

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-01>

УДК 004.451.64:004.94

<sup>1</sup> **Вислоух Сергій Петрович**, кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2204-2602>

<sup>1</sup> **Яригін Віталій Андрійович**, Студент кафедри виробництва приладів

<sup>1</sup> **Глоба Олександр Васильович**, кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4984-7195>

<sup>2</sup> **Іваненко Руслан Олександрович**, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-1447-6275>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<sup>2</sup> Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз.

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КРУПНОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ FDM 3D ДРУКУ

**Вислоух С.П., Яригін В.А., Глоба О.В., Іваненко Р.О.** Підвищення якості крупногабаритних деталей, виготовлених методом FDM 3D друку. Сучасне устаткування дозволяє регулювати лише безпосередньо температуру сопла (температуру друку пластику), не враховуючи при цьому температуру зовнішнього середовища. Відомо, що більшість моделей принтерів мають відкриті корпуси і виріб може охолоджуватись нерівномірно. Ймовірність отримання браку як за якісними характеристиками поверхонь, так і за формою зростає. Описана нами пропозиція модернізації конструкції принтера дозволить оптимізувати весь процес друку. Зменшення або усунення необхідності пост-обробки деталі, дозволить зменшити час повного циклу її виготовлення і знизить її кінцеву вартість. Уникнення ж помилок на етапі виготовлення прототипу, виключать можливість прихованих помилок після запуску виробу в серію. У статті, з метою пошуку оптимальних параметрів покращення якості деталі, визначається, яким чином підтримання мікрокліматичних умов в зоні друку впливає на параметри якості деталі. Встановлено, що на якість крупногабаритних виробів, виготовлених методом FDM друку, суттєво впливають процеси підтримання температурних режимів. Результатом дослідження окреслено шляхи усунення недоліків друку, зокрема шляхом модернізації принтера.

**Ключові слова:** адитивні технології, адитивне виробництво, 3D друк, FDM друк, етапи процесу друкування, якість деталі, параметри якості, моделювання параметрів, оптимізація параметрів друку, оцінка мікрокліматичних параметрів, слайсер, налаштування слайсера, температурний режим, засоби підтримання мікрокліматичних умов, вдосконалення конструкції принтера.

**Вислоух С. П., Яригін В. А., Глоба О. В., Іваненко Р. А.** Повышение качества крупногабаритных деталей, изготовленных методом FDM 3D печати. Современное оборудование позволяет регулировать только температуру сопла (температуру печати пластика), не учитывая при этом температуру внешней среды. Известно, что большинство моделей принтеров имеют открытые корпуса и изделие может охлаждаться неравномерно. Вероятность получения брака как по качественным характеристикам поверхностей, так и по форме растет. Описанное нами предложение модернизации конструкции принтера позволит оптимизировать весь процесс печати. Уменьшение или устранение необходимости пост-обработки детали, позволит уменьшить время полного цикла ее изготовления и снизит ее конечную стоимость. Избегание же ошибок на этапе изготовления прототипа, исключат возможность скрытых ошибок после запуска изделия в серию. В статье, с целью поиска оптимальных параметров улучшения качества детали, определяется, каким образом поддержания микроклиматических условий в зоне печати влияет на параметры качества детали. Установлено, что на качество крупногабаритных изделий, изготовленных методом FDM печати, существенно влияют процессы поддержания температурных режимов. Результатом исследования обозначены пути устранения недостатков печати, в частности путем модернизации принтера.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, аддитивное производство, 3D печать, FDM печать, этапы процесса печати, качество детали, параметры качества, моделирования параметров, оптимизация параметров печати, оценка микроклиматических параметров, слайсер, настройки слайсера, температурный режим, средства поддержания микроклиматических условий, совершенствование конструкции принтера.

**Vysloukh S.P., Yaryhin V., Globa O.V., Ivanenko R.O.** Improving the quality of large-size parts produced by FDM 3D printing. Modern equipment allows to regulate only the temperature of the nozzle directly (plastic printing temperature), without taking into account the temperature of the external environment. It is known that most models of printers have open casings and the product can cool down unevenly. The probability of getting defects in both the quality characteristics of the surfaces and the shape increases. The proposal we described to modernize the printer design will optimize the entire printing process. Reducing or eliminating the need for post-processing of the part, will reduce the time of the complete cycle of its production and reduce its final cost. In order to avoid mistakes at the stage of prototype production, the possibility of latent errors after the launch of the product in series will be excluded. The article determines how the maintenance of microclimatic conditions in the printing area affects the quality parameters of the part. It is established that the quality of large-size products manufactured by FDM printing method is significantly affected by the process of maintaining temperature conditions. As a result of the study the ways to eliminate the shortcomings of printing, in particular, the modernization of the printer have been outlined.

