Марченко Станіслав Сергійович, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри технологічної і професійної освіти Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка, м. Глухів, Україна, https://orcid.org/0000-0002-4962-1831

Marchenko Stanislav Serhiyovych, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological and Professional Education, Hlukhiv National Pedagogical University named after Oleksandr Dovzhenko, Hlukhiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-4962-1831

ЛАЗЕРНИЙ ГРАВІЮВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ З ЧПК НА УРОКАХ ТЕХНОЛОГІЙ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ТВОРЧИХ ТА ЦИФРОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ УЧНІВ

CNC LASER ENGRAVING MACHINE IN TECHNOLOGY LESSONS AS A MEANS OF DEVELOPING STUDENTS' CREATIVE AND DIGITAL COMPETENCIES

Анотація

У статті досліджено можливості використання лазерного гравіювального верстата з числовим програмним керуванням на уроках технологій у закладах загальної середньої освіти як засобу розвитку творчих і цифрових компетентностей учнів. Обґрунтовано актуальність упровадження цифрового виробничого обладнання в освітній процес у контексті сучасних вимог до технологічної підготовки молоді, розвитку цифрової економіки та підготовки учнів до діяльності в умовах технологічного суспільства. На основі аналізу наукових джерел охарактеризовано освітній потенціал лазерного гравіювального верстата,

окреслено його переваги, обмеження та педагогічно доцільні напрями використання в шкільній практиці. Визначено, що робота з таким обладнанням сприяє розвитку творчих, цифрових, інженерно-технічних, комунікативних і профорієнтаційних умінь учнів, оскільки поєднує цифрове проєктування, матеріалообробку та виготовлення реального виробу. Розкрито основні етапи роботи учнів з лазерним верстатом: підготовку цифрового зображення або макета виробу, добір і підготовку заготовки, налаштування обладнання, виконання гравіювання та опорядження готового виробу. Охарактеризовано можливості застосування лазерного верстата в урочній, позаурочній, проєктній і змішаній формах навчання. Показано, що педагогічно доцільним є використання такого обладнання переважно у старших класах, коли учні мають достатній рівень абстрактного мислення, технологічної підготовки та готовності до дотримання вимог безпеки. Наголошено, що лазерний гравіювальний верстат не повинен витісняти традиційні види ручної праці, а має використовуватися як засіб їх змістового й технологічного розширення. Зроблено висновок, що інтеграція лазерного гравіювального верстата з числовим програмним керуванням в освітній процес сприяє підвищенню якості технологічної підготовки учнів і створює умови для формування компетентностей, актуальних у сучасному цифровому середовищі.

Ключові слова: уроки технологій, лазерний гравіювальний верстат, числове програмне керування, творчі компетентності, цифрові компетентності, проєктна діяльність, цифрове виробництво.

Abstract

The article examines the possibilities of using a laser engraving machine with computer numerical control in technology lessons at general secondary education institutions as a means of developing students' creative and digital

competencies. The relevance of introducing digital manufacturing equipment into the educational process is substantiated in the context of current requirements for the technological training of young people, the development of the digital economy, and the preparation of students for activity in a technologically advanced society. Based on the analysis of scholarly sources, the educational potential of the laser engraving machine is characterized, and its advantages, limitations, and pedagogically appropriate areas of application in school practice are outlined. It is determined that working with such equipment contributes to the development of students' creative, digital, engineering, technical, communicative, and career-oriented skills, since it combines digital design, material processing, and the production of a real object. The main stages of students' work with the laser machine are described, including the preparation of a digital image or product layout, the selection and preparation of the workpiece, equipment setup, engraving, and finishing of the completed product. The possibilities of using the laser machine in classroom-based, extracurricular, project-based, and blended learning formats are characterized. It is shown that the use of such equipment is pedagogically most appropriate in upper secondary school, when students have a sufficient level of abstract thinking, technological preparedness, and readiness to comply with safety requirements. It is emphasized that the laser engraving machine should not replace traditional forms of manual work but should be used as a means of their substantive and technological expansion. It is concluded that the integration of a laser engraving machine with computer numerical control into the educational process contributes to improving the quality of students' technological training and creates conditions for the development of competencies relevant to the contemporary digital environment.

