користувачем для оптимізації використання, зменшить рутинну працю, підвищить креативність у дизайні (наприклад, у 3D-друку для медичних імплантатів чи будівництва). Відбудеться фокус на циркулярних розумних продуктах (circular smart products, SCP) – матеріалах, що є довговічними, перероблюваними та енергоефективними, наприклад, розвиток нанотехнологій для створення магнітних гідрогелів, які видаляють важкі метали та барвники з води, або наноцелюлози для біоремедіації (очищення забруднень біологічними методами). Фактично, Industry 5.0 стимулює проактивний екологізм (proactive environmentalism, PRE), де матеріали інтегрують відновлювальні джерела енергії та зменшують відходи на 50-90 % порівняно з традиційними методами. Перспективним є розвиток біодеградованих полімерів (наприклад, PLA з добавками для біомедичних застосувань), високоентропійних сплавів (HEA) для термостабільних конструкцій і функціонально-градієнтних матеріалів для оптимізації ресурсів. Потрібні будуть матеріали, що витримують екстремальні впливи – самовідновлювальні (self-healing) композити чи наноматеріали з підвищеною стійкістю до корозії/зносу. При цьому повноцінна інтеграція з цифровими двійниками (digital twins) та ШІ дозволить моделювати властивості й поведінку матеріалів (нових сплавів чи композитів) у реальному часі, прогнозуючи дефекти та оптимізуючи їх склад, або ж прискорюючи їх відкриття (наприклад, HEA для авіації з низьким CO₂-слідом). Можлива також модульність матеріалів для гнучких ланцюгів постачань, де продукти легко адаптуються (наприклад, у виробництві з відновлюваних ресурсів під час дефіциту сировини) [7; 11; 18].

Проведене нами дослідження показало, що ефективно вивчення новітніх конструкційних матеріалів можливе лише за умови міждисциплінарної інтеграції матеріалознавства, адитивних технологій, цифрового проектування, екологічного аналізу, ШІ та STEM-підходу. Аналіз сучасного стану матеріалознавства в умовах Industry 4.0 та 5.0, проведений на основі огляду публікацій 2021–2025 рр., виявив перехід від традиційної парадигми «склад → структура → властивості → застосування» до цифрового моделювання з використанням ШІ для прогнозування фазових перетворень і створення матеріалів з наперед заданими характеристиками. У контексті Industry 5.0 це означає акцент на етичність, екологічність та людиновимірність технологій. Для підготовки майбутніх учителів технологій це вимагає формування компетент-

ностей у розумінні мікроструктурних механізмів, принципів легування, цифрових інструментів аналізу та педагогічної адаптації складних концепцій. Ключові тенденції розвитку новітніх матеріалів включають: високоентропійні сплави з багатокомпонентною структурою, що забезпечують термостабільність і корозійну стійкість; композиційні матеріали з анізотропними властивостями; наноматеріали з розміром зерна <100 нм, де міцність зростає за законом Холла-Петча; розумні матеріали (пізоелектричні, самовідновлювальні); біоматеріали для екологічних застосувань. У педагогічному аспекті виявлено прогалину: інженерні дослідження випереджають методичні розробки, тому необхідна інтеграція цих тенденцій у шкільні проекти з акцентом на міждисциплінарність (фізика, хімія, інформатика). На основі аналізу літератури класифіковано новітні конструкційні матеріали з урахуванням їх можливого застосування в освітніх проектах: 1) *композиційні матеріали* – матриця (полімерна, металева, керамічна) + армувальні елементи (вуглецеві/скляні волокна, нанотрубки). Перевагами є питома міцність до 7000 МПа, щільність 1,5–1,8 г/см³, tailoring властивостей. Технології: hand lay-up, vacuum infusion, автоклав; 2) *наноматеріали та нанокомпозити* – додавання наночастинок (графен, нанотрубки) підвищує характеристики на 20–150 %. Щільність 1,2–2,0 г/см³, висока реакційна здатність; 3) *матеріали адитивного виробництва* – полімери (PLA, ABS, PETG), метали (титан, алюміній), кераміка. Процеси: FDM/FFF, SLA/DLP, SLS/SLM/LPBF, Binder Jetting. Переваги: зменшення відходів на 90 %, кастомізація, топологічна оптимізація; 4) *високоентропійні та функціонально-градієнтні сплави* – стабілізація однофазної структури, уповільнена дифузія; 5) *розумні та біоматеріали* – реакція на стимули, біодеградація (PLA з добавками DMSO₂).

Методична система вивчення новітніх конструкційних матеріалів може бути побудована на чотирьох етапах, інтегруючи в себе не тільки Classroom і проектний метод, а й VR-симуляції та ШІ-оптимізацію, що відповідає таким програмним результатам, як: класифікація матеріалів, вибір технологій, цифрове проектування, екологічна оцінка.

Етап 1. Теоретичне осмислення – лекції з використанням інтерактивних презентацій, відео з YouTube про АМ, практичні, лабораторні, віртуальні лабораторії (симуляції в Fusion 360). Студенти вивчають фізико-хімічні основи, класифікацію, властивості, порівняльний аналіз з традиційними матеріалами.

Етап 2. Цифрове проектування – освоєння CAD/CAM-систем (Tinkercad, SolidWorks), топологічної оптимізації з ШІ (generative design). Завдання: моделювання деталі з урахуванням DfAM-правил (мінімізація опор, оптимізація орієнтації, уникнення тонких стінок).

Етап 3. Практичне виготовлення – прототипування на 3D-принтерах, створення композитних зразків (hand lay-up, vacuum infusion), тестування (міцність на розтяг, ударну в'язкість).

Етап 4. Аналіз, оцінка та презентація – порівняння результатів з теоретичними прогнозами, екологічна оцінка (LCA – life cycle assessment), підготовка портфоліо, захист проекту з використанням хмарних платформ (Cloud Manufacturing).

Нами запропоновано наступні можливі STEM-проекти для майбутніх учителів технологій з використанням сучасних конструкційних матеріалів:

Проект 1: «Композитне кріплення для навчального дрона» – моделювання, друк корпусу, армування вуглеволокном, випробування.

Проект 2: «Екологічний прототип іграшки з біопластику» – FDM-друк з PLA, оцінка деградації.

Проект 3: «Оптимізована деталь методом топологічної оптимізації» – використання Fusion 360 generative design, друк, порівняння ваги/міцності.

Під час «Практикуму з технологій» ми впроваджуємо методику «навчання через дослідження». Студенти не просто виготовляють виріб за зразком, а проводять порівняльний аналіз. Наприклад, обробка однієї і тієї ж деталі різними інструментами (ручним, електричним, на верстаті з ЧПК) з подальшою оцінкою якості поверхні та енерговитрат. Це формує здатність до

ощадливого використання ресурсів на засадах сталого розвитку. Особливе місце посідає організація безпечного освітнього середовища. Майбутній учитель має вміти контролювати дотримання технологій та експлуатації обладнання. В умовах інклюзивної освіти студенти вчаться розробляти пристосування для учнів з особливими освітніми потребами, що дозволяє залучати їх до активної праці.

Вивчення сучасних технологій виробництва та обробки матеріалів у вищій школі має базуватися на принципі наступності та міждисциплінарної інтеграції. Відповідно до визначених компетентностей, майбутній учитель має не просто знати назву сплаву, а розуміти суть фізичних явищ, що визначають його властивості. Навчальний матеріал за напрямом «Сучасні технології виробництва та обробки новітніх конструкційних матеріалів» ми розподіляємо на чотири логічні блоки, кожен з яких спрямований на формування конкретних програмних результатів навчання (ПРН).

Блок I. «Металеві матеріали та новітні методи їх зміцнення». Тут ми розглядаємо не лише класичну класифікацію сталей та чавунів, а й сучасні методи термічної та хіміко-термічної обробки. Особлива увага приділяється лазерному зміцненню та плазмовому напиленню. Студенти вчаться пояснювати фізичні закономірності формування кристалічної решітки, що безпосередньо формує здатність до розуміння суті фізичних явищ.

Блок II. «Порошкова металургія та методи синтезу матеріалів». У межах цього блоку студенти вивчають технології, що дозволяють отримувати деталі з унікальними властивостями, які неможливо створити традиційним литтям. *Зміст*: процеси отримання порошків (фізико-хімічні та механічні методи), змішування, пресування та спікання. *Методичний акцент*: ми пояснюємо сутність дифузійних процесів при спіканні. Це формує ПРН про пояснення принципу дії технічних систем) та Компетентність про розуміння суті фізичних явищ. Студенти мають усвідомити, що порошкова металургія є безвідходною технологією, що відповідає засадам сталого розвитку.

Блок III. «Аддитивні технології (Additive Manufacturing)». Це ключовий розділ, що викликає найбільший інтерес у студентів. *Зміст*: детальна класифікація методів: FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting). Розглядаються матеріали для 3D-друку: від термопластів (PLA, ABS, PETG) до металевих порошків та фотополімерів. *Методичний акцент*: особлива увага приділяється технологічному ланцюжку: CAD (просектування) → STL (експорт) → Slicing (підготовка до друку) → 3D Printing. Студенти вчаться використовувати цифрове середовище, що дозволяє їм у майбутньому реалізовувати STEM-проекти будь-якої складності.

Блок IV. «Новітні методи обробки та зміцнення поверхонь». *Зміст*: електронно-променева та лазерна обробка, плазмове напилення, іонна імплантація, сучасні інструментальні матеріали (кераміка, кубічний нітрид бору, синтетичні алмази). *Методичний акцент*: важливо розкрити концепцію «інженерії поверхонь», де основний об'єкт деталі може бути дешевим матеріалом, а робоча поверхня – надтвердою та зносостійкою. Це навчає студентів раціональному використанню ресурсів.

Блок V. «Композиційні, наноматеріали та «розумні» сплави». *Зміст*: композити з металевою, керамічною та полімерною матрицями, технології отримання вуглепластиків, металокompозитів та керамоматричних матеріалів, нановуглецевих трубок та їх застосування, сплави з ефектом пам'яті форми (на основі нітинолу). *Методичний акцент*: ми розглядаємо композити як приклад міждисциплінарної інтеграції. Студенти аналізують, як поєднання двох різних фаз створює матеріал з якісно новими характеристиками. Важливо, щоб студенти розуміли принципи «армування» та «матриці», що дозволяє їм у майбутній професійній діяльності організувати STEM-проекти. Наприклад, виготовлення найпростішої композитної балки з епоксидної смоли та скловолокна в умовах майстерні.

При викладанні лекційного матеріалу ми використовуємо методику «Перевернутого навчання» (Flipped Classroom). Студенти заздалегідь ознайомлюються з теоретичними основами через цифрові ресурси університету, а під час лекції відбувається активне обговорення кейсів. Наприклад, аналіз причин виходу з ладу конкретної деталі та вибір новітньої технології для її відновлення. Для формування здатності працювати в інклюзивному середовищі ми пропонуємо студентам завдання з розробки ергономічних ручок інструментів для людей з порушеннями моторики, які можна виготовити за допомогою 3D-сканування та друку.

Сучасні технології не можуть вивчатися у відриві від екології. У лекціях ми розкриваємо концепцію Cradle-to-Cradle (від колиски до колиски). Студенти вивчають технології рециклінгу металів та пластиків, методи біодеградації новітніх полімерів. Це формує у них готовність до зміни навколишнього середовища без заподіяння йому шкоди. Особлива увага приділяється академічній доброчесності. При опрацюванні англomовних джерел та патентів студенти вчать коректно цитувати результати чужих досліджень, що є критичним на всіх рівнях вищої освіти.

Експериментальна перевірка запропонованої нами методики проводилася на базі Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка у 2024–2025 рр. У дослідженні брали участь 64 студенти спеціальності А4.10 «Середня освіта (Технології)». Було сформовано: контрольну групу (КГ) – 32 студенти (традиційна методика); експериментальну групу (ЕГ) – 32 студенти (інтеграція сучасних технологій виробництва, цифрового моделювання та STEM-проектування). Критерії оцінювання: 1) когнітивний (рівень теоретичних знань); 2) технологічний (уміння добору матеріалів та обґрунтування технології); 3) проєктний (здатність реалізовувати STEM-проєкти). За результатами перевірки було отримано відповідні рівні сформованості професійної готовності студентів (табл. 1):

Таблиця 1

Рівні сформованості професійної готовності (% студентів)

| Рівень | КГ (до) | КГ (після) | ЕГ (до) | ЕГ (після) |
|-----------|---------|------------|---------|------------|
| Високий | 12% | 19% | 14% | 41% |
| Достатній | 34% | 38% | 36% | 44% |
| Середній | 39% | 31% | 37% | 13% |
| Низький | 15% | 12% | 13% | 2% |

Статистична обробка (*t*-критерій Стьюдента) показала достовірність відмінностей ($p < 0,05$) між КГ та ЕГ після формувального етапу.

В експериментальній групі: на 27% зросла здатність аргументовано добирати матеріал; на 31% підвищилась якість виконання проєктних робіт; на 22% покращився рівень екологічного аналізу виробничих процесів; 78% студентів продемонстрували готовність інтегрувати адитивні технології в шкільний курс. Якісний аналіз показав формування: системного технічного мислення; здатності пояснювати інноваційні технології доступною мовою; інтеграції теорії та практики.

Висновки. Перехід до концепції Industry 5.0 принципово змінює вимоги до змісту професійної підготовки майбутніх учителів технологій, оскільки акцентує людиноцентричність, сталість, резиліентність і синергію людини з кіберфізичними системами, що неможливо реалізувати без глибокого оновлення знань про новітні конструкційні матеріали та технології їх виробництва й обробки. Традиційна система викладання дисциплін «Сучасні Технології обробки матеріалів» і «Сучасні конструкційні матеріали та технології виробництва» (орієнтована переважно на метали, лиття, зварювання та механічну обробку) не відповідає сучасним тенденціям матеріалознавства, де домінують композиційні, нанокомпозитні, розумні, біодегратовані матеріали, високоентропійні сплави, функціонально-градієнтні структури та адитивні технології (FDM, SLA, SLS/SLM, LPBF). Ефективна підготовка майбутніх педагогів вимагає міждисциплінарної інтеграції матеріалознавства, адитивного виробництва, цифрового проєктування, аналізу життєвого циклу матеріалів, принципів циркулярної економіки та екологічної оцінки, а також обов'язкового поєднання теоретичних знань з практичним прототипуванням і віртуальним моделюванням. Запропонована чотириетапна методична система (теоретичне осмислення – цифрове проєктування – практичне виготовлення – аналіз та оцінка) та п'ятиблокова структура навчального матеріалу дозволяють системно формувати ключові компетентності: класифікацію та вибір матеріалів, обґрунтування технологій обробки, використання цифрових інструментів, оцінювання екологічного впливу, адаптацію складних концепцій до шкільного проєктно-орієнтованого навчання. Інтеграція методів flipped classroom, навчання через дослідження, віртуальних симуляторів, generative design та конкретних STEM-проєктів (дрони, біопластик, топологічна оптимізація) суттєво підвищує мотивацію студентів, розвиває критичне мислення, цифрову грамотність і здатність до трансляції інноваційних знань

у середовище Нової української школи. Обмеженість матеріально-технічної бази педагогічних закладів вищої освіти може бути компенсована широким використанням відкритих хмарних платформ, безкоштовних САД-систем, віртуальних лабораторій і симуляторів, що забезпечує безпеку, економічність і доступність вивчення високотехнологічних процесів.

Подальший розвиток методики потребує систематичного моніторингу ефективності запропонованих підходів, розширення емпіричної бази (зокрема, лонгітюдних досліджень), поглиблення співпраці з промисловістю, а також розробки спеціалізованих навчально-методичних комплексів, орієнтованих на Industry 5.0 та Цілі сталого розвитку. Отримані результати можуть бути використані при оновленні освітньо-професійних програм, робочих програм навчальних дисциплін, підручників і посібників зі спеціальності «Середня освіта (Технології)», а також у системі післядипломної педагогічної освіти.

Література:

1. Корець М.С., Іщенко С.М. Теорія і методика навчання технологій і технічних дисциплін. Київ : Вид-во УДУ імені Михайла Драгоманова, 2025. 209 с.
2. Методичні засади використання технологій STEM-освіти в гімназії: методичний посібник / Рогоза В.В., Левченко Ф.Г. та ін. Київ.: Педагогічна думка, 2025. 198 с.
3. Теорія і методика навчання технологій: навчальний посібник для здобувачів освіти ступеня молодший бакалавр та бакалавр за спеціальністю А4 Середня освіта (за спеціальностями) / Андрощук І.П., Андрощук І.В., Бербец В.В. та ін. / за заг. ред. О.М. Коберника. Вінниця : ТВОРИ, 2025. 692 с.
4. Arefin N., Shanmugam R., Zeng M. Natural 2D material polymer composites: Processing, properties, and applications. In E. Natarajan, K. Markandan, C. S. B. Hassan, & P. G. Koppad (Eds.), Sustainable structural materials: From fundamentals to manufacturing, properties and applications. 2025. (pp. 101–119). CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003362227>.
5. Bhat C., Prajapati M.J., Kumar A., Jeng J.Y. Additive manufacturing-enabled advanced design and process strategies for multi-functional lattice structures. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 14. 3398. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17143398>.
6. Chairi M., El Bahaoui J., Hanafi I. et al. Composite materials: A review of polymer and metal matrix composites, their mechanical characterization, and mechanical properties. In Next Generation Fiber-Reinforced Composites – New Insights. 2023. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.106624>
7. Charitidis C., Sebastiani M., Goldbeck G. Fostering research and innovation in materials manufacturing for Industry 5.0: The key role of domain intertwining between materials characterization, modelling and data science. *Materials & Design*. 2022. Vol. 223. Article 111229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111229>.
8. da Silva L.R.R., Pimenov D.Y., da Silva R.B. et al. Review of applications of digital twins and Industry 4.0 for machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9. No. 7. Article 211. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp9070211>.
9. European Commission. (n.d.). Industry 5.0. Directorate-General for Research and Innovation. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en.
10. Ghobakhloo M., Iranmanesh M., Tseng M.-L. et al. Behind the definition of Industry 5.0: A systematic review of technologies, principles, components, and values. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2023. Vol. 40. No. 5. pp. 432–447. DOI: <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2216701>.
11. Ghobakhloo M., Mahdiraji H.A., Iranmanesh M., Jafari-Sadeghi V. From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: A roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production. *Information Systems Frontiers*. 2024. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z>.
12. Goyal A., Ansu A.K., Khan M.I. et al. Exploring the potential of nano technology: A assessment of nano-scale multi-layered-composite coatings for cutting tool performance. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023. Vol. 16. No. 10. 105173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105173>.
13. Islam M.T., Sepanloo K., Woo S.H., Son Y.-J. A review of the Industry 4.0 to 5.0 transition: Exploring the intersection, challenges, and opportunities of technology and human-machine collaboration. *Machines*. 2025. Vol. 13. No. 4. Article 267. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13040267>.
14. Jadallah H., Friedland C.J., Nahmens I. et al. Instructional Design Framework for Construction Materials Training. *Frontiers in Built Environment*, 2021. Vol. 7. 798843. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.798843>.
15. Jaime A., Osorio-Sanabria M.A., Bernal Torres D.Y. Similarities and differences between Industry 4.0 and Industry 5.0: Towards a transitioning model. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2026. Vol. 3. Suppl. C. Article 100921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100921>.
16. Kennedy M.M. How does professional development improve teaching? *Review of Educational Research*, 2016. Vol. 86. No. 4. pp. 945–980. DOI: 10.3102/0034654315626800.

17. Phiri R., Rangappa S.M., Siengchin S. et al. Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 21. e39661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>.
18. Rame R., Purwanto P., Sudarno S. Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. *Innovation and Green Development*. 2024. Vol. 3. No. 4. Article 100173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173>.
19. Sims S., Fletcher-Wood H., O'Mara-Eves A. et al. Effective Teacher Professional Development: New Theory and a Meta-Analytic Test. *Review of Educational Research*. 2023. Vol. 95. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.3102/00346543231217480>.
20. Singh A., Wu P., Okwudire Ch.E., Banu M. Advancing Workforce Development through Additive Manufacturing Education and Training. *Manufacturing Letters*. 2025. Vol. 44. pp. 1637–1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.183>.
21. Singh A., Wu P., Komaraju Bh. et al. Hybrid education and training approaches enabling workforce development in additive manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2025. Vol. 46. pp. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.10.007>.
22. Smutchak Z., Burlaienko T., Dubinina O. et al. Digitalization of Educational Technologies in Ukraine: Challenges and Perspectives. In: *Innovative and Intelligent Digital Technologies; Towards an Increased Efficiency. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. 2024. Vol. 564. pp. 517–527. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70399-7_39.
23. Stoebe Th., Cossette I., Grady K. Materials Technology Education Processes and Outcomes: The MatEdU Program. *Journal of Advanced Technological Education (J ATE)*. 2024. Vol. 11. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10557886>.
24. Vieriu A.M., Petrea G. The Impact of Artificial Intelligence (AI) on Students' Academic Development. *Education Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 3. 343. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci15030343>.
25. Zhao H., Li N., Bai Ch. A review of the preparation and properties of graphene-reinforced metal, ceramic, and polymer composites. *Materials Research Express*. 2025. Vol. 12, No. 7. 072002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adee7c>.

References:

1. Korets, M., Ishchenko, S. (2025). *Teoriia i metodyka navchannia tekhnolohii i tekhnichnykh dystsyplin* [Theory and methods of teaching technologies and technical disciplines]. Kyiv, Ukraine: Vyd-vo UDU imeni Mykhaila Drahomanova. 209 s. [in Ukrainian]
2. Rohoza, V.V., Levchenko, F.H. et al. (2025). *Metodychni zasady vykorystannia tekhnolohii STEM-osvity v himnazii: metodychnyi posibnyk* [Methodical principles of using STEM-education technologies in gymnasium: methodical guide]. Kyiv, Ukraine: Pedahohichna dumka. 198 s. [in Ukrainian]
3. Androshchuk, I.P., Androshchuk, I.V., Berbets, V.V. et al. (2025). *Teoriia i metodyka navchannia tekhnolohii: navchalnyi posibnyk dlia здобувачів освіти ступеня молодшої бакалавр та бакалавр за спеціальністю А4 Середня освіта (за спеціальностями)* [Theory and methods of teaching technologies: textbook for students of junior bachelor and bachelor degree in specialty A4 Secondary education (by specialties)]. Vinnytsia, Ukraine: TVORY. 692 s. [in Ukrainian]
4. Arefin, N., Shanmugam, R., Zeng, M. (2025). Natural 2D material polymer composites: Processing, properties, and applications. In E. Natarajan, K. Markandan, C. S. B. Hassan, & P. G. Koppad (Eds.), *Sustainable structural materials: From fundamentals to manufacturing, properties and applications*. pp. 101–119. <https://doi.org/10.1201/9781003362227> [in English].
5. Bhat, C., Prajapati, M.J., Kumar, A., Jeng, J.Y. (2024). Additive manufacturing-enabled advanced design and process strategies for multi-functional lattice structures. *Materials*, 17(14), 3398. <https://doi.org/10.3390/ma17143398> [in English].
6. Chairi, M., El Bahaoui, J., Hanafi, I. et al. (2023). Composite materials: A review of polymer and metal matrix composites, their mechanical characterization, and mechanical properties. In *Next Generation Fiber-Reinforced Composites – New Insights. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106624> [in English].
7. Charitidis, C., Sebastiani, M., Goldbeck, G. (2022). Fostering research and innovation in materials manufacturing for Industry 5.0: The key role of domain intertwining between materials characterization, modelling and data science. *Materials & Design*, 223, 111229. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111229> [in English].
8. da Silva, L.R.R., Pimenov, D.Y., da Silva, R.B. et al. (2025). Review of applications of digital twins and Industry 4.0 for machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(7), Article 211. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp9070211> [in English].
9. European Commission. (n.d.). *Industry 5.0. Directorate-General for Research and Innovation*. Retrieved from: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en [in English].
10. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Tseng, M.-L. et al. (2023). Behind the definition of Industry 5.0: A systematic review of technologies, principles, components, and values. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 40(6), 432–447. <https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2216701> [in English].

11. Ghobakhloo, M., Mahdiraji, H. A., Iranmanesh, M., Jafari-Sadeghi, V. (2024). From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: A roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production. *Information Systems Frontiers*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z> [in English].
12. Goyal, A., Ansu, A.K., Khan, M.I. et al. (2023). Exploring the potential of nano technology: A assessment of nano-scale multi-layered-composite coatings for cutting tool performance. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(10), 105173. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105173> [in English].
13. Islam, M.T., Sepanloo, K., Woo, S. et al. (2025). A review of the Industry 4.0 to 5.0 transition: Exploring the intersection, challenges, and opportunities of technology and human-machine collaboration. *Machines*, 13(4), 267. <https://doi.org/10.3390/machines13040267> [in English].
14. Jadallah, H., Friedland, C.J., Nahmens, I. et al. (2021). Instructional Design Framework for Construction Materials Training. *Frontiers in Built Environment*, 7, 798843. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.798843> [in English].
15. Jaime, A., Osorio-Sanabria, M.A., Bernal Torres, D.Y. (2026). Similarities and differences between Industry 4.0 and Industry 5.0: Towards a transitioning model. *Journal of Innovation & Knowledge*, 13 (Suppl. C), 100921. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100921> [in English].
16. Kennedy, M. (2016). How does professional development improve teaching? *Review of Educational Research*. 86(4), 945–980. [10.3102/0034654315626800](https://doi.org/10.3102/0034654315626800) [in English].
17. Phiri, R., Rangappa, S.M., Siengchin, S. et al. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(21), e39661. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661> [in English].
18. Rame, R., Purwanto, P., Sudarno, S. (2024). Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. *Innovation and Green Development*, 3(4), 100173. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173> [in English].
19. Sims, S., Fletcher-Wood, H., O'Mara-Eves, A. et al. (2023). Effective Teacher Professional Development: New Theory and a Meta-Analytic Test. *Review of Educational Research*, 95(2). <https://doi.org/10.3102/00346543231217480> [in English].
20. Singh, A, Wu, P., Okwudire, Ch.E., Banu, M. (2025). Advancing Workforce Development through Additive Manufacturing Education and Training. *Manufacturing Letters*, 44. 1637–1648. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.183> [in English].
21. Singh, A, Wu, P., Komaraju, Bh. et al. (2025). Hybrid education and training approaches enabling workforce development in additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 46, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.10.007> [in English].
22. Smutchak, Z., Burlaienko, T., Dubinina, O. et al. (2024). Digitalization of Educational Technologies in Ukraine: Challenges and Perspectives. In: *Innovative and Intelligent Digital Technologies; Towards an Increased Efficiency. Studies in Systems, Decision and Control*, 564. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70399-7_39 [in English].
23. Stoebe, Th., Cossette, I., Grady, K. (2024). Materials Technology Education Processes and Outcomes: The MatEdU Program. *Journal of Advanced Technological Education (JATE)*, 11 (1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10557886> [in English].
24. Vieriu, A.M., Petrea, G. (2025). The Impact of Artificial Intelligence (AI) on Students' Academic Development. *Education Sciences*, 15(3), 343. <https://doi.org/10.3390/educsci15030343> [in English].
25. Zhao, H., Li, N., Bai, Ch. (2025). A review of the preparation and properties of graphene-reinforced metal, ceramic, and polymer composites. *Materials Research Express*, 12(7), 072002. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adee7c> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.04.2026