

В. А. ДЕРБАБА, В. А. КОЗЕНКО, О. О. БОГДАНОВ, В. І. КОЗЕНКО, С. В. АЛЕКСЄЄНКО

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ ЗАСОБІВ ОБРОБІТКУ ГРУНТУ

У статті розглянуто можливості застосування адитивних технологій у процесі проєктування та вдосконалення засобів обробітку ґрунту на прикладі перспективного лісового культиватора, призначеного для експлуатації в умовах нерозкорчованих вирубок. Наведено класифікацію обладнання для 3D-друку за рівнем його доступності та функціонального призначення, що охоплює споживчий, персональний, професійний і виробничий класи, а також виконано порівняльний аналіз сучасних систем 3D-друку за вартістю з орієнтацією на умови європейського ринку. Показано, що персональні 3D-принтери за своїми технічними характеристиками та економічними показниками є доцільною альтернативою дорогим професійним установкам для використання в освітніх і науково-дослідних закладах.

У межах дослідження розроблено тривимірну твердотільну модель лісового культиватора в середовищі CAD-системи SolidWorks та здійснено її підготовку до адитивного виготовлення в програмному забезпеченні Simplify3D. Описано послідовність технологічних операцій, що включає орієнтацію деталей у робочому об'ємі принтера, масштабування, налаштування параметрів друку, генерацію підтримок і формування керувального G-коду. Запропоновано підхід до поділу вихідної цифрової моделі на окремі функціональні вузли з урахуванням обмежень робочої камери 3D-принтера, особливостей спряження елементів і необхідності забезпечення рухомості основних вузлів макета. У результаті проведено адитивне виготовлення масштабованої моделі культиватора в масштабі 1:20 із використанням екструзійної технології друку. Отриманий макет відтворює конструктивну будову, просторове компонування та взаємне розташування основних вузлів машини, зберігаючи рухомість секцій робочих органів, елементів підвіски й запобіжних механізмів. Показано, що наявність функціональних рухомих з'єднань дає змогу імітувати реальні робочі рухи знаряддя, аналізувати його кінематику, траєкторії переміщення робочих органів, характер взаємодії вузлів між собою, а також оцінювати вплив різних варіантів компонування на функціональні параметри конструкції.

Окрему увагу приділено аналізу двох основних варіантів компонування культиватора, призначених для суцільного обробітку міжрядь лісових культур і для доглядів методом осідлання рядка. Наведено їх конструктивні особливості, параметри розміщення секцій робочих органів і ширини оброблюваних смуг, а також обґрунтовано універсальність запропонованої модульної схеми. Результати імітаційних досліджень свідчать про здатність культиватора надійно долати перешкоди у вигляді пнів заввишки до 38 см за глибини обробітку 12 см, що підтверджує доцільність використання такої конструкції в умовах нерозкорчованих вирубок. Показано, що застосування 3D-макетування на ранніх етапах проєктування дає змогу виявляти конструктивні недоліки та нераціональні компонувальні рішення ще до виготовлення повнорозмірного дослідного зразка, істотно скорочуючи часові й матеріальні витрати на доведення конструкції. Обґрунтовано можливість використання масштабованого фізичного макета не лише як демонстраційного засобу, а й як функціонального експериментального стенда для верифікації результатів імітаційного моделювання, уточнення параметрів математичних і кінематичних моделей та підвищення достовірності прогнозування роботи культиватора.

Відзначено освітній і мотиваційний потенціал адитивних технологій, які дозволяють інтегрувати сучасні CAD/CAM-рішення в навчальний процес, підвищити наочність інженерних дисциплін і залучити студентів до активної науково-дослідної та винахідницької діяльності. У цілому результати дослідження підтверджують перспективність використання технологій 3D-друку як інструменту візуалізації, інженерного аналізу та оптимізації конструктивних рішень у галузі проєктування засобів обробітку ґрунту, зокрема для лісогосподарських машин, орієнтованих на застосування в межах еколого-ресурсозберігаючих технологій.

Ключові слова: 3D-друк, адитивні технології, ґрунтообробні машини, лісовий культиватор, прототипування, CAD-моделювання, Simplify3D, екструзійний друк, компонування, кінематика.

V. DERBABA, V. KOZENKO, O. BOHDANOV, V. KOZENKO, S. ALEKSIEIENKO

USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF SOIL TILLAGE EQUIPMENT

The article considers the possibilities of applying additive technologies in the process of designing and improving soil tillage equipment using the example of a promising forest cultivator intended for operation under conditions of ungrubbed clear-cut areas. A classification of 3D printing equipment by accessibility level and functional purpose is presented, covering consumer, personal, professional, and industrial classes. A comparative analysis of modern 3D printing systems in terms of cost is carried out with reference to the European market conditions. It is shown that personal 3D printers, in terms of their technical characteristics and economic indicators, represent a feasible alternative to expensive professional systems for use in educational and research institutions.

Within the framework of the study, a three-dimensional solid model of a forest cultivator was developed in the SolidWorks CAD environment and prepared for additive manufacturing using the Simplify3D software. The sequence of technological operations is described, including part orientation within the printer's build volume, scaling, print parameter setup, support generation, and G-code creation. An approach to dividing the original digital model into separate functional units is proposed, taking into account the limitations of the printer's build chamber, the mating features of elements, and the need to ensure the mobility of the main assemblies of the scale model.

As a result, a scaled cultivator model at a 1:20 scale was additively manufactured using extrusion-based printing technology. The obtained mock-up reproduces the structural design, spatial layout, and mutual arrangement of the main machine components while maintaining the mobility of the working tool sections, suspension elements, and safety mechanisms. It is shown that the presence of functional movable joints makes it possible to simulate real working motions of the implement, analyze its kinematics, the trajectories of working tool movements, the interaction between individual units, and assess the influence of different layout configurations on the functional parameters of the design. Special attention is paid to the analysis of two main cultivator layout variants intended for continuous inter-row tillage of forest plantations and for row-straddling maintenance operations. Their design features, parameters of working tool section placement, and widths of the processed strips are presented, and the versatility of the proposed modular scheme is substantiated. The results of simulation studies indicate the cultivator's ability to reliably overcome obstacles in the form of stumps up to 38 cm high at a tillage depth of 12 cm, which confirms the feasibility of using such a design under conditions of ungrubbed clear-cut areas.