Keywords: technology lessons, laser engraving machine, computer numerical control, creative competencies, digital competencies, project-based activity, digital manufacturing.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток виробництва, цифрової економіки та технологічної освіти висуває нові вимоги до підготовки молоді, зокрема до формування технічних, творчих і цифрових компетентностей ще на рівні загальної середньої освіти. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває використання на уроках технологій сучасного цифрового обладнання, здатного поєднати проєктну діяльність учнів із практичним виготовленням виробів. Одним із таких перспективних засобів є лазерний гравіювальний верстат з числовим програмним керуванням.

Попри значний освітній потенціал лазерного обладнання, його впровадження у практику закладів загальної середньої освіти супроводжується низкою труднощів. Насамперед йдеться про обмежені фінансові можливості щодо придбання та технічного обслуговування відповідного устаткування. Не менш важливою є проблема недостатньої підготовленості вчителів до роботи з верстатами з ЧПК та спеціалізованим програмним забезпеченням. Крім того, у педагогічній практиці ще не сформовано достатньо розробленої методичної бази щодо використання лазерного гравіювального обладнання саме в умовах закладів загальної середньої освіти.

Водночас результати сучасних досліджень засвідчують, що практична діяльність учнів із цифровими виробничими інструментами, зокрема лазерними верстатами, сприяє підвищенню навчальної мотивації, розвитку інженерного мислення, творчих здібностей і формуванню навичок, затребуваних у сучасному технологічному середовищі [2; 3; 6]. Досвід використання подібного обладнання в освітній практиці різних країн підтверджує його значний потенціал у формуванні прикладних, проєктувальних і цифрових умінь учнів [4; 5; 7].

Отже, актуальним є дослідження можливостей використання лазерного гравіювального верстата з ЧПК на уроках технологій як засобу розвитку

творчих і цифрових компетентностей учнів, а також визначення педагогічно доцільних підходів до його впровадження в освітній процес закладів освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема інтеграції цифрових виробничих технологій у освітній процес привертає дедалі більшу увагу дослідників у галузі технологічної освіти, STEM-освіти та професійної підготовки.

Koprda та ін. [1] досліджували можливості створення бюджетного прототипу лазерного гравіювального верстата з ЧПК на платформі Arduino. Автори довели, що використання відкритих апаратних платформ дає змогу істотно зменшити вартість обладнання без суттєвого зниження якості обробки матеріалів, що відкриває перспективи для впровадження таких верстатів у закладах освіти з обмеженим фінансуванням.

Cai та Chiang [2] розробили й апробували STEM-курс для учнів старшої школи, у центрі якого було використання лазерного різака. Упродовж дев'ятитижневого навчання учні продемонстрували позитивну динаміку в розвитку інженерного мислення та вмінь розв'язувати технічні задачі. Дослідники встановили, що практична робота з лазерним обладнанням спонукає учнів до застосування елементів інженерного проєктування, зокрема ескізування, моделювання, тестування та вдосконалення виробів.

Soomro та ін. [3] у систематичному огляді літератури щодо ролі освітніх просторів технічної творчості у STEM-освіті з'ясували, що використання цифрових виробничих інструментів, зокрема лазерних різаків і 3D-принтерів, істотно впливає на формування інноваційного мислення, технологічної самоефективності та дизайнерських навичок учнів.

Kurniawan та Wijanarka [4] проаналізували здатність учнів профільних закладів освіти Індонезії розробляти програми для верстатів з ЧПК. Отримані результати показали, що практичні заняття з ЧПК-обладнанням

сприяють розвитку не лише технічних умінь, а й просторового, алгоритмічного мислення, уважності до деталей і здатності працювати з технологічними параметрами.

Eldebeky [5], досліджуючи вплив різних освітніх просторів технічної творчості на навчання учнів старшої школи, дійшов висновку, що робота з таким цифровим обладнанням позитивно впливає на концептуальне розуміння, навчальну залученість і готовність учнів до майбутньої професійної діяльності.

Wahid та ін. [6] розробили модель навчання технології лазерного гравіювання для учнів профільних закладів освіти. Дослідники довели, що безпосередня практична робота з лазерним гравером є ефективнішою, ніж опосередковане навчання через відеоматеріали, оскільки забезпечує вищий рівень залученості й кращі навчальні результати.

Shkitsa та ін. [7] описали досвід створення інноваційних навчально-виробничих лабораторій із цифровими технологіями в технічному університеті. Автори наголошують на важливості поєднання теоретичної підготовки з практичною діяльністю на сучасному обладнанні для формування конкурентоспроможних фахівців.

Аналіз наведених досліджень дає підстави стверджувати, що використання лазерного гравіювального обладнання в освітньому процесі має значний потенціал для розвитку технічних, творчих і цифрових умінь учнів. Водночас питання методики застосування лазерного гравіювального верстата з ЧПК саме на уроках технологій у закладах загальної середньої освіти залишається недостатньо опрацьованим, що й зумовлює актуальність цієї статті.

Мета статті полягає у дослідженні можливостей використання лазерного гравіювального верстата з числовим програмним керуванням на уроках технологій у закладах загальної середньої освіти як засобу розвитку

творчих і цифрових компетентностей учнів на основі аналізу й узагальнення сучасних наукових підходів до використання цифрового виробничого обладнання в освіті.

Виклад основного матеріалу. Лазерний гравіювальний верстат з числовим програмним керуванням є сучасним цифровим обладнанням, що поєднує можливості лазерної обробки матеріалів із точністю комп'ютерного керування. Принцип його роботи полягає у переміщенні лазерного випромінювача за заданою програмою по поверхні заготовки, унаслідок чого відбувається гравіювання або різання матеріалу з високою точністю [1].

Конструктивно такий верстат складається зі станини, на якій розміщується оброблювана заготовка, і рухомої частини – каретки з лазерним модулем, що переміщується кроковими двигунами у двох координатних напрямах. Керування верстатом здійснюється через плату керування, підключену до персонального комп'ютера. Для навчальних цілей найчастіше використовують компактні моделі з відносно невеликим робочим полем і помірною потужністю лазера, що дає змогу застосовувати їх у майстернях за умови дотримання вимог безпеки [1].

До переваг лазерного гравіювального верстата з ЧПК в освітньому процесі належать висока точність і повторюваність обробки, можливість працювати з різними матеріалами, поєднання цифрового проєктування з реальним виготовленням виробів, а також достатньо широкий спектр навчальних завдань, які можна реалізувати за його допомогою. Водночас використання такого обладнання потребує належної організації робочого простору, дотримання правил техніки безпеки, а також попереднього опанування спеціалізованого програмного забезпечення.

Освітній потенціал лазерного гравіювального верстата з ЧПК полягає не лише у технічній новизні обладнання, а передусім у тих видах діяльності, які він дає змогу організувати на уроках технологій. Робота з таким

верстатом передбачає проходження учнями повного циклу створення виробу – від виникнення задуму й цифрового проєктування до виготовлення, оцінювання результату та його вдосконалення. Саме ця цілісність діяльності робить лазерний верстат педагогічно значущим засобом формування компетентностей.

Передусім ідеться про розвиток творчих компетентностей. Робота з лазерним верстатом стимулює учнів до самостійного проєктування виробів, пошуку композиційних рішень, добору форм, декоративних елементів, орнаментів і способів оздоблення. Учні не лише відтворюють готові зразки, а й отримують можливість втілювати власні ідеї у матеріалі, експериментувати з варіантами оформлення та оцінювати естетичні якості кінцевого результату. Дослідження свідчать, що можливість швидко побачити матеріалізований результат власного задуму суттєво підвищує навчальну мотивацію та впевненість учнів у власних силах [3; 5].

Важливим є і розвиток цифрових компетентностей. Підготовка файлів для лазерного гравіювання вимагає роботи у векторних і растрових графічних редакторах, зокрема Inkscape, CorelDraw, Adobe Illustrator та інших. Це формує в учнів практичні вміння цифрового проєктування, розуміння форматів графічних файлів, принципів роботи з векторною графікою, а також взаємозв’язку між цифровою моделлю та фізичним результатом обробки. Паралельно учні опановують базові уявлення про CAD-проєктування, логіку передавання команд від програмного забезпечення до обладнання й технологічні особливості цифрового виробництва [2; 7].

Не менш значущим є формування інженерно-технічних компетентностей. Налаштування параметрів роботи верстата – швидкості переміщення каретки, потужності лазерного випромінювання, кількості проходів – вимагає від учнів розуміння технічних залежностей, здатності

аналізувати властивості матеріалу та прогнозувати результат обробки. У цьому контексті учні навчаються розв'язувати прикладні інженерні задачі: добирати оптимальні режими роботи, виявляти причини помилок, коригувати конструкцію виробу та вдосконалювати технологію його виготовлення [2; 4].

Робота з лазерним обладнанням також створює умови для розвитку соціальних і комунікативних компетентностей. Проєктна діяльність на уроках технологій нерідко має груповий характер: учні спільно обговорюють ідеї, розподіляють обов'язки, погоджують послідовність дій, взаємодіють під час виконання окремих технологічних операцій. Така організація діяльності сприяє формуванню навичок співпраці, відповідальності за спільний результат і вміння презентувати створений продукт. Як показують дослідження, робота в середовищі, де використовується лазерне обладнання, може підвищувати соціально-емоційну залученість учнів до навчання [5].

Окремої уваги заслуговує профорієнтаційний потенціал лазерного гравіювального верстата з ЧПК. Ознайомлення учнів із технологіями цифрового виробництва дає змогу розширити їхні уявлення про сучасні технічні професії, пов'язані з інженерією, дизайном, меблевим виробництвом, рекламною продукцією, прототипуванням, автоматизованою обробкою матеріалів. Практична взаємодія з таким обладнанням сприяє усвідомленню прикладного значення навчального матеріалу та можливих напрямів подальшого професійного самовизначення [6].

Разом із тим важливо підкреслити, що лазерний гравіювальний верстат з ЧПК не повинен розглядатися як заміна традиційній ручній праці учнів. Ручна обробка матеріалів має самостійну педагогічну цінність, оскільки сприяє розвитку дрібної моторики, тактильного сприйняття, терпіння, акуратності, наполегливості та культури праці. У зв'язку з цим цифрове обладнання доцільно трактувати не як альтернативу традиційним видам

технологічної діяльності, а як засіб їх доповнення та розширення. Саме у такому поєднанні найповніше розкривається освітній потенціал лазерного верстата.

З огляду на вікові особливості учнів, вимоги безпеки та необхідність попередньої технологічної підготовки найбільш доцільним видається використання лазерного гравіювального верстата з ЧПК переважно у старших класах. Учні цього віку, як правило, мають вищий рівень абстрактного та просторового мислення, здатні працювати з цифровими моделями, усвідомлено дотримуватися правил техніки безпеки та виконувати завдання, що вимагають поєднання проєктувальної, технічної й практичної діяльності. Крім того, на цьому етапі навчання значно посилюється профорієнтаційна функція технологічної освіти, а тому ознайомлення з цифровим виробничим обладнанням набуває особливого значення [4; 5; 6].

Технологія роботи учнів з лазерним гравіювальним верстатом з ЧПК передбачає послідовне виконання кількох етапів, кожен з яких має окреме навчальне значення. Першим етапом є розроблення та підготовка зображення або конструкції виробу. На цьому етапі учні створюють чи добирають графічний файл, працюють у графічних редакторах, опановують відмінності між векторною й растровою графікою, а також готують файл до подальшої обробки [2; 7].

Другим етапом є підготовка заготовки. Для лазерного гравіювання можуть використовуватися фанера, деревина, картон, шкіра, пластик, папір та інші матеріали, придатні для обробки відповідним типом обладнання. Учні повинні підготувати поверхню заготовки, очистити її від пилу, а за потреби – здійснити шліфування чи інші попередні операції. Цей етап є важливим, оскільки підкреслює нерозривний зв’язок цифрового виробництва з традиційною матеріалообробкою.

Третій етап передбачає налаштування верстата й позиціювання заготовки. Учні розміщують заготовку на робочому столі, задають положення лазера, встановлюють основні параметри роботи – швидкість, потужність, інтенсивність випромінювання, кількість проходів. Саме тут особливо активно формуються технічні вміння, уважність до деталей і здатність прогнозувати технологічний результат [1; 4].

Четвертий етап – безпосереднє виконання гравіювання або різання. Після запуску програми верстат працює автономно відповідно до заданого файлу, а учні здійснюють спостереження за процесом, контролюють його безпечність і оцінюють проміжний результат. На цьому етапі важливо не лише дотримуватися правил безпеки, а й розуміти причинно-наслідкові зв’язки між цифровими налаштуваннями та якістю обробки.

П’ятий етап пов’язаний з опорядженням виробу. Учні очищують поверхню від продуктів горіння, за потреби виконують складання елементів, лакування чи інші оздоблювальні операції. Таким чином завершується повний цикл створення виробу, а учні переконуються, що якісний кінцевий результат залежить не лише від цифрової точності обладнання, а й від культури виконання ручних операцій.

Лазерний гравіювальний верстат з ЧПК відкриває широкі можливості для організації творчої проєктної діяльності учнів. У межах декоративно-прикладного напряму можна виготовляти шкатулки з орнаментальним гравіюванням, декоративні панно, серветниці, підставки під чашки, вішалки для ключів та інші вироби, що поєднують цифрову обробку з ручним опорядженням. У межах сувенірного напряму можливе створення іменних табличок, брелоків, магнітів, закладок для книг тощо. Такі вироби є цінними в мотиваційному плані, оскільки мають персоналізований і практично значущий характер [6].

Перспективним є також навчально-дидактичний напрям, у межах якого

учні можуть виготовляти пазли, головоломки, навчальні схеми, інформаційні таблички для кабінетів, елементи наочності для молодших класів. Подібна діяльність надає проєктам додаткової соціальної значущості та сприяє формуванню відповідальності за результат праці [5]. Ще одним напрямом є створення елементів настільних ігор, ігрових полів, фішок, авторських комплектів для дозвілля, що потребує від учнів поєднання технічного, композиційного та системного мислення.

Використання лазерного верстата може бути ефективним у різних формах організації освітнього процесу. В урочній діяльності він доцільний для ознайомлення з будовою та принципом роботи обладнання, правилами безпеки, основами підготовки файлів і виконання нескладних практичних завдань. У позаурочній діяльності, зокрема в гуртках технічної творчості, факультативах і STEM-об’єднаннях, з’являються ширші можливості для опанування спеціалізованого програмного забезпечення, виконання складніших проєктів і тривалішого експериментування з матеріалами та режимами роботи [2].

Значний потенціал має проєктна форма організації навчання. Індивідуальні проєкти дають змогу кожному учневі реалізувати власну ідею, тоді як групові проєкти сприяють розвитку співпраці, комунікації й розподілу функцій у спільній діяльності. Особливо цінними є проєкти з практичним результатом, орієнтованим на потреби освітнього середовища, оскільки вони підсилюють мотивацію учнів і допомагають пов’язати навчання з реальним життям [2; 5].

Додаткові можливості відкриває змішане навчання. Підготовка графічних файлів, ескізів і проєктних рішень може здійснюватися учнями вдома за допомогою доступного програмного забезпечення, тоді як безпосередня робота з верстатом відбувається у майстерні під керівництвом учителя. Такий підхід забезпечує раціональне використання часу уроку й дає

змогу зосередити практичну діяльність у школі саме на роботі з обладнанням та аналізі технологічного результату [2; 7].

Таким чином, лазерний гравіювальний верстат з ЧПК доцільно розглядати не лише як технічний засіб, а як педагогічний інструмент, що поєднує проєктування, цифрове моделювання, матеріалообробку, творчість і практичне виготовлення виробів. Його ефективність у навчальному процесі визначається не самим фактом наявності обладнання, а методично виваженою організацією роботи учнів, поєднанням цифрових і традиційних технологій, а також спрямованістю навчання на формування компетентностей, значущих для сучасного технологічного суспільства.

Висновки. Проведене дослідження дає підстави стверджувати, що лазерний гравіювальний верстат з числовим програмним керуванням має значний освітній потенціал у системі технологічної підготовки учнів закладів загальної середньої освіти.

На основі аналізу наукових джерел і теоретичного узагальнення підходів до використання цифрового виробничого обладнання в освіті встановлено, що застосування лазерного гравіювального верстата з ЧПК сприяє розвитку творчих і цифрових компетентностей учнів, а також позитивно впливає на формування інженерно-технічних, комунікативних і профорієнтаційних умінь. Освітня цінність цього обладнання полягає у можливості поєднувати цифрове проєктування з реальним виготовленням виробів, що забезпечує цілісний характер навчальної діяльності.

Обґрунтовано, що педагогічно доцільне використання лазерного гравіювального верстата з ЧПК передбачає його інтеграцію у проєктну діяльність учнів, поєднання урочних і позаурочних форм роботи, дотримання вимог безпеки, а також опору на вже сформовані базові вміння ручної обробки матеріалів. У цьому контексті найбільш перспективним є застосування такого обладнання переважно у старших класах, де учні мають

достатній рівень готовності до поєднання проєктувальної, технічної та практичної діяльності.

Показано, що лазерний верстат з ЧПК не повинен витісняти традиційні види ручної праці, а має використовуватися як засіб їх змістового й технологічного розширення. Саме поєднання цифрових і традиційних технологій забезпечує найбільш повну реалізацію його освітнього потенціалу.

Перспективи подальших досліджень пов’язані з розробленням цілісної методики навчання учнів роботі з лазерним гравіювальним верстатом з ЧПК, створенням системи практичних завдань різного рівня складності, визначенням критеріїв оцінювання навчальних досягнень, а також із вивченням можливостей інтеграції лазерних технологій у міжпредметні STEM-проєкти та систему підготовки вчителів технологій до роботи з цифровим виробничим обладнанням.

Література

1. Koprda Š., Balogh Z., Magdin M., Reichel J., Molnár G. The possibility of creating a low-cost laser engraver CNC machine prototype with platform Arduino. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020. Vol. 17, No. 9. P. 181–198. DOI: https://doi.org/10.12700/APH.17.9.2020.9.10

2. Cai R., Chiang F. A laser-cutting-centered STEM course for improving engineering problem-solving skills of high school students in China. *STEM Education*. 2021. Vol. 1, No. 3. P. 199–224. DOI: https://doi.org/10.3934/steme.2021015

3. Soomro S. A., Casakin H., Nanjappan V., Georgiev G. V. Makerspaces fostering creativity: a systematic literature review. *Journal of Science Education and Technology*. 2023. Vol. 32, No. 4. P. 530–548. DOI: https://doi.org/10.1007/s10956-023-10041-4

4. Kurniawan R., Wijanarka B. S. Analysis of the ability to develop CNC machine part programs for vocational high school students in Indonesia. *European Journal of Education and Pedagogy*. 2023. Vol. 4, No. 4. P. 59–63. DOI: https://doi.org/10.24018/ejedu.2023.4.4.715

5. Eldebeky S. M. *How state-of-the-art makerspace stations contribute to differences in students' learning: a mixed methods case study of a bilingual high school in Kuwait* : doctoral dissertation / Lancaster University. Lancaster, 2023. DOI: https://doi.org/10.17635/lancaster/thesis/2006

6. Jap Tji Beng, Sri Tiatri, Margareta Zheng, Rahmiyana Nurkholiza, Vienchenzia Dinatha, Tasya Mulia Salsabila. Development of a training model on the use of laser engraving technology for vocational high school female students in semi-urban areas: gender equality in education. *TEM Journal*. 2025. Vol. 14, No. 2. P. 1860–1866. DOI: https://doi.org/10.18421/TEM142-82

7. Shkitsa L., Yatsyshyn T., Kornuta V., Deinega I., Boiko N. Innovative educational and production laboratories at the technical university. *Digital Technologies in Education* / eds. R. Shchokin, A. Iatsyshyn, V. Kovach, A. Zaporozhets. Cham : Springer, 2024. P. 67–81. (Studies in Systems, Decision and Control ; vol. 529). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57422-1_6

References

1. Koprda, Š., Balogh, Z., Magdin, M., Reichel, J., & Molnár, G. The possibility of creating a low-cost laser engraver CNC machine prototype with platform Arduino. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2020, vol. 17, no. 9, pp. 181–198. DOI: https://doi.org/10.12700/APH.17.9.2020.9.10

2. Cai, R., & Chiang, F. A laser-cutting-centered STEM course for improving engineering problem-solving skills of high school students in China. *STEM Education*, 2021, vol. 1, no. 3, pp. 199–224. DOI: https://doi.org/10.3934/steme.2021015

3. Soomro, S. A., Casakin, H., Nanjappan, V., & Georgiev, G. V. Makerspaces fostering creativity: a systematic literature review. *Journal of Science Education and Technology*, 2023, vol. 32, no. 4, pp. 530–548. DOI: https://doi.org/10.1007/s10956-023-10041-4

4. Kurniawan, R., & Wijanarka, B. S. Analysis of the ability to develop CNC machine part programs for vocational high school students in Indonesia. *European Journal of Education and Pedagogy*, 2023, vol. 4, no. 4, pp. 59–63. DOI: https://doi.org/10.24018/ejedu.2023.4.4.715

5. Eldebeky, S. M. *How state-of-the-art makerspace stations contribute to differences in students' learning: a mixed methods case study of a bilingual high school in Kuwait*. Doctoral dissertation. Lancaster University, 2023. DOI: https://doi.org/10.17635/lancaster/thesis/2006

6. Jap Tji Beng, Sri Tiatri, Margareta Zheng, Rahmiyana Nurkholiza, Vienchenzia Dinatha, & Tasya Mulia Salsabila. Development of a training model on the use of laser engraving technology for vocational high school female students in semi-urban areas: gender equality in education. *TEM Journal*, 2025, vol. 14, no. 2, pp. 1860–1866. DOI: https://doi.org/10.18421/TEM142-82

7. Shkitsa, L., Yatsyshyn, T., Kornuta, V., Deinega, I., & Boiko, N. Innovative educational and production laboratories at the technical university. In: R. Shchokin, A. Iatsyshyn, V. Kovach, & A. Zaporozhets (Eds.), *Digital Technologies in Education*. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 529. Cham: Springer, 2024, pp. 67–81. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57422-1_6