**Key words:** additive technologies, additive manufacturing, 3D printing, FDM printing, printing process stages, part quality, quality parameters, parameter modeling, printing parameter optimization, evaluation of microclimatic parameters, slicer, slicer settings, temperature conditions, means of maintaining microclimatic conditions, improvement of printer's design.

**Постановка наукової проблеми.** Адитивне виробництво (АВ), іншими словами — 3D друк, зайняв сьогодні передове місце серед технологічних досягнень промислового виробництва. Цей вид технологій досить стрімко увійшов у наше повсякдення, зберігаючи лідируючі позиції. Так, повідомляється, що світовий обсяг ринку 3D-друку у 2019 році сягнув 11,58 млрд доларів, і, очікується, що у період з 2020 до 2027 рр. він перевищить 14% загального обсягу. Загалом, у 2018 році було продано 1,42 мільйона одиниць 3D-принтерів, і до 2027 року, очевидно, ця цифра сягне 8,04 мільйона одиниць [8]. Згідно з іншими аналітичними даними, у 2020 р. 65% промислового виробництва вже використовувало 3D друк [15]. Фактом є те, що використання адитивних технологій нині є досить розповсюдженим методом виготовлення складних прототипів або серій невеликих виробів, як от частин надточних механізмів чи лінійки побутових товарів. Лише впродовж минулого року, у розгул пандемії, адитивні технології застосували для виготовлення клапана для апарата штучної вентиляції легенів [7] і партії тримачів для захисних масок, пристосованих для щоденного використання лікарями [25]. У даний час цей виробничий процес усе ще розглядається як перспективна технологія і широко вивчається з метою оцінки його застосування в комерційних цілях, зокрема в таких галузях: електроніка (резистори та датчики), оптична (антени), медична (штучні тазостегнові суглоби, кісткові структури та тканини), автомобільна, комунікаційна та аерокосмічна галузі (двигуни, турбіни та теплоізоляційні покриття) [14]. Передбачається подальший ріст цієї технології, і як стверджує Г.О. Андрощук: «здатний здійснити революцію в багатьох сферах життя» [18]. Тож увесь спектр досліджень, стосовно перспектив і шляхів розвитку 3D друку, огляду різних технологій 3D друку, практичному навчанню технологіям 3D друку — є актуальним, особливо — вивчення питання створення якісних прототипів за допомогою 3D друку.

**Формулювання мети дослідження.** Швидкому впровадженню окремих видів адитивних технологій, таких як FDM друк (Fused Deposition Modeling), посприяли наступні фактори: простота використання, швидкість виготовлення і дешевизна обладнання. Маючи ряд вагомих переваг, цей метод отримав широке застосування, і не лише на підприємствах, а й у малому бізнесі, у колі винахідників-ентузіастів. Здебільшого сьогодні він використовується у сферах приладобудування, швидкого прототипування, художнього друку. Оскільки технологія FDM друку є досить точною, доступною і стає все більш затребуваною, виникає необхідність боротися з певними недоліками, що виникають в процесі такого виробництва. Серед них — висока шорсткість бокових поверхонь, незадовільні міцнісні характеристики виробу, відхилення від форми тощо, що особливо присутнє в деталях великих габаритів. Саме задля можливостей подальшого розуміння причин виникнення цих та інших недоліків і їх усунення полягає зміст даного дослідження. Отже, основною проблемою нашої статті є підвищення якості деталей, особливо крупно габаритних, виготовлених методом FDM друку. Свою роботу ми плануємо звязати до пошуку оптимальних параметрів покращення якості деталі. Зокрема, ми хочемо визначити, яким чином на якість деталі впливає підтримання мікрокліматичних умов в зоні друку.