It is shown that the application of 3D mock-up prototyping at early design stages makes it possible to identify design shortcomings and irrational layout solutions before manufacturing a full-scale prototype, significantly reducing time and material costs for further refinement of the design. The possibility of using the scaled physical model not only as a demonstration tool but also as a functional experimental test bench for verifying simulation results, refining the parameters of mathematical and kinematic models, and increasing the reliability of performance prediction for the cultivator is substantiated.

The educational and motivational potential of additive technologies is also highlighted, as they enable the integration of modern CAD/CAM solutions into the educational process, enhance the visual clarity of engineering disciplines, and involve students in active research and inventive activities.

Overall, the results of the study confirm the prospects of using 3D printing technologies as a tool for visualization, engineering analysis, and optimization of design solutions in the field of soil tillage equipment design, particularly for forestry machinery intended for application within environmentally friendly and resource-saving technologies.

Keywords: 3D printing, additive technologies, soil tillage machinery, forest cultivator, prototyping, CAD modeling, Simplify3D, extrusion printing, layout design, kinematics.

Вступ. З моменту появи перших комп'ютерів людина невпинно прагнула подолати межу між реальним і віртуальним світом, перетворивши цифрові об'єкти на фізичну реальність. Можливість швидкого та точного перенесення моделі з тривимірного комп'ютерного середовища в відчутний тривимірний об'єкт ще донедавна здавалася нездійсненною мрією інженерів, дизайнерів, архітекторів та представників багатьох інших професій. Однак розвиток адитивних технологій дозволив суттєво наблизитися до практичної реалізації цієї ідеї. Саме таким технологіям і присвячена дана стаття.

Нині одним із найшвидших, найдоступніших і найефективніших способів «матеріалізації» 3D-моделей є 3D-друк. Він дає змогу в стислі строки отримувати фізичні прототипи, функціональні деталі та навіть готові вироби на основі цифрових даних. Для наочнішого уявлення можливостей сучасних адитивних установок доцільно здійснити класифікацію 3D-принтерів за рівнем їх доступності та функціонального призначення (рис. 1).

Аналіз основних досягнень та літератури. Споживчий клас охоплює принтери, призначені насамперед для особистого використання в домашніх умовах або в освітніх цілях. Ці пристрої проєктуються з орієнтацією на невідготовленого користувача та, як правило, оснащуються інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, автоматизованими системами калібрування й спрощеними налаштуваннями друку. У більшості випадків такі принтери працюють з найпоширенішими термопластами, передусім ABS і PLA, що робить їх експлуатацію відносно недорогою та безпечною. Основними сферами їх застосування є хобі-проекти, навчальні завдання, а також виготовлення простих прототипів і декоративних елементів.



Рис. 1 – Класифікація 3D-принтерів

Персональний клас становить прикордонну категорію між побутовими та промисловими рішеннями. Ці принтери за форм-фактором і зручністю експлуатації багато в чому подібні до споживчих моделей, однак вирізняються вищою якістю складання, удосконаленою кінематикою, стабільністю роботи та підвищеною точністю друку. Завдяки цьому вони знаходять застосування в малому бізнесі, дизайнерських студіях та інженерних бюро для виготовлення складніших прототипів і дрібносерійних виробів. За своїми характеристиками персональні принтери значною мірою наближаються до молодшого сегмента професійних систем.

Професійний клас об'єднує установки, у яких реалізовані найсучасніші досягнення в галузі адитивних технологій. Такі принтери характеризуються високою точністю позиціонування, стабільністю параметрів друку, розширеним набором підтримуваних матеріалів і розвиненим програмним забезпеченням. Сфера їх застосування надзвичайно широка та охоплює як швидке прототипування, так і виготовлення функціональних деталей для машинобудування, медицини, електроніки й інших галузей. Професійні системи часто

використовуються в наукових дослідженнях і дослідно-конструкторських роботах, де висувуються підвищені вимоги до відтворюваності результатів і якості поверхні виробів.

Виробничий клас охоплює великогабаритні та високоавтоматизовані установки, призначені для промислового застосування. Ці машини поєднують у собі точність і якість, характерні для професійних принтерів, із збільшеною областю друку, високою продуктивністю та розвиненим рівнем автоматизації технологічного процесу. На таких установках можливе виготовлення не лише прототипів, а й готових споживчих виробів, придатних для безпосереднього використання або подальшого складання. Виробничі 3D-принтери дедалі частіше інтегруються в реальні виробничі лінії, що дозволяє розглядати їх як повноцінну альтернативу традиційним методам формоутворення в низці галузей [3].

Водночас створення прототипів є лише початковим етапом використання адитивних технологій. Наступною стадією виступає швидке виробництво готових виробів. Уже сьогодні системи 3D-друку дають змогу отримувати функціональні деталі з різних матеріалів, включно з пластиками, композитами та металами, що суттєво розширює сферу їх практичного застосування. Такий підхід є особливо доцільним для одиничного та дрібносерійного виробництва, оскільки з'являється можливість у відносно короткі терміни освоювати широкий асортимент продукції без значних витрат на виготовлення прес-форм, штампів або складного технологічного оснащення.

На сучасному етапі системи 3D-друку набули широкого поширення в багатьох галузях. Вони активно використовуються в дизайні та архітектурі для створення макетів і концептуальних моделей, у сфері освіти як наочний інструмент для навчання інженерним і технічним дисциплінам, в одиничному та дрібносерійному виробництві для виготовлення дослідних і експериментальних зразків, у медицині для створення анатомічних моделей, імплантів і хірургічних шаблонів, у функціональному тестуванні, ювелірній справі, виробництві сувенірної продукції, стоматології та низці інших напрямів. Така універсальність зумовлює стрімке зростання популярності адитивних технологій у наукових і промислових колах.

За принципом роботи сучасні 3D-принтери умовно поділяють на кілька основних класів, кожен з яких ґрунтується на власній технологічній концепції формування виробу шляхом пошарового нарощування матеріалу. Саме ці класи визначають характерні особливості обладнання, типи використовуваних матеріалів, точність друку та сфери практичного застосування, що зумовлює доцільність їх подальшого детального розгляду.

Лазерні 3D-моделювальні пристрої належать до класу адитивних установок, у яких формування виробу здійснюється за рахунок локального впливу лазерного випромінювання на вихідний матеріал. У процесі роботи такого принтера на робочу платформу пошарово наноситься тонкий шар рідкого фотополімеру, здатного до швидкого тверднення під дією світла певної довжини хвилі. Після нанесення кожного шару поверхня матеріалу селективно опромінюється лазерним променем саме в тих зонах, де відповідно до цифрової моделі має сформуватися контур майбутнього виробу. Під впливом лазерного випромінювання фотополімер переходить із рідкого стану в твердий, утворюючи міцний і геометрично точний фрагмент конструкції.

Цей цикл пошарового нанесення фотополімеру та його лазерного тверднення багаторазово повторюється до завершення формування останнього шару. Після цього отриманий тривимірний об'єкт вилучається з ванни з рідким фотополімером і, як правило, піддається додатковій післяобробці, що може включати промивання в розчиннику, ультрафіолетове доотверднення та механічне очищення поверхні від залишків смоли. Лазерні фотополімерні 3D-принтери (технологія SLA) вирізняються високою точністю друку, можливістю відтворення дрібних деталей і гладкою поверхнею виробів, що робить їх особливо затребуваними в ювелірній справі, стоматології, медицині, мікроінженерії та під час виготовлення високоточних прототипів.

Окрім фотополімерних систем, існують лазерні 3D-принтери, у яких як вихідний матеріал використовується металевий або полімерний порошок. У таких установках (технології SLS, SLM, DMLS) на робочу платформу також пошарово наноситься тонкий шар порошку, який потім селективно спікається або плавиться лазерним променем відповідно до заданої геометрії моделі. Під дією високої температури частинки порошку зв'язуються між собою, утворюючи тверду структуру. Після завершення друку надлишковий незв'язаний порошок видаляється, а готовий виріб може додатково оброблятися термічно або механічно для підвищення міцності та точності розмірів. Такі лазерні системи широко застосовуються в машинобудуванні, авіакосмічній промисловості та медицині для виготовлення функціональних деталей із металів і високоміцних полімерів.

Струминні 3D-принтери належать до класу адитивних установок, у яких процес формування виробу за своєю конструктивною схемою багато в чому нагадує роботу традиційного струминного принтера. Ключова відмінність полягає в тому, що замість нанесення чорнил на пласку поверхню використовується механізм пошарового розподілу порошкоподібного або рідкого матеріалу, здатного до подальшого тверднення чи полімеризації. Формування об'єкта відбувається шляхом послідовного нанесення тонких шарів вихідного матеріалу на робочу платформу з подальшим локальним зміцненням у строго визначених зонах.

Після створення кожного шару струминна друкувальна головка подає полімеризувальну добавку, зв'язувальну речовину або інший активатор тверднення саме на тих ділянках, де матеріал має затвердіти й утворити контури майбутнього виробу. У результаті в межах одного шару формується тверда структура, тоді як навколишній матеріал залишається в пухкому або неполімеризованому стані та виконує функцію природної

підтримки для наступних шарів. Такий цикл пошарового нанесення матеріалу та його селективного тверднення багаторазово повторюється до повного завершення формування тривимірного об'єкта всередині об'єму неполімеризованого порошкоподібного середовища.

Як витратні матеріали в струминних 3D-принтерах часто застосовуються гіпсові, полімерні або композитні порошки, а також спеціальні зв'язувальні склади. Одним із поширених варіантів є використання гіпсу, який твердне під час контакту зі звичайними водними чорнилами або спеціально підібраними водними розчинами, що подаються через друкувальну головку. Такий підхід дає змогу отримувати моделі з відносно високою точністю геометрії та гладкою поверхнею, що робить струминні 3D-принтери затребуваними в архітектурному макетуванні, дизайні, ювелірній справі та під час виготовлення наочних демонстраційних зразків.

До переваг струминної технології належать висока швидкість друку, можливість одночасного формування складних внутрішніх порожнин без використання додаткових підтримок, а також відносна простота післяобробки виробів. Водночас такі принтери зазвичай забезпечують меншу механічну міцність готових деталей порівняно з методами лазерного спікання або екструзійного друку, що обмежує сферу їх застосування переважно прототипуванням і візуальним моделюванням, а не функціональним виробництвом.

3D-принтери, що працюють за принципом екструзії пластику, належать до найпоширенішого та найдоступнішого класу адитивних установок. У таких пристроях вихідний полімерний матеріал у вигляді нитки (філаменту) подається в екструдер, де він нагрівається до температури плавлення та переходить у в'язкотекучий стан. Після цього розплав полімеру пошарово наноситься на робочу платформу у формі безперервного струменя діаметром від кількох десятків міліметра до кількох міліметрів, залежно від діаметра сопла та заданих параметрів друку.

Формування виробу здійснюється за рахунок послідовного накладання тонких шарів матеріалу, які, злипаючись і дифундуючи між собою в розплавленому стані, утворюють монолітну структуру. Кожен новий шар наноситься поверх попереднього відповідно до геометрії цифрової 3D-моделі, що дає змогу відтворювати як прості, так і досить складні просторові форми. У міру охолодження й тверднення полімеру сформовані шари набувають необхідної механічної міцності та стабільності розмірів.

Рух екструдера в процесі друку керується трикоординатною кінематичною системою, подібною за принципом дії до систем, що застосовуються на гравірувально-фрезерних верстатах із числовим програмним керуванням. Така система забезпечує точне позиціонування друкувальної головки по осях X, Y і Z, що визначає геометричну точність і відтворюваність отриманих виробів. Як витратні матеріали в екструзійних 3D-принтерах найчастіше використовуються термопласти PLA, ABS, PETG, Nylon та їх композити, що робить цю технологію універсальною для прототипування, навчання й виготовлення функціональних деталей в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва [3, 5].

Проведемо детальний ціновий аналіз сучасних систем 3D-друку (рис. 2), який дає змогу оцінити їх доступність для науково-дослідних установ, освітніх закладів і малих інженерних колективів. На сьогодні спостерігається суттєвий розрив між персональними та професійними 3D-принтерами за рівнем їх вартості, що істотно впливає на можливості їх упровадження в навчальний і дослідницький процес. Так, середня ціна персональних 3D-принтерів на європейському ринку коливається в межах 1 200–2 000 євро залежно від бренду, технічних характеристик, об'єму робочої камери та підтримуваних матеріалів. Водночас навіть бюджетні моделі професійних 3D-принтерів мають вартість, що починається орієнтовно від 7 000–10 000 євро, а для установок середнього та високого класу може сягати 20 000–50 000 євро і більше.

Такий ціновий дисбаланс зумовлює істотні обмеження для малих дослідницьких лабораторій, університетських кафедр і технікумів, бюджет яких не дозволяє здійснювати великі капітальні вкладення в дорогі адитивні системи. Унаслідок цього придбання професійного 3D-принтера часто стає серйозним фінансовим тягарем, що потребує залучення грантових коштів або спеціальних програм фінансування. Водночас персональні 3D-принтери за умови грамотного налаштування та вибору оптимальних режимів друку здатні забезпечити цілком прийнятну якість виготовлення моделей із термопластичних матеріалів, достатню для цілей прототипування, навчальних експериментів і попереднього аналізу конструктивних рішень. Саме це робить їх особливо привабливими для освітніх і науково-дослідних цілей, де важливими є не лише технічні параметри, а й економічна доцільність упровадження технології [4].

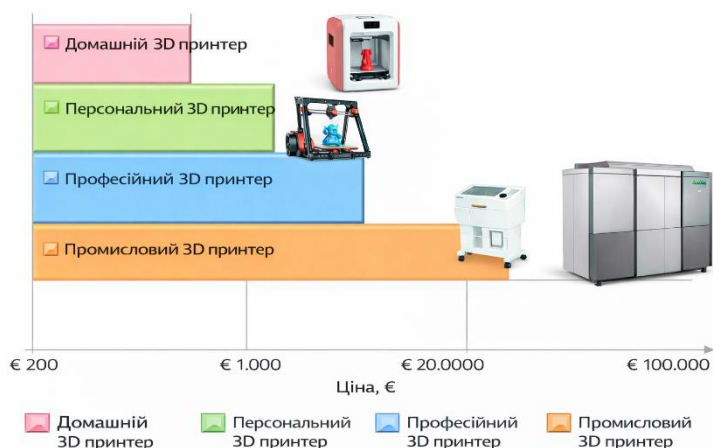


Рис. 2 – Порівняння цінних категорій 3D-принтерів

Мета дослідження, постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку машинобудування, зокрема в галузі проектування ґрунтообробної та лісогосподарської техніки, характеризуються зростанням вимог до скорочення термінів розроблення нових виробів, зниження матеріальних витрат на виготовлення дослідних зразків і підвищення точності інженерних рішень на ранніх етапах проектування. Традиційні методи створення повнорозмірних макетів і прототипів ґрунтообробних знарядь потребують значних фінансових ресурсів, тривалого виробничого циклу та залучення спеціалізованого обладнання, що істотно обмежує можливості оперативного внесення змін у конструкцію й ускладнює відпрацювання альтернативних компоувальних рішень.

Особливої актуальності ця проблема набуває під час розроблення нових типів лісових культиваторів, призначених для роботи в умовах нерозкорчованих вирубок, де конструкція знаряддя повинна поєднувати високу прохідність, надійність, адаптивність до складного рельєфу та мінімальний антропогенний вплив на ґрунтовий покрив. У таких умовах помилки в компоуванні робочих органів, недосконалість кінематичних схем або нераціональні конструктивні рішення можуть призводити до суттєвого зниження ефективності роботи машини, збільшення навантажень на окремі вузли та зростання експлуатаційних витрат.

Водночас розвиток адитивних технологій і доступність персональних 3D-принтерів відкривають нові можливості для створення масштабних фізичних макетів складних машин і механізмів, які можуть використовуватися як інструмент візуалізації, попереднього інженерного аналізу та експериментального відпрацювання конструктивних рішень. Проте методичні підходи до інтеграції 3D-макетування в процес проектування ґрунтообробних знарядь, зокрема лісових культиваторів, на сьогодні залишаються недостатньо опрацьованими, а практичні приклади системного використання таких технологій у навчально-науковому середовищі мають поодинокий характер.

У зв'язку з цим виникає науково-прикладна проблема, що полягає в обґрунтуванні доцільності застосування адитивних технологій для створення масштабних макетів ґрунтообробних машин, розробленні раціональної методики їх проектування та виготовлення, а також оцінюванні можливостей використання таких макетів для аналізу кінематики, компоування і функціональних характеристик перспективних конструкцій.

Метою даного дослідження є обґрунтування ефективності використання технологій 3D-друку в процесі проектування засобів обробки ґрунту на прикладі лісового культиватора, розроблення та виготовлення його масштабної фізичної моделі, а також оцінювання можливостей застосування отриманого макета для візуалізації конструктивних рішень, аналізу кінематики робочих органів і оптимізації схем їх компоування. Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких основних завдань: розроблення тривимірної CAD-моделі культиватора; підготовку її до адитивного виготовлення; створення масштабного макета з використанням екструзійної технології 3D-друку; аналіз конструктивних і кінематичних можливостей отриманої моделі; а також оцінювання перспектив інтеграції 3D-макетування в навчальний і науково-дослідний процес.

Матеріали дослідження. Виходячи з наведених міркувань, у Вищій школі комунікації та управління в Познані (Польща) було ухвалено рішення про придбання 3D-принтера екструдерного типу Ultimaker S3, який зарекомендував себе на європейському ринку як надійний і технологічно зрілий пристрій з оптимальним співвідношенням «ціна – якість». Даний принтер вирізняється стабільною кінематикою, високою точністю позиціонування, підтримкою широкого спектра термопластів і розвиненим програмним забезпеченням, що робить його придатним для використання в навчальних лабораторіях і дослідницьких центрах. Його придбання дозволило суттєво розширити матеріально-технічну базу закладу та інтегрувати адитивні технології в освітній процес і наукові дослідження.

Зазначений 3D-принтер було використано для створення макета 3D-моделі перспективного лісового культиватора (рис. 3), призначеного для застосування в межах еколого-ресурсозберігаючих технологій, що

виключають корчування пнів і спрямовані на мінімізацію антропогенного впливу на лісові екосистеми [1, 2]. Використання адитивних технологій у даному випадку дало змогу в стислі строки отримати наочний і функціонально повноцінний макет, придатний для детального аналізу компоувальних рішень, оцінювання взаємного розташування елементів і перевірки кінематики робочих органів культиватора. Це, у свою чергу, дозволило виявити потенційні конструктивні недоліки ще на етапі проектування та скоригувати окремі вузли без значних додаткових витрат.

Розглянемо детальніше конструкцію культиватора, реалізовану в цифровій моделі та відтворену у вигляді 3D-макета. Культиватор складається зі зчпного пристрою 1, рами 2, що включає основну раму 3 і верхню раму 4, з'єднані між собою чотирма стійками 5, кронштейна кріплення робочого органа 6, запобіжного механізму 7, розміщеного в корпусі 8, стійки в зборі зі ступицею 9 та сферичних дисків 10. Така модульна структура забезпечує не лише достатню жорсткість конструкції, а й гнучкість у формуванні різних варіантів компоування робочих органів залежно від виконуваної технологічної операції.

Особливістю даної конструкції є можливість реалізації кількох конфігурацій розміщення робочих органів, що дозволяє адаптувати культиватор до різних умов експлуатації, типів ґрунту та технологічних завдань. Зокрема, зміна положення сферичних дисків і налаштування параметрів їх взаємного розташування дає змогу регулювати глибину обробітку, інтенсивність руйнування ґрунтової кірки та характер формування борозен. Це підвищує універсальність машини й розширює можливості її застосування в лісгосподарських роботах, орієнтованих на відновлення вирубок без попереднього корчування пнів.

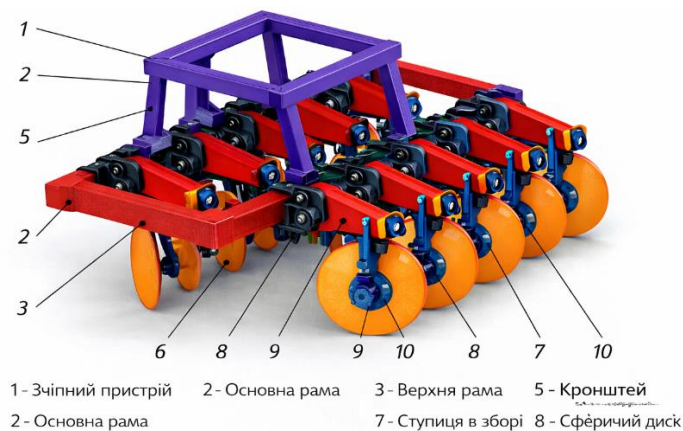


Рис. 3 – Макет культиватора виготовленний на принтері Ultimaker S3

У цілому результати проведеного аналізу та практичної апробації адитивних технологій свідчать про доцільність використання персональних 3D-принтерів у науково-дослідній і освітній діяльності як економічно обґрунтованої альтернативи дорогим професійним системам. Вони забезпечують достатній рівень точності й відтворюваності для завдань інженерного проектування, дають змогу значно скоротити терміни розробки дослідних зразків і сприяють формуванню сучасного технологічного середовища в закладах вищої освіти та дослідницьких центрах.

Перший варіант компоування культиватора орієнтований на виконання суцільного обробітку міжрядь лісових культур і призначений для ефективного пригнічення небажаної трав'янистої рослинності, а також неодерев'янілої порослі деревно-чагарникових видів. Така технологічна схема обробітку дає змогу істотно зменшити конкурентний вплив бур'янів на культурні насадження та створити більш сприятливі умови для їх росту й розвитку. У цій конфігурації на передньому брусі знаряддя встановлюються шість лівообертальних секцій, розміщених із міждисловою відстанню 280 мм між різальними крайками. Аналогічна кількість правообертальних секцій монтується на задньому брусі таким чином, щоб зони їх впливу перекривали одна одну й формували суцільну смугу обробітку. Таке розташування робочих органів забезпечує рівномірне розпушування ґрунту та підрізання рослинності по всій ширині захвату, виключаючи утворення необроблених ділянок. Загальна ширина оброблюваної смуги за цієї компоувки становить 2,7 м, що дає змогу використовувати культиватор для догляду за значними за площею лісокультурними ділянками з високою продуктивністю.

Другий варіант компоування культиватора розроблений для проведення доглядів методом «осідлання рядка» культур і спрямований на пригнічення рослинності в безпосередній близькості до культурних рослин за одночасного збереження захисної зони навколо них. Такий режим роботи є особливо актуальним на ранніх стадіях розвитку лісових культур, коли існує підвищений ризик їх механічного пошкодження. У цій конфігурації на передньому брусі знаряддя розміщуються по дві ліво- і правообертальні секції, встановлені за схемою «всвал» із міждисловою відстанню 280 мм між різальними крайками сусідніх дисків. При цьому формується центральна захисна зона шириною 600–700 мм, у межах якої відсутній вплив робочих органів. На задньому брусі встановлюються три ліво- і правообертальні секції, змонтовані за схемою «врозвал» на такій

самій міждисконній відстані та з центральною захисною зоною шириною 400–500 мм. Така компоновка дає змогу більш гнучко формувати профіль оброблюваної поверхні та адаптувати інтенсивність впливу на ґрунт залежно від положення відносно рядка культур. У результаті з обох боків рядка обробляються смуги шириною по 800 мм кожна, що забезпечує ефективне пригнічення бур'янів за збереження цілісності кореневої системи культурних рослин.

Проведені імітаційні дослідження на основі тривимірних твердотільних моделей показали, що прийнята конструктивна схема культиватора має високу прохідність і стійкість до динамічних навантажень, які виникають під час наїзду на перешкоди. Зокрема встановлено, що конструкція запобіжних механізмів і несучої рами забезпечує надійне подолання пнів заввишки до 38 см за глибини обробітку ґрунту 12 см без руйнування елементів конструкції та без суттєвого відхилення робочих органів від заданої траєкторії руху. Це свідчить про достатню адаптивність культиватора до експлуатації в умовах нерозкорчованих вирубок і ділянок із високою неоднорідністю рельєфу та ґрунтового покриття.

Конструктивні особливості культиватора дають змогу використовувати його як для суцільного обробітку міжрядь лісових культур, так і для виконання доглядів методом осідлання рядка, що істотно розширює спектр його технологічного застосування. Універсальність машини досягається за рахунок модульного принципу компонування робочих органів, за якого окремі секції можуть демонтуватися й установлюватися в різних комбінаціях залежно від конкретних умов роботи та поставлених агротехнічних завдань.

Переналадження культиватора зводиться виключно до операцій зі зняття та переустановлення секцій робочих органів у потрібну конфігурацію. Ці операції не потребують значних часових витрат і можуть виконуватися безпосередньо в польових умовах без залучення спеціалізованого обладнання або складного інструменту. Така технологічна простота обслуговування істотно знижує простоту техніки, підвищує коефіцієнт її використання та полегшує експлуатацію в межах сезонних лісогосподарських робіт.

У цілому реалізована конструктивно-технологічна концепція культиватора забезпечує поєднання високої функціональної гнучкості, надійності та експлуатаційної зручності. Це дає змогу розглядати його як перспективний засіб механізації доглядових робіт у лісових культурах, орієнтований на застосування в умовах еколого-ресурсозберігаючих технологій і мінімізації антропогенного впливу на ґрунтовий покрив.

Таким чином, для наочної демонстрації можливостей, закладених у конструкцію культиватора, створений макет має володіти здатністю імітації реального робочого процесу та всіх операцій з перекомпонування робочих органів, передбачених різними варіантами його компонування. Це, своєю чергою, потребує забезпечення не лише прийнятних міцнісних характеристик елементів конструкції, а й рухомості основних вузлів, що дає змогу відтворювати кінематику роботи знаряддя в умовах, наближених до експлуатаційних. Реалізація цих вимог можлива за рахунок раціонального конструктивного поділу вихідної тривимірної моделі на простіші й технологічніші елементи, зручні для адитивного виготовлення, подальшого складання та багаторазового демонтажу.

У розглянутому випадку друк макета здійснювався не у вигляді єдиного монолітного виробу, а у вигляді окремих вузлів, які були виокремлені ще на стадії проєктування з урахуванням їх функціонального призначення, габаритних обмежень робочої камери 3D-принтера, а також особливостей спряження та взаємного переміщення елементів. Такий підхід дозволив не лише спростити процес друку, а й забезпечити модульність конструкції макета, що є особливо важливим для демонстрації різних схем компонування робочих органів і проведення навчальних або дослідницьких експериментів.

Для виконання друку кожен із вузлів завантажувався в керувальну програму Simplify3D у форматі STL (рис. 4, а). На цьому етапі виконувалися операції з їх орієнтації в робочому об'ємі принтера, масштабування до заданого масштабу, а також налаштування ключових технологічних параметрів друку, зокрема висоти шару, швидкості екструзії, температури сопла й підігріваного стола, щільності заповнення та товщини зовнішніх стінок. Додатково проводилася оптимізація положення деталей з метою мінімізації об'єму підтримок, зниження ймовірності деформацій і поліпшення якості формування відповідальних геометричних елементів.

На наступному етапі програмне забезпечення автоматично генерувало керувальне завдання для 3D-принтера, що включало траєкторії руху екструдера, режими роботи обладнання, параметри пошарового формування та алгоритми розстановки підтримок у зонах із нависаючими елементами й складною просторовою геометрією (рис. 4, б). Сформований G-код дозволяв точно відтворити задану форму деталей, забезпечуючи стабільність процесу друку та відтворюваність результатів під час виготовлення однотипних елементів. Використання функції попереднього перегляду траєкторій у Simplify3D дало змогу на етапі підготовки завдання виявити потенційні дефекти друку, зокрема недостатню підтримку звисів, надмірну концентрацію матеріалу у вузьких зонах або ризик колізії сопла з уже сформованими елементами, і своєчасно скоригувати параметри процесу.

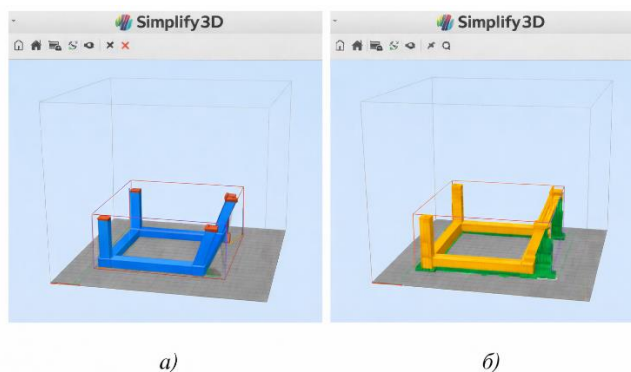


Рис. 4. – Частина моделі, завантажена в програму Simplify3D:
а – після масштабування 1:20; б – після генерації завдання з розстановкою підтримок

Після завершення адитивного виготовлення надруковані елементи за потреби піддавалися післяобробці, що включала видалення підтримок, механічне зачищення поверхонь у місцях контакту з опорами, локальну підгонку спряжених площин і отворів, а також контроль геометричних розмірів із використанням вимірювального інструменту. Ці операції дозволяли забезпечити необхідну точність складання та плавність переміщення рухомих вузлів без заїдань і перекосів.

Заключним етапом було ручне складання окремих вузлів у єдиний макет культиватора, у ході якого перевірялася рухомість основних елементів, точність посадок, співвісність обертових деталей і відповідність загальної геометрії складання проектній 3D-моделі. Додатково проводилася імітація робочих рухів культиватора, зокрема поворот секцій робочих органів, їх взаємне перекриття та зміна компонування відповідно до різних технологічних схем обробітку. Такий поетапний і технологічно вивірений підхід дозволив отримати функціонально наочний, конструктивно коректний і багаторазово трансформований макет, придатний для демонстрації принципу роботи культиватора, оцінювання його компонувальних рішень і використання в навчальних та науково-дослідних цілях.

На рис. 5 подано остаточний варіант моделі культиватора в масштабі 1:20, виготовлений із використанням технології адитивного виробництва на 3D-принтері. Отриманий макет є матеріальним втіленням розробленої тривимірної твердотільної моделі та значною мірою відтворює конструктивну будову, просторове компонування і взаємне розташування всіх основних вузлів культиватора. У процесі проєктування та подальшого виготовлення особливу увагу було приділено збереженню геометричних пропорцій, відносних розмірів елементів і характерних особливостей конструкції, що дало змогу забезпечити адекватність масштабної моделі реальному прототипу.

При цьому в макеті збережено рухомість усіх ключових елементів, зокрема секцій робочих органів, стійок, елементів кріплення дисків, вузлів підвіски та запобіжних механізмів. Таке конструктивне рішення забезпечує можливість імітації реальних робочих рухів і кінематики знаряддя, а також дає змогу відтворювати взаємодію окремих вузлів між собою за різних варіантів компонування. Завдяки цьому модель може використовуватися не лише як демонстраційний зразок, а й як функціональний експериментальний стенд для аналізу роботи механізму в умовах, наближених до експлуатаційних.



Рис. 5 – Фізичний макет, виготовлений методом 3D-друк

Наявність рухомих з'єднань і функціональних вузлів дає можливість наочно продемонструвати основні кінематичні характеристики культиватора, зокрема амплітуду й траєкторію переміщення робочих органів, висоту їх підйому під час наїзду на перешкоди, а також характер роботи запобіжних механізмів за дії зовнішніх навантажень. Це дозволяє візуально оцінити, яким чином відбувається перерозподіл зусиль у конструкції, які

елементи є найбільш навантаженими та як змінюється положення робочих органів залежно від профілю поверхні й умов обробітку ґрунту.

Використання масштабованого макета також надає широкі можливості для експериментального відпрацювання компоувальних рішень без необхідності виготовлення повнорозмірного дослідного зразка. Зокрема, на основі цієї моделі може здійснюватися оптимізація схем розміщення робочих органів на рамі, оцінювання ступеня їх перекриття в поперечному напрямку, перевірка зазорів між елементами конструкції, а також аналіз потенційних зон контакту й взаємних перешкод під час роботи в складних умовах, наприклад у разі наїзду на пні, каміння або інші перешкоди. Це дає змогу виявляти конструктивні недоліки на ранній стадії проєктування та вносити коригування в цифрову модель з мінімальними часовими й матеріальними витратами.

Крім того, виготовлена модель у масштабі 1:20 має значний навчально-методичний потенціал. Вона може використовуватися в освітньому процесі для наочної демонстрації принципів роботи ґрунтообробних знарядь, особливостей їх конструктивної схеми, а також переваг модульного компоування робочих органів. Така форма візуалізації істотно полегшує сприйняття складних інженерних рішень студентами та слухачами, підвищує якість навчання і сприяє формуванню практичних навичок аналізу конструкцій сільськогосподарських і лісгосподарських машин.

Таким чином, виготовлена модель культиватора в масштабі 1:20 є не просто зменшеною копією проєктованого знаряддя, а багатофункціональним дослідницьким і демонстраційним інструментом. Вона сприяє підвищенню ефективності проєктування, оптимізації конструктивних і компоувальних рішень, обґрунтуванню параметрів перспективного лісового культиватора та зниженню ризиків, пов'язаних із переходом від віртуальної моделі до повнорозмірного дослідного зразка.

Висновки. Таким чином, на підставі проведеного аналізу та практичної апробації адитивних технологій можна сформулювати такі узагальнювальні висновки. Використання макетів ґрунтообробних знарядь, виготовлених із застосуванням 3D-принтерів, дає змогу не лише наочно відтворити тривимірну цифрову модель у вигляді фізичного об'єкта, а й істотно розширює можливості інженерного аналізу на ранніх стадіях проєктування. Фізична візуалізація конструкції полегшує сприйняття просторового компоування, взаємного розташування вузлів і характерних особливостей механізму, що, своєю чергою, сприяє більш ефективному обговоренню та просуванню інженерних ідей у середовищі конструкторів, дослідників і потенційних замовників.

Окрім демонстраційної функції, масштабні 3D-макети створюють передумови для проведення прикладних досліджень кінематики та компоування виробу. Наявність рухомих елементів дає змогу аналізувати траєкторії переміщення робочих органів, характер їх взаємодії між собою, а також оцінювати вплив різних варіантів компоування на функціональні параметри знаряддя. Такий підхід робить можливим виявлення конструктивних недоліків і нераціональних рішень ще до виготовлення повнорозмірного дослідного зразка, що знижує часові й матеріальні витрати на наступні етапи проєктування та доведення конструкції.

Додатковою перевагою застосування 3D-макетування є його висока адаптивність і модульність. У разі потреби зміни окремих елементів конструкції або схеми їх розміщення коригування можуть бути оперативно внесені в цифрову модель із подальшим повторним виготовленням відповідних вузлів. Це забезпечує гнучкість проєктного процесу та дає змогу порівняно швидко тестувати альтернативні компоувальні рішення без суттєвих фінансових вкладень.

Слід також відзначити значний освітній і мотиваційний потенціал такого підходу. В умовах закладів освіти використання 3D-друкованих макетів дозволяє істотно підвищити наочність навчального матеріалу, зробити процес вивчення машин і механізмів більш інтерактивним і практикоорієнтованим. Участь студентів у розробці цифрових моделей, підготовці їх до друку, післяобробці та складанні макетів сприяє формуванню в них системного інженерного мислення, розвитку навичок роботи із сучасними CAD/CAM-технологіями та адитивним обладнанням, а також залученню до активної науково-дослідної й винахідницької діяльності.

У цілому застосування 3D-принтерів для створення макетів ґрунтообробних знарядь може розглядатися як перспективний і методично обґрунтований інструмент, що поєднує в собі функції візуалізації, інженерного аналізу та освітньої підтримки. Такий підхід сприяє прискоренню інноваційних процесів, підвищенню якості конструкторських рішень і формуванню сучасного технологічного мислення у майбутніх фахівців у галузі сільськогосподарського та лісгосподарського машинобудування.

Список літератури

1. Serhii Alekseyenko, Vladyslav Ruban, Vitalii Derbaba, Oleksandr Bohdanov & Serhii Patsera (2025). Justification of Digital Algorithmic Model Controlling the Radial Runout of Gear Wheels. 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2025) (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering; Publisher: Springer Nature). p181-191. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16
2. Проців В.В. Сучасні полімерні матеріали та технології в 3D-прінтингу / В.В. Проців, В.А. Козечко, В.А. Дербаба, О.О. Богданов// Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2021 – № 65 – С.107-117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>

3. Kozechko, V., Kozechko, V., Yakubenko, Y., Kozechko, V., & Bohdanov, O. (2025). Efficiency of comprehensive chemico-thermal treatment for hardening high-speed steel R6M5. *Physics and Chemistry of Solid State*, 26(2), 335–343. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.335-343>
4. Shapoval, O., Kozechko, V., Savchenko, I., Kozechko, V., Shelkovska, I. (2025). Mathematical Modeling of Microstructure Evolution in the Process of Hot Rolling of Strips and Sheets. In: Aikin, M., et al. *Advanced and Novel Technologies — Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM 2025. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20
5. O. Voichyshen, S. Patsera, V. Derbaba & O. Bohdanov. (2024). Virtual Device for Assessing the Reliability of Control of Geometric Parameters of Mechanical Product Depending on the Accuracy of the Tool. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering; Publisher: Springer Nature)*. p.409-421 https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35

References (transliterated)

1. Alekseyenko, S., Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Patsera, S. (2025). Justification of digital algorithmic model controlling the radial runout of gear wheels. In **Proceedings of the 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2025)* (Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 181–191). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16)
- Protsiv V.V. Suchasni polimerni materialy ta tekhnologii v 3D-printnyhu / V.V. Protsiv, V.A. Kozechko, V.A. Derbaba, O.O. Bohdanov // *Zbirnyk naukovykh prats NHU. – D.: Derzhavnyi vyshchyi navchalnyi zaklad «Natsionalnyi hirnychyi universytet», 2021 – No. 65 – S. 107–117*. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>
3. Kozechko, V., Kozechko, V., Yakubenko, Y., Kozechko, V., & Bohdanov, O. (2025). Efficiency of comprehensive chemico-thermal treatment for hardening high-speed steel R6M5. **Physics and Chemistry of Solid State**, 26(2), 335–343. <https://doi.org/10.15330/pcss.26.2.335-343>
4. Shapoval, O., Kozechko, V., Savchenko, I., Kozechko, V., & Shelkovska, I. (2025). Mathematical modeling of microstructure evolution in the process of hot rolling of strips and sheets. In Aikin, M., et al. (Eds.), **Advanced and Novel Technologies — Interdisciplinary Collaboration in Materials Science. ANTICM 2025** (Advances in Science, Technology & Innovation). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20](https://doi.org/10.1007/978-3-032-00373-7_20)
5. Voichyshen, O., Patsera, S., Derbaba, V., & Bohdanov, O. (2024). Virtual device for assessing the reliability of control of geometric parameters of a mechanical product depending on the accuracy of the tool. In **Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange** (Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 409–421). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35)

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дербабa Віталій Анатолійович (Derbaba Vitalii) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0002-3918-2177, derbaba.v.a@nmu.one

Козечко Вікторія Анатоліївна (Kozechko Viktoriia) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0002-2837-187X, kozechkova@ukr.net

Богданов Олександр Олександрович (Bohdanov Olexandr) – к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0003-4790-2338, bohdanov.o.o@nmu.one

Козечко Валентин Іванович (Kozechko Valentyn) – PhD, доцент Вища школа комунікації та управління, Познань, Польща, ORCID ID – 0000-0003-2370-1603, valont1975@gmail.com

Алексєнко Сергій Вікторович (Alekseyenko Sergey) – д.т.н., професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID ID - 0000-0003-0320-989X, alexeyenko_sv@ukr.net