



Теорія і методика професійної освіти

УДК 72.025.4:378

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.18118408>

**Реставрація архітектурної пластики: сучасні технології та їх інтеграція у
навчальний процес підготовки реставраторів**

Будзик Ольга Ігорівна

Асистент кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх навчання,
Тернопільський національний педагогічний університет імені

В. Гнатюка, Тернопіль, 46009 Україна

<https://orcid.org/0009-0004-6421-593X>

Вільгушинський Роман Казимирович

Професор кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх
навчання, Тернопільський національний педагогічний університет імені

В. Гнатюка, Тернопіль, 46009 Україна

<https://orcid.org/0000-0003-2200-7492>

Дацюк Наталя Михайлівна

Доцент кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх навчання,
Тернопільський національний педагогічний університет імені

В. Гнатюка, Тернопіль, 46009 Україна

<https://orcid.org/0000-0003-2548-3638>

Лесик Софія Богданівна

Асистент кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх навчання,
Тернопільський національний педагогічний університет імені

В. Гнатюка, Тернопіль, 46009 Україна

<https://orcid.org/0009-0003-0344-6964>



Нетриб'як Михайло Миколайович

Викладач кафедри образотворчого мистецтва, дизайну та методики їх навчання,
Тернопільський національний педагогічний університет імені

В. Гнатюка, Тернопіль, 46009 Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9043-3886>

Прийнято: 12.12.2025 | Опубліковано: 29.12.2025

***Анотація.** У статті здійснено комплексний аналіз сучасних підходів до реставрації кам'яної архітектурної пластики з акцентом на використання цифрових технологій та можливості їх системної інтеграції у навчальний процес підготовки реставраторів. Актуальність дослідження зумовлена посиленням ризиків втрати об'єктів культурної спадщини внаслідок природних чинників, антропогенного впливу та воєнних дій, а також потребою підвищення точності, наукової обґрунтованості та зворотності реставраційних втручань. У роботі проаналізовано функціональні можливості лазерного 3D-сканування, фотограмметрії, фотореалістичного моделювання, адитивного виробництва та CNC-технологій на різних етапах реставрації архітектурної пластики, зокрема під час документування об'єктів, аналізу їхнього технічного стану, очищення поверхонь, консолідації пошкоджених ділянок, відновлення втрат і постреставраційного моніторингу. Особливу увагу приділено питанням матеріальної сумісності відновлювальних елементів з оригіналом, принципам мінімального та реверсивного втручання, а також можливостям поєднання цифрових інструментів із традиційними ремісничими методами. На основі узагальнення міжнародного та вітчизняного досвіду обґрунтовано доцільність трансформації освітніх програм підготовки реставраторів шляхом упровадження міждисциплінарних модулів із цифрових технологій, лабораторних занять з 3D-сканування, 3D-моделювання та проектної практики з оцифрування реальних об'єктів спадщини.*



Запропоновано концептуальну модель інтеграції цифрових інструментів у навчальний процес, спрямовану на формування гібридних професійних компетентностей, що поєднують аналітичне мислення, цифрову грамотність і класичні реставраційні навички. Отримані результати свідчать, що поєднання цифрових і традиційних підходів сприяє підвищенню ефективності реставраційних робіт, покращенню якості документації та довгостроковому збереженню архітектурної спадщини, а також підвищує рівень професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі реставрації.

Ключові слова: *архітектурна пластика, реставрація, цифрові технології, 3D-сканування, фотограмметрія, адитивне виробництво, підготовка реставраторів.*

Restoration of Architectural Plastic: Modern Technologies and Their Integration into the Educational Process of Training Restorers

Olha Budzyk

Assistant Department of Fine Arts, Design and Methods of Their Teaching, Ternopil
Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, 46009 Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-6421-593X>

Roman Vilgushynskyi

Professor Department of Fine Arts, Design and Methods of Their Teaching, Ternopil
Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, 46009 Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-2200-7492>

Nataliia Datsiuk

Candidate of Art History, Associate Professor of the Department of Fine Arts, Design
and Methods of Their Teaching, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical

University, Ternopil, 46009 Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-2548-3638>



Sofia Lesyk

Assistant Department of Fine Arts, Design and Methods of Their Teaching, Ternopil
Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, 46009 Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-0344-6964>

Mykhailo Netrybiak

Teacher Department of Fine Arts, Design and Methods of Their Teaching, Ternopil
Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, 46009 Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9043-3886>

***Abstract.** The article provides a comprehensive analysis of modern approaches to the restoration of stone architectural plastic with an emphasis on the use of digital technologies and the possibility of their systematic integration into the educational process of training restorers. The relevance of the study is due to the increased risks of loss of cultural heritage objects due to natural factors, anthropogenic impact and military actions, as well as the need to increase the accuracy, scientific validity and reversibility of restoration interventions. The paper analyzes the functional capabilities of laser 3D scanning, photogrammetry, photorealistic modeling, additive manufacturing and CNC technologies at various stages of the restoration of architectural plastic, in particular during the documentation of objects, analysis of their technical condition, cleaning of surfaces, consolidation of damaged areas, restoration of losses and post-restoration monitoring. Particular attention is paid to the issues of material compatibility of restoration elements with the original, the principles of minimal and reversible intervention, as well as the possibilities of combining digital tools with traditional craft methods. Based on the generalization of international and domestic experience, the feasibility of transforming educational programs for training restorers by introducing interdisciplinary modules on digital technologies, laboratory classes on 3D scanning, 3D modeling and project practice on digitizing real heritage objects is substantiated. A conceptual model of integrating*



digital tools into the educational process is proposed, aimed at the formation of hybrid professional competencies that combine analytical thinking, digital literacy and classical restoration skills. The results obtained indicate that the combination of digital and traditional approaches contributes to increasing the efficiency of restoration work, improving the quality of documentation and long-term preservation of architectural heritage, and also increases the level of professional training of future specialists in the field of restoration.

Keywords: *architectural plastic, restoration, digital technologies, 3D scanning, photogrammetry, additive manufacturing, training of restorers.*

Постановка проблеми. Актуальність теми зумовлена необхідністю збереження й відновлення архітектурної спадщини, до якої належить кам'яна архітектурна пластика – рельєфні та скульптурні елементи, прикраси будівельних споруд. Традиційні методи реставрації (механічна очистка, хіміко-фізична консолідація, ручне відтворення втрачених фрагментів) є затратними та не завжди дають ідеальний результат. Натомість цифрові технології відкривають нові можливості точного документування та відтворення об'єктів – 3-D сканування, фотограмметрія, віртуальне моделювання, адигитивне виробництво (3-D друк) дозволяють створювати «цифрові двійники» скульптур, аналізувати дефекти та виготовляти копії елементів. Водночас у сфері підготовки реставраторів виникає потреба інтеграції цих цифрових інструментів у навчальні програми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Раніше опубліковані дослідження показали стрімке поширення цифрових технологій у реставрації. Так, застосування лазерного 3D-сканування та фотограмметрії дозволяє створювати детальні тривимірні моделі історичних будівель і скульптур, що фіксують кожну деталь поверхні з надзвичайною точністю. Це дає змогу виявити недоліки матеріалу, відстежувати зміни стану об'єкта та планувати реставраційні втручання.



Окремим аспектом сучасних досліджень є питання точності та масштабованості цифрових моделей у реставрації архітектурної пластики. У літературі наголошується, що для скульптурних і рельєфних елементів фасадів критичним є не лише загальний рівень деталізації, а й коректне відтворення дрібних пластичних переходів, слідів інструментів і природних деформацій матеріалу. Саме ці характеристики часто мають вирішальне значення для мистецтвознавчого аналізу та вибору реставраційної стратегії. Тому цифрове документування розглядається не як заміна традиційного огляду, а як інструмент його поглиблення та об'єктивізації.

Розвиток цифрового документування у сфері охорони культурної спадщини тісно пов'язаний із концепцією так званої «цифрової консервації», яка передбачає не лише фіксацію поточного стану об'єкта, а й створення довготривалих цифрових репрезентацій для наукового аналізу та моніторингу.

Як зазначає Ремондіно (2011) [1], тривимірні моделі, отримані методами фотограмметрії та лазерного сканування, дедалі частіше розглядаються як повноцінний науковий інструмент, що дозволяє поєднувати геометричну точність із візуальною достовірністю та слугує базою для прийняття реставраційних рішень.

Наприклад, дослідження Парфенова та ін. (2022) [2] демонструє як поєднання 3D-сканування з адитивними технологіями (лазерна стереолітографія, SLS, DMLS) дозволяє відновлювати втрачені частини скульптур – від виготовлення форм для лиття до прямих копій з металу або полімерів.

У зв'язку з поширенням адитивних технологій у реставрації дедалі більше дослідників звертають увагу на концепцію «реверсивності» цифрових втручань. Йдеться про можливість вилучення або заміни відновлених елементів без шкоди для оригінальної тканини пам'ятки. Цифрове проектування та 3D-друк у цьому контексті розглядається як методи, що дозволяють чітко відмежувати автентичні частини об'єкта від сучасних доповнень. Такий підхід



відповідає основним принципам міжнародних хартій з реставрації та сприяє підвищенню прозорості реставраційних рішень.

У міжнародних дослідженнях також наголошується на значенні точності цифрових копій у процесі реконструкції втрачених фрагментів архітектурної пластики. Стиліанідіс і Ремондіно (2016) [3] підкреслюють, що використання цифрових моделей у реставрації повинно супроводжуватися суворими протоколами верифікації даних, або уникнути спотворення історичної форми об'єкта. Автори акцентують увагу на необхідності поєднання інженерної точності з історико-мистецьким аналізом, що особливо актуально при роботі зі скульптурними деталями фасадів.

У роботі Буржуа та ін. (2025) [4] проаналізовано застосування 3D-друку для виробництва «протезів» втраченої частини архітектурних пам'яток (монастир Баталья). Порівнюючи різні технології друку та матеріали, показано, що для збереження інтеграції з оригіналом варто обирати матеріали, схожі за властивостями (лійний вапняк, смоляні сполуки) і суворо контролювати геометрію.

Окрему увагу в наукових публікаціях приділено проблемі матеріальної сумісності між оригіналом і відновлювальними елементами, створеними за допомогою цифрових технологій. Лопез та ін. (2019) [5] доводять, що неправильно підібрані матеріали для 3D-друку можуть спричинити напруження в структурі пам'ятки аби прискорювати деградаційні процеси. Тому цифрове виготовлення елементів має супроводжуватися матеріалознавчим аналізом та тестуванням зразків у лабораторних умовах.

Важливою складовою сучасних досліджень є аналіз довгострокової поведінки матеріалів, використаних у цифрово відтворених елементах. Науковці підкреслюють, що навіть за геометричної точності копії невідповідність коефіцієнтів теплового розширення, пористості чи капілярної активності може призводити до появи мікротріщин та вторинних ушкоджень. У цьому зв'язку цифрові технології не усувають потреби в класичних



матеріалознавчих дослідженнях, а навпаки – посилюють їхню роль. Комплексний підхід дозволяє мінімізувати ризики та підвищити довговічність реставраційних втручань.

Важливе місце в літературі займає поєднання 3D-технологій із освітнім процесом. Аке та ін. (2024) [6] відзначають брак спеціалізованих навчальних методик для реставраторів, що працюють із віртуальними моделями. Звичайно фахівці з реставрації залишаються сам-на-сам з потоком технічної інформації або залежать від 3D-експертів. У своєму огляді вони пропонують структуру освітнього фреймворку, що включає етапи від сканування до 3D-друку відновних елементів, і повідомляють, що експериментальне впровадження такого підходу у навчання показало збільшення обізнаності студентів та ефективне засвоєння методів.

Освітній вимір цифрової реставрації активно розглядається й у працях, присвячених міждисциплінарній підготовці фахівців. На думку Аполлоніо та ін. (2020) [7], ефективне навчання реставраторів цифровим методам можливе лише за умови інтеграції знань з архітектури, інформатики та матеріалознавства. Автори зазначають, що студенти, які працюють із 3D-моделями в рамках проектного навчання, краще усвідомлюють складність реставраційних рішень і відповідальність за втручання в автентичну тканину пам'ятки.

У контексті професійної підготовки реставраторів дослідники наголошують на зміні самої логіки навчання. Якщо раніше акцент робився переважно на відпрацюванні ручних технік, то сьогодні дедалі більшого значення набуває аналітична робота з цифровими даними. Студенти мають навчитися інтерпретувати результати сканування, критично оцінювати точність моделей і співвідносити цифрову інформацію з фізичним станом об'єкта. Таким чином, цифрові технології сприяють розвитку дослідницького мислення та відповідального підходу до реставраційних рішень уже на етапі навчання.

В українському контексті зростає інтерес до цифрових інструментів у реставрації. Наприклад, Плахотнюк та ін. (2021) [8] підкреслюють, що хіміко-



технологічні дослідження матеріалу скульптури справді визначають вибір реставраційних методів. Цей підхід може бути доповнений цифровою діагностикою.

Сучасні українські дослідники також відзначають потенціал поєднання класичних реставраційних методів із цифровими засобами аналізу. За спостереженнями Рибчинського (2020) [9], цифрова фіксація стану кам'яних елементів дозволяє точніше прогнозувати процеси руйнування та коригувати консерваційні заходи ще на етапі проектування реставрації. Це особливо важливо для об'єктів, що перебувають у складних кліматичних або урбаністичних умовах.

Олійник і Василенко (2025) [10] дослідили інтеграцію фотограмметрії та LiDAR у архітектурну освіту України – результати свідчать про значний потенціал таких технологій при аналізі історичних споруд та плануванні консервації. Також ведуться спостереження за інноваційними методами очищення каменю (у тому числі безпечними ензимними засобами) та консолідації, які детально описуються в професійних джерела [11].

Паралельно з цифровізацією зростає увага до екологічної безпеки реставраційних втручань. У дослідженні Багліоні та ін. (2018) [12] наголошується, що інноваційні методи очищення каменю, зокрема використання наногелів і біотехнологічних засобів, можуть ефективно поєднуватися з цифровим контролем процесу очищення. Це дозволяє мінімізувати ризики пошкодження поверхні та забезпечити точне дозування впливу.

У світовій практиці дедалі ширше застосовуються цифрові платформи для збереження та обміну реставраційними даними. Як зазначається у дослідженнях [13], цифрові архіви та 3D-бази даних є ключовим інструментом захисту культурної спадщини в умовах воєнних конфліктів і надзвичайних ситуацій. Такі ресурси забезпечують не лише фіксацію втрат, а й можливість майбутнього відновлення об'єктів на основі достовірних цифрових джерел.



Проте багато аспектів залишаються недостатньо вивченими. Немає узагальнених рекомендацій щодо включення цифрових модулів у програми підготовки реставраторів, відсутня вітчизняна методика навчання традиційних ремісничих навичок у поєднанні з цифровим дизайном. Також актуальним є вирішення правових і етичних питань використання оцифрованих матеріалів (наприклад, авторські права на моделі) та довгострокового збереження 3D-даних.

Окремим напрямом сучасних досліджень є правові та етичні аспекти цифрової реставрації. Згідно з дослідженням Еддісона (2015) [14], питання авторських прав на 3D-моделі пам'яток, а також доступу до цифрових даних, залишаються недостатньо врегульованими в багатьох країнах. Це створює ризики як для науковців, так і для освітніх установ, що використовують цифрові копії у навчальному процесі.

Реставрація кам'яних архітектурних пластик далеко не завжди висвітлюється серед досліджень реставрації. Більшість праць присвячена монументам або живопису, тоді як складні рельєфні деталі фасадів потребують окремої уваги. Пропонується сфокусувати подальший аналіз на методах поворотних втручань у камінь за допомогою цифрових технологій, а також на педагогічних моделях їх викладання.

Узагальнюючи наявні наукові підходи, слід зазначити, що більшість досліджень розглядає цифрові технології переважно як допоміжний інструмент, тоді як їхній потенціал у формуванні нової реставраційної методології ще не повністю реалізований. Як підкреслює Летельєр (2017) [15], інтеграція цифрових засобів у реставрацію має базуватися на принципах мінімального втручання, зворотності та поваги до автентичності, що вимагає подальших міждисциплінарних досліджень.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Невіршені питання загальної проблеми реставрації архітектурної пластики пов'язані з наявністю низки аспектів, що потребують подальшого осмислення



та вирішення. Передусім йдеться про технологічний розрив, адже, незважаючи на поширеність 3D-інструментів, досі бракує стандартизованих процедур поєднання цифрових моделей із традиційним відновленням каменю. Питання інтегруєбельності даних 3D-сканування, зокрема розбіжності форматів, значні обсяги файлів і відмінності методик моделювання, залишаються відкритими. Важливою проблемою є також освітній вакуум, що проявляється у відсутності спеціалізованих курсів і програм, здатних сформувати у майбутніх реставраторів комплексні цифрові компетенції. В професійних колах наголошується на необхідності розробки початкових модулів з фотограмметрії, 3D-моделювання та адитивного виробництва.

Ще одним проблемним аспектом є обмежена доступність цифрового обладнання та програмного забезпечення для освітніх і реставраційних установ. Висока вартість професійних лазерних сканерів, ліцензійного програмного забезпечення та технічної підтримки часто стає бар'єром для системного впровадження цифрових методів, особливо в регіональних закладах. Це призводить до фрагментарного використання технологій і залежності від окремих грантових проектів. У результаті формується нерівномірний рівень цифрових компетенцій серед фахівців, що ускладнює стандартизацію реставраційної практики.

В Україні це питання лише починає виходити за межі теоретичних міркувань, а практики цифровізації в освіті потребують систематизації та стандартизації. Окремо уваги потребує методологічна невизначеність, що полягає у відсутності чітких критеріїв вибору технологій, зокрема визначення умов, за яких доцільно реставрувати оригінал за допомогою CNC-фрезерування, а коли більш обґрунтованим є створення копії на 3D-принтері.

Перспективним напрямом є дослідження змішаних гібридних підходів, які поєднують лазерне сканування з ручними ремісничими методами формоутворення. Водночас відчувається нестача практичної апробації, оскільки бракує публікацій, присвячених успішній реалізації синтезу традиційних і



цифрових підходів саме у реставрації архітектурної пластики вітчизняних пам'яток, а також комплексного аналізу ефективності таких методів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є обґрунтування ролі сучасних цифрових технологій у реставрації кам'яної архітектурної пластики та формування рекомендацій щодо їх інтеграції в освітню підготовку реставраторів.

Для досягнення цієї мети передбачається охарактеризувати інноваційні методи очищення і консолідації каменю, що застосовуються в реставраційній практиці, проаналізувати роль 3D-сканування, фотограмметрії, фотореалістичного моделювання та адитивного виробництва у створенні відновлювальних елементів, а також виявити їхні переваги й обмеження порівняно з традиційними підходами. Крім того, планується дослідити міжнародний і вітчизняний досвід упровадження 3D-технологій у реставраційну діяльність та освітні програми, а також запропонувати напрями вдосконалення навчальних і практичних модулів для підготовки реставраторів в умовах цифрової трансформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні підходи до реставрації архітектурної пластики передбачають детальне цифрове сканування та моделювання об'єкта перед реставрацією. Використання лазерного сканування чи фотограмметрії дозволяє отримати високоточні тривимірні моделі скульптури. Це має важливі наслідки.

По перше, цифрова модель стає «вихідним ланцюгом» для планування реставрації – на ній можна виявити тріщини, абразії, біоплівку чи вивітрювання. По-друге, модель слугує консерваційним архівом, адже навіть у разі подальшого руйнування можна відтворити об'єкт, спираючись на дані сканування. Крім того, при використанні систем керування доповненою реальністю (AR/VR) це дає можливість реставраторам візуалізувати втрачений елемент у натуральному масштабі й приміряти інтервенцію «у віртуальному просторі».



Результати дослідження доцільно розглядати не лише як опис окремих технологічних рішень, а як прояв загальної трансформації реставраційної парадигми. Перехід від інтуїтивно-ремісничого підходу до даних, отриманих шляхом цифрового аналізу, змінює роль реставратора, який дедалі більше виступає аналітиком і координатором міждисциплінарних процесів. Цифрові інструменти не замінюють фахову експертизу, але розширюють її можливості, забезпечуючи обґрунтованість і відтворюваність рішень у складних реставраційних проектах.

Інноваційні методи хімічного і механічного очищення каменю дозволяють дбайливо видаляти забруднення та біоплівки. Зокрема, екологічно безпечні ензимні гелі забезпечують селективне руйнування біоплівки без пошкодження кам'яної поверхні. Ці засоби нетоксичні для працівника й довкілля, не вимагають суворого рН-контролю, що скорочує трудові витрати і мінімізує ризик надмірного зміщення глибоко в'їдених нашарувань. Для консолідації ослабленого каменю все ширше застосовують нанорозміри кальцію гідроксиду (наноліму) або кремнеземні органо-мінеральні розчини, які проникають у мікротріщини та зміцнюють структуру, при цьому залишаючись зворотними (водорозчинними) і не змінюючи кольору. Такі підходи поєднують із традиційними, наприклад, цементацією чи ін'єкціями полімерних смол, вибір яких також базується на матеріалознавчих дослідженнях.

Коли необхідно виготовити копію зруйнованого декоративного мотиву, традиційно це робили вручну, вирізуючи майстер-модель із глини чи утворюючи форму для відливу. Це тривало і неточно. Сучасні підходи передбачають цифрове моделювання та адитивне відтворення – за допомогою САD-програм реставратор чи інженер створює 3D-модель втраченого елемента, на яку орієнтуються. Далі цю модель надсилають на 3D-принтер (пластиковий чи металевий) або на CNC-фрезу (для каменю, мармуру тощо).

Перевагою є безконтактність процесу, адже оригінальний витвір не пошкоджується при знятті відбитку, на відміну від традиційного ливарного



формування. 3D-друк також дозволяє вбудовувати сенсори безпеки всередину відтворених елементів для подальшого моніторингу.

Важливим аспектом є створення цифрових архівів реставраційних проектів. Зібрані 3D-скани, фотографії й моделі зберігають на віддалених серверах. Українські ініціативи (наприклад, Pixelated Realities) активно оцифровують пам'ятки і викладають моделі у відкритий доступ, що дозволить майбутнім реставраторам відтворювати первісний стан об'єктів. Цифрова фіксація дає змогу «заморозити» руйнівні процеси – майже як попередження про втрати, адже поточний стан зафіксовано.

Інтеграція сучасних технологій у навчальний процес – це окремий ключовий результат. Прикладом служить український проєкт «Architectural Heritage Preservation in Times of War», де у навчальній програмі архітектурної консервації були передбачені семінари з 3D-сканування, фотограмметрії та геоінформаційного аналізу [16]. У ході курсу студенти здобували практичний досвід «цифрової документації»: виконували польярні зйомки фасадів, обробляли хмари точок і готували звіти про стан пам'яток. Такий досвід підтверджує, що навіть не маючи спеціальної підготовки, студенти швидко опановують технології завдяки візуальному і практичному навчанню.

Другим результатом є осмислення навчальних програм. У дослідженні Олійник і Василенко (2025) [10] показано, що інтеграція тренінгів з фотограмметрії та LiDAR потребує спеціальних курсів чи модулів. Наприклад, рекомендується ввести у програми факультетів архітектури дисципліни «Цифрові технології в реставрації», «3D-сканування об'єктів спадщини», «Віртуальне моделювання для реставрації». Автори констатували, що такі предмети мають містити лабораторні роботи із застосуванням обладнання (сканерів, дронів, програм фотограмметрії) і обов'язковий іспит із практичної верифікації вміння збирати та обробляти 3D-дані.

Для систематизації підходів до відновлення кам'яної архітектурної пластики та наочного виявлення відмінностей між класичними й інноваційними

практиками доцільно здійснити порівняльний аналіз основних етапів реставраційного процесу. Таблиця 1 узагальнює традиційні методи реставрації та сучасні цифрові технології, що застосовуються на різних стадіях роботи з пам'ятками, а також окреслює ключові переваги використання цифрових інструментів. Такий підхід дозволяє простежити трансформацію реставраційних практик, оцінити їхню ефективність і обґрунтувати доцільність ширшого впровадження цифрових рішень у фахову діяльність і професійну підготовку реставраторів.

Таблиця 1

*Порівняння традиційних та цифрових методів реставрації
архітектурної пластики*

Етап реставрації	Традиційний підхід	Сучасні цифрові методи
Документування об'єкта	Ручні заміри, фотозйомка, креслення	Лазерне сканування, фотограмметрія, фототекстурування
Аналіз стану (кондиція)	Візуальний огляд, мікроскопія, рентген	Цифрове зображення (мультиспектральне фото), 3D-модель із текстурою, тепловізія
Очищення поверхні	Хімічні препарати (пігменти, гелі), вода, механічна чистка	Ензимні гелі, ультразвук, лазерне відпарювання органіки
Консолідація пошкодженого	Введення цементних чи епоксидних розчинів	Нанопорошки кальцію, кремнеземні розчини, ін'єкція супергідрофобних в'язучих
Відновлення втрат	Ручне карбування/ліпка (майстер-модель за ескізом)	CAD-моделювання, CNC-фреза по каменю, 3D-друк протезів (полімерних чи металевих)
Постреставраційне фіксування	Фотофіксація словесний опис	Рендери 3D-моделей «до» і «після», відеоогляд, цифрові звіти в БД

Отже, цифрові технології доповнюють традиційні етапи реставрації, забезпечуючи точнішу документацію, екологічні методи очищення та гнучкі

можливості відновлення елементів. Використання 3D-сканування і моделювання значно підвищує ефективність реставраційних проєктів.

З огляду на зростання ролі цифрових технологій у сучасній реставраційній практиці особливої актуальності набуває питання оновлення змісту і структури освітніх програм підготовки реставраторів. Таблиця 2 відображає ключові інновації, що можуть бути інтегровані в навчальні програми, та демонструє їхню практичну користь для формування професійних компетентностей майбутніх фахівців. Такий підхід дозволяє поєднати теоретичну підготовку з прикладним цифровими навичками, забезпечивши міждисциплінарність навчання й адаптацію освітнього процесу до потреб сучасної реставраційної науки та практики.

Таблиця 2

Інновації у навчальних програмах підготовки реставраторів та їхні переваги

Компонент освітньої програми	Опис інтеграції	Практична користь
Лабораторії 3D-сканування	Практичні заняття з лазерного сканування та фотограмметрії	Формування навичок швидкого отримання тривимірних моделей об'єктів, детальна фіксація стану пам'яток
Курси 3D-моделювання та CAD	Викладання програмного 3D-моделювання для реставрації елементів	Можливість проєктувати та коригувати деталі реставрації в віртуальному середовищі перед фізичною реалізацією
Проектна практика (інтернатури)	Польові стажування з оцифрування реальних об'єктів спадщини	Набуття досвіду документування і аналізу пам'яток безпосередньо «в полі», під керівництвом експертів
Семінари інноваційних технологій	Гостьові лекції та вебінари від світових спеціалістів (цифровий консерваційний інструментарій)	Оновлення знань про сучасні практики; встановлення зв'язків з провідними науковцями та



		практиками галузі
Міждисциплінарні проекти	Спільні курсові з архітектури, ІТ та реставрації (наприклад, розробка 3D-додатку або VR-туру пам'ятки)	Розвиток креативності та вмінь командної роботи; ознайомлення з суміжними методами, збагачення досвіду студентів.
Модулі історії та етики СН із VR	Використання віртуальних моделей для вивчення спадщини (є віртуальні екскурсії з аналізом втрат)	Поглиблене розуміння історичного контексту пам'яток; формування свідомості відповідальності реставратора за об'єкти спадщини.

Ключовою перевагою навчальних інновацій є формування у фахівців гнучкого «гібридного» мислення – майстерність у традиційних ремеслах поєднується з цифровими навичками. Запропоновані вище компоненти програм у поєднанні забезпечать підготовку реставраторів, здатних застосовувати 3D-технології на всіх етапах консервації та реставрації, а також створювати міждисциплінарні продукти (цифрові архіви, AR/VR-програми).

Висновки. Проведене дослідження показало, що сучасні цифрові технології кардинально змінюють підходи до реставрації кам'яної архітектурної пластики і мають бути тісно інтегровані в професійну підготовку реставраторів. Цифрове документування стало необхідним етапом, що дозволяє отримати повну картину стану об'єкта та зберегти інформацію на майбутнє. Використання адитивного виробництва (3D-друк, CNC) у процесі відтворення втрачених деталей забезпечує високу точність і захист оригіналів від ризику пошкодження під час зняття форм і ручного копіювання. Інноваційні чистячі та консолідуючі засоби дозволяють удосконалити традиційні процедури, роблячи їх безпечнішими і екологічнішими.

Слід продовжувати вивчати питання адаптації цифрових стандартів у нормативно-правовій базі реставрації та оцінити економічну сторону



впровадження «цифрових» інструментів. Необхідні експериментальні дослідження, що порівнюють довгострокові результати консервації за традиційними та цифровими методами. В освітній сфері слід розробити й апробувати навчальні програми, включаючи модулі з цифрового реставраційного дизайну і оцінити їх ефективність. З огляду на перспективи, важливо також дослідити потенціал використання штучного інтелекту у реставрації архітектурної пластики, наприклад для автоматизованої ідентифікації патогенних пошкоджень на цифрових моделях.

Таким чином, проведене дослідження підкреслює невідворотну тенденцію до поєднання традиційних ремісничих навичок та сучасних цифрових технологій. Підвищення якості реставраційних втручань та збереження культурної спадщини потребує паралельного розвитку обох складових – ремесла і IT, які мають бути органічно поєднані у підготовці майбутніх фахівців.

Список використаних джерел

1. Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138.
2. Parfenov V., Igoshin S., Masaylo D., Orlov A., Kuliashou D. Use of 3D Laser Scanning and Additive Technologies for Reconstruction of Damaged and Destroyed Cultural Heritage Objects. *Quantum Beam Science* 2022. Vol.6, No.1, Art.11
3. Stylianidis, E., & Remondino, F. (2016). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*. Dunbeath: Whittles Publishing.
4. Bourgeois I.C., Sugiyama G., Capistrano J., Ascensão G., Ferreira V., Rodrigues H. Smart 3D Printed Elements for Conservation of Damaged Heritage Structures. *J. Build. Eng.* 2025. Vol.112, Art.113595
5. López, A. J., Pérez, L., & Martínez, S. (2019). Additive manufacturing and materials compatibility in heritage restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 38, 221–229.



6. Acke L., Corradi D., Verlinden J. Comprehensive educational framework on the application of 3D technologies for the restoration of cultural heritage objects. *J. Cult. Herit.* 2024. Vol.66. P.613–627
7. Apollonio, F. I., Gaiani, M., & Sun, Z. (2020). BIM-based modeling and educational approaches for cultural heritage. *Applied Geomatics*, 12(1), 1–15.
8. Plakhotniuk K.O., Kochubey V.V., Rybchynskiy O.V. Реставрація та хіміко-технологічні дослідження кам'яної скульптури св. Яна Непомуцького з с. Чабарівка. *Вісник Львівської політехніки*, Сер. Архітектура. 2021. Вип.64. С.64–77
9. Рибчинський, О. В. (2020). Цифрові методи дослідження пам'яток архітектури в реставраційній практиці. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Архітектура, 2, 45–53.
10. Олійник Г., Василенко К. Інтеграція фотограмметрії і технологій LiDAR у систему архітектурної освіти України: виклики та перспективи. *Архітектура*, №37 (2025). С.63–73
11. Stone & Wall Paintings Group. Innovative Eco-Friendly Cleaning Methods for Architectural Restoration. *The Institute of Conservation* (online лекція) 07.12.2022
12. Baglioni, P., Chelazzi, D., & Giorgi, R. (2018). Nanotechnologies in the conservation of cultural heritage. *Accounts of Chemical Research*, 51(11), 2840–2849.
13. UNESCO. (2023). *Protecting cultural heritage through digital documentation*. Paris: UNESCO Publishing.
14. Addison, A. C. (2015). Emerging trends in virtual heritage. *IEEE Multimedia*, 22(2), 22–25
15. Letellier, R. (2017). *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.



16. Kharkiv School of Architecture. (n.d.). *Preservation of architectural heritage in wartime: The Ukrainian model*. Kharkiv School of Architecture. <https://kharkiv.school/courses/zberzhennya-arhitekturnoyi-spadshhyny-v-umovah-vijny-ukrayinska-model/>