Постановка наукової проблеми зумовлює виконання низки дослідницьких завдань: виявити недоліки процесу FDM друку загалом; акцентувати увагу на основних недоліках, що впливають на якість деталі, проаналізувати причини їх виникнення; назвати оптимальні параметри якості; оцінити мікрокліматичні параметри; окреслити шляхи оптимізації параметрів друку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Треба зазначити, що існує цілий ряд розвідок як зарубіжних, так і українських авторів, які вивчали теоретичні й практичні питання використання FDM друку: стрімкі перспективи і шляхи його розвитку, огляд різних технологій 3D друкування, питання навчанню практичним технологіям 3D друку, управлінню цими технологіями для виробництва, зокрема в різних галузях промисловості, дизайні, майстерності створення прототипів за допомогою 3D друку тощо. Серед найбільш цікавих і наближених до теми нашого дослідження, на які варто звернути увагу, є: стаття колективу російських авторів, яка повідомляє про практичні шляхи вивчення механічних властивостей дослідних прототипів, виготовлених методом FDM 3D друку [20]; розвідка Струтинської О. В., кандидата педагогічних наук, доцента Національного педагогічного університету ім. М. П. Драгоманова, яка резюмуючи про перспективи розвитку технологій тривимірного друку, наголошує: «аналіз створеного за допомогою 3D друкування макету допомагає знайти недоліки в конструкції ще на етапі розробки» [21]; дослідження іншої української дослідниці, Петришин А. А., яка говорить: «варто приділити увагу аналізу й усуненню дефектів друку 3D принтерами професійного класу, що орієнтовані на великі компанії, адже саме вони потребують створення моделей і прототипів високої якості й точності» [19]. Серед зарубіжних авторів, які вивчають теоретичні й практичні питання факторів виникнення недоліків FDM 3D друку, заслуговують на увагу наступні публікації: дослідження факторів впливу точності FDM 3D друку [5];

моделювання помилок на основі навчання у процесі 3D друку [6]; оцінка механічних властивостей зразків, виготовлених за допомогою FDM 3D друку [10]; механічна характеристика моделювання плавненого осадження (FDM) 3D друкованих деталей [12] та низка інших. Серед найбільш цікавих і наближених до проблематики нашого дослідження є низка розвідок зарубіжних авторів. «Оптимізація параметрів друку при моделюванні плавненого осадження для поліпшення якості деталі та стійкості процесу» [3] — це експериментальне дослідження, що визначає взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу, продуктивністю, стійкістю й якістю кінцевої деталі та її структурними характеристиками. «Огляд моделювання плавненого осадження 3D друку (FDM): обробка, матеріали та параметри друку» [13] — стаття, що аналізує такі параметри, як: процес виробництва ниток, типів матеріалів нитки та параметрів друку техніки FDM. Дослідження «Посилення якості поверхні плавненого зразка осадження (FDM) друкованих зразків на основі вибору критичних параметрів друку» [4] — виявляє критичні фактори у процесах FDM для зменшення шорсткості поверхні. Що цікаво, результати їх роботи показали, що товщина шару та товщини стінки є найважливішими факторами для контролю шорсткості поверхні, а інші — не виявили чіткого впливу. Розвідка «Якість поверхні 3D друкованих моделей як функція різних параметрів друку» [2] визначила, як тип пластику, роздільна здатність друку, позиціонування, вирівнювання, цільова структура, тип і кількість конструкцій підтримки можуть впливати на шорсткість поверхні друкованих об'єктів. Натомість, «Дослідження щодо впливу параметрів процесу моделювання плавненого осадження (FDM) на якість друкованої частини» [9] — визначило, що для отримання друкованої частини гарної якості треба розглядати такі фактори впливу, як: специфікація машин, умови друку та параметри процесу. Стаття «Оптимізація параметрів процесу 3D-принтера для поліпшення якості друкованої полілактичної кислоти» [16] виявила, що орієнтація на друковану частину дає більший ефект до шорсткості поверхні та механічної характеристики, ніж растр кута. Знову ж таки, дослідження «Критичні параметри, що впливають на якість прототипів у моделюванні плавненого осадження» [1] експериментує, як різні параметри процесу FDM (з використанням техніки TAGUCHI) впливають на якість прототипу. І нарешті, розвідка «Вплив параметрів оптимізації на якісну обробку поверхні тривимірного друку (3D друк) моделювання плавненого нанесення (FDM) з використанням RSM» [11] — визначає, що на шорсткість поверхні в основному впливає товщина шару порівняно з щільністю заповнення та швидкістю друку. Цікавою є стаття колективу російських авторів, яка подає класифікацію дефектів, отриманих технологією 3D друку FDM — «Поліпшення якості FDM 3D друку БПЛА та деталей літальних апаратів та вузлів шляхом параметричних програмних змін» [17]. Дослідження говорить про те, що користувачі адитивного обладнання (FDM 3D друк), особливо початківці, стикаються з різними дефектами, викликаними незадовільними обраними параметрами процесу 3D друку, недоліками у роботі 3D-принтера та підготовки 3D-моделі для друку.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Треба зазначити, що в українському дослідному полі сьогодні немає достатньої кількості матеріалів, які акцентують саме на пошуку й аналізі причин появи недоліків деталей, виготовлених методом FDM друку, зокрема засобами підтримання мікрокліматичних умов у зоні друку. Однак зазначимо, що варті уваги статті Чонки Е. Я., яка досліджує питання якості поверхонь моделей, виготовлених на 3D-принтерах. Так, в одній зі статей автор доходить висновку, що позиціонування екструдера створює додаткову рифленість (хвилястість) поверхні, яку можна зменшити програмно [23]. Її наступна стаття — також узагальнює, що параметри шорсткості поверхні деталей, виготовлених в умовах адитивного виробництва, є наслідком вибору програмного забезпечення, в якому спроектована цифрова модель заготовки [22]. Цікавою є одна з останніх її робіт, яка наголошує, що підвищити характеристики якості деталі здатні шляхи вибору ефективної системи переміщення друкуючої головки в процесі непланарного методу 3D друку [24]. Розгляду заслуговують також низка досліджень Яригіна В. А. [26; 29]. Особливо дві останні публікації, в яких автор доходить до висновку, що вивчення впливу параметрів процесу 3D друку на характеристики якості отриманих деталей мають перспективу, акцентуючи, що одним з ключових факторів, що впливають на процес — є температурні режими [28; 27]. Отже, наше дослідження щодо підвищення якості крупногабаритних деталей, виготовлених методом FDM друку, зокрема шляхом підтримання певних мікрокліматичних режимів в зоні друку має наукову новизну і передбачає більш ґрунтовне дослідження в майбутньому.

**Виклад основного матеріалу дослідження й обґрунтування отриманих результатів.** Незаперечним фактом є твердження про те, що на вартість виконання робіт, пов'язаних з адитивними технологіями, насамперед, впливає вартість обладнання й вартість витратних матеріалів. Виходячи з цього, найбільш простою і доступною сьогодні технологією 3D друку є FDM (метод плавненого осадження). Узагальнюючи глобальний досвід і наші спостереження, резюмуємо, що для

виготовлення прототипів та для виготовлення серії продукції, варто використовувати FDM технологію як найбільш дешеву і доступну: «Для дрібносерійного виробництва деталей та моделей на 3D-принтері доцільно використовувати метод FDM, оскільки він є дешевим, доступним, не вимагає спеціального програмного забезпечення та забезпечений великим вибором матеріалу для друку» [22]. Крім того, ця «технологія дозволяє отримати якісні тонкостінні профільні вироби, що вирізняються особливо малою вагою та високими споживчими властивостями» [20, с. 26].

Дійсно, технології адитивного виробництва набувають величезної популярності у виробничому секторі через їх беззаперечну здатність конструювати геометрично складні прототипи та функціональні деталі, зокрема виникає потреба і в крупногабаритних. Ми впевнені, що підвищення їх якості з метою оптимізації параметрів якості та впровадження у виробництво має неабиякі перспективи.

І хоч адитивні технології мають ряд недоліків, більшість з них не є стільки суттєвими, щоб від них відмовлятися, а дефекти можна упередити або виправити. Цього можна досягти завдяки більш ретельному підходу до підготовчих робіт і друку, або пост-обробкою отриманих деталей. Логічно, що для виготовлення серії або партій деталей промислової продукції, важливим є отримання більш якісної за параметрами деталі на етапі виходу й уникнення необхідності їх пост-обробки. Про це говорить і Петришина А. А.: «великі компанії, в яких є постійна потреба в створенні моделей і прототипів високої якості і точності, повинні приділяти увагу питанню усунення дефектів та браку» [19], і Струтинська О. В.: «аналіз створеного за допомогою 3D друкування макету допомагає знайти недоліки в конструкції ще на етапі розробки» [21].

Більшість дослідників одностайні у висновку, що на якість FDM друкованої моделі впливають: підготовчі роботи [5; 19], вибір робочого матеріалу [6; 12] і технологічні етапи процесу друкування [2; 3; 4; 5; 10; 12; 13; 14; 15; 19]. Також, майже всі одностайно висловлюються, що для зменшення кількості недоліків і відсоток браку деталей, що виникають при FDM друці, необхідно ретельно дослідити чинники, що впливають на якість готових деталей.

Ми погоджуємося з таким підходом, і для реалізації нашої мети — визначимо чинники, які найбільше впливають на якість 3D-моделі. На нашу думку, пошук варто робити, розглядаючи всі етапи процесу друкування: від підготовки моделі до її безпосереднього виготовлення та пост-обробки (за необхідності), як зазначає Яригін В. А. [26].

Спочатку окреслимо етапи процесу друкування. На точку зору російських дослідників, це: 1) калібрування обладнання; 2) підготовка 3D-моделі для 3D друку; 3) завантаження файлу (G-коду) до 3D-принтера; 4) 3D друк частини; 5) видалення частини від робочої камери 3D-принтера; 6) пост-обробка друкованої частини [17]. Українська науковиця Чонка Е. Я. називає процес друкування «життєвим циклом однієї деталі». У її розумінні, це послідовність дій, яка показує формування моделі: «базова концепція — етап проектування — створення цифрової параметричної 3D-моделі — компіляція в формат STL — розбиття на шари — друк на принтері — обробка надрукованої деталі — використання — утилізація» [22]. У ході нашого дослідження, ми окреслили наступні етапи друкування:

1. Виготовлення 3D-моделі
2. Підготовка моделі до друку
3. Вибір оптимального режиму роботи 3D принтера
4. Підготовка принтера до друку
5. Друк
6. Пост-обробка

У процесі моделювання параметрів друку, ми визначили, що етап вибору оптимального режиму роботи 3D принтера найбільш суттєво впливає на якість отриманих деталей. А саме — вибір робочого матеріалу, температура сопла, температура стола, швидкість друку та ін.

Крім того, не менш важливими для забезпечення якості деталі можуть стати робочі елементи процесу, а також їх функції — тобто інші фактори, що також впливають на процес друкування. Такими робочими елементами є: 1) оператор; 2) 3D-принтер; 3) 3D-інструменти (зонд, шпатель, шліфувальний інструмент для пост-обробки); 4) програмне забезпечення 3D-принтера; 5) програма Slic3r для обробки 3D-моделі та перетворення його в G-код тощо [17]. Не заперечуємо, але й не можемо стверджувати, що робочі елементи процесу окремо суттєво впливають на якість друкованої деталі, особливо, без контролю оператора. Хоча, зазначимо, що від вибору обладнання, вибору програмного забезпечення, вибору робочого матеріалу неабияк залежить якість виготовленої моделі.

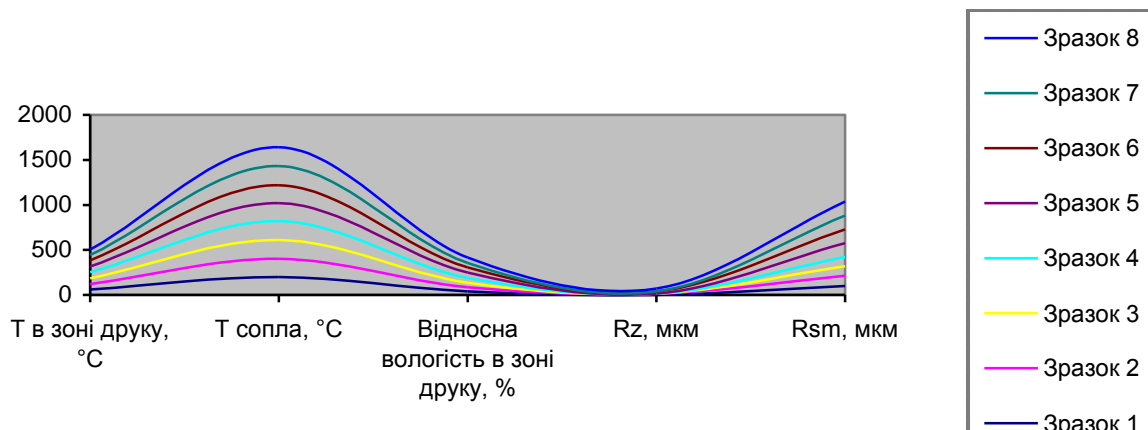
Перейдемо до виконання наступної мети нашого дослідження — виявити недоліки загалом, що виникають у процесі FDM друку. За низкою проведених експериментальних спостережень, ми

виділили низку найбільш поширених проблемних ситуацій, які виникли у ході експериментального виготовлення деталей: перший шар екструдованого матеріалу не прилипає до робочого столу; насадка друкуючої головки не друкує; екструдовано забагато полімерного матеріалу; полімерний матеріал недостатньо екструдований; утворення обривів, розділення між шарами; дрібні частини деталі не друкуються; хвилястість поверхні; висока шорсткість поверхні.

Всі перераховані проблемні ситуації — це недоліки FDM друку, що негативно впливають на якість виготовленої моделі. У процесі друку експериментальних зразків, моделюючи параметри друку, встановлено, що на всіх етапах друку присутні процеси і чинники, які можуть негативно вплинути на якісні характеристики деталі. На якісний результат FDM друку дійсно впливає: склад матеріалу нитки або тип полімеру нитки, робочі параметри екструзії (всі характеристики, пов'язані зі швидкістю екструзії та температурою), основні фактори режиму друку. Проте дотримання температурних режимів зони друку стало важливим чинником на кожному з етапів.

Для виконання нашого дослідження, ми окреслили, що під параметрами якості виготовленої деталі ми розуміємо відповідність готової деталі розмірам, формі та якісним зовнішнім характеристикам поверхонь 3D-моделі. Для реалізації цього завдання, ми проаналізували взаємозалежність параметрів якості деталі від різноманітних чинників, моделюючи деякі відмінні параметри. До параметрів якості поверхонь деталей ми віднесли наступні, найбільш оптимальні: шорсткість і структура поверхонь, відповідність розміру та форми 3D-моделі. Всі параметри, за якими визначалися показники шорсткості: середня арифметична шорсткість; корінь квадратний середньої шорсткості; середня висота від піку до впадини; середня висота елементів профілю; максимальна глибина шорсткості; середня висота піка профілю; заповнений матеріалом пік профілю; інтервал впадин. Всі параметри розмірів і відхилення від форми: відхилення від геометричних розмірів довжини, ширини і висоти; усадка полімерного матеріалу.

Розраховуючи усереднені показники параметрів якості експериментальних зразків, встановлено: залежність шорсткості поверхні та параметрів відхилення форми і розмірів від впливу основних факторів режиму друку (швидкості друку, температури друку, діаметру екструзії). При аналізі досліджуваних параметрів відмічено, що усереднені дані експериментальних зразків, виготовлених при дотриманні додаткових заходів з підтримання оптимального температурного середовища в зоні друку, були кращими. На рис. 1. показано залежність середніх параметрів шорсткості від параметрів температури та відносної вологості в зоні друку.



**Рис. 1.** Залежність параметрів шорсткості (середнього показника інтервалу впадин Rsm та середнього значення висоти від піку до впадини Rz) від параметрів температури в зоні друку, температури розігріву сопла та відносної вологості в зоні друку

Також встановлено, що на якість друкованих крупногабаритних виробів суттєво вплинули наступні мікрокліматичні параметри: температура нагрівальної платформи, швидке охолодження друкованої моделі, підтримання температури сопла екструдера, протяг і відносна вологість в приміщенні.

Резюмуємо результати нашого дослідження. 1. Недостатня температура нагрівальної платформи призводить до відставання першого шару екструдованого полімерного матеріалу від столика, внаслідок чого відбувається подальше відхилення параметрів форми та розміру. 2. При друкуванні крупногабаритних деталей, зі зростанням висоти виробу і віддаляючись від нагрівача, температурне середовище суттєво знижується і деталь швидко охолоджується, що впливає на висоту

усадки шарів. 3. При підтриманні режимів нагрівання й охолодження сопла, якщо температуру сопла знизити — адгезія шарів буде недостатньою, що впливає на параметри міцності деталі, розшарування; якщо температуру сопла підвищити — це призводить до занадто швидкої екструзії, попередні шари пластику розтікаються. 4. Під час процесу FDM друку протяги в приміщенні прискорюють застигання екструдованого полімерного матеріалу з одного боку деталі, що призводить до виникнення внутрішнього напруження і відшарування шарів. Отже, результатом нашого дослідження, для усунення недоліків друку та підтримки мікрокліматичних умов друку, пропонується модернізувати принтер шляхом використання додаткового нагрівача та кожуха (застосований у процесі експериментальних досліджень). Результати досліджень показали, що така модернізація є не дорогою і дозволяє утримуватиме весь процес друку деталі в певному температурному режимі. В результаті вищезазначених модернізацій можна отримати кращий температурний градієнт на об'ємі деталі, що дозволить виготовити більш якісну деталь за параметрами шорсткості поверхонь, а також збільшить кінцеву міцність деталей на розрив за рахунок кращої дифузії між шарами екструдованого полімерного матеріалу.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У ході наших експериментальних досліджень визначено, що на процес друку, а отже і на якість отриманих деталей впливають багато факторів. Одним з ключових факторів є температурні режими друку, особливо засоби підтримки температурних умов в зоні друку. Сучасне устаткування дозволяє регулювати лише безпосередньо температуру сопла (температуру друку пластику), не враховуючи при цьому температуру зовнішнього середовища. Відомо, що більшість моделей принтерів мають відкриті корпуси і виріб може охолоджуватись нерівномірно. Ймовірність отримання браку як за якісними характеристиками поверхонь, так і за формою зростає. Описана нами пропозиція модернізації конструкції принтера дозволить оптимізувати весь процес друку. Зменшення або усунення необхідності пост-обробки деталі, дозволить зменшити час повного циклу її виготовлення і знизить її кінцеву вартість. Уникнення ж помилок на етапі виготовлення прототипу, виключать можливість прихованих помилок після запуску виробу в серію. Ми вважаємо, що наші дослідження мають перспективу подальших досліджень, особливо з метою випробування модернізованого устаткування й запуску його у виробництво.

#### References.

1. Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling // *J. Mater. Process. Technol.* – Vol. 118. – №. 1–3. – P. 385–388.
2. Arnold Christin, Monsees Delf, Hey Jeremias, Schweyen Ramona (2019). Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters [Електронний ресурс] // *Materials* 12(12):1970. — Режим доступу: DOI:10.3390/ma12121970. — Назва з екрану.
3. Camposeco-Negrete Carmita (2020). Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability [Електронний ресурс] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – №108 (7-8). — Режим доступу: DOI:10.1007/s00170-020-05555-9. — Назва з екрану.
4. Carou Diego, Pérez Mercedes, Medina-Sánchez G., García-Collado Alberto, Gupta Munish (2018). Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters. Projects: Additive manufacturing processes [Електронний ресурс] // *Performance Assessment of 3D- Printed Parts Materials.* – №11(8). — Режим доступу: DOI:10.3390/ma11081382. — Назва з екрану.
5. Changxiu Zhou, Tiantian Han (2021). Research on the Influencing Factors of FDM 3D Printing Accuracy [Електронний ресурс] // *Journal of Physics Conference Series* 1838(1):012027. — Режим доступу: DOI:10.1088/1742-6596/1838/1/012027. — Назва з екрану.
6. Charalampous Paschalis, Kostavelis Ioannis, Kontodina Theodora, Tzovaras Dimitrios (2021). FDM Learning-based error modeling in FDM 3D printing process [Електронний ресурс] // *Rapid Prototyping Journal ahead-of-print (ahead-of-print).* — Режим доступу: DOI:10.1108/RPJ-03-2020-0046. — Назва з екрану.
7. Coronavirus, a Brescia manca una valvola per i rianimatori: ingegneri e fisici la stampano in 3D in sei ore / Andrea Sparaciari [Електронний ресурс] // *Business Insider Italia.* — 14.03.2020. — Режим доступу: <https://it.businessinsider.com/coronavirus-manca-la-valvola-per-uno-strumento-di-rianimazione-e-noi-la-stampiamo-in-3D-accade-nellospedale-di-chiari-brescia/>. — Назва з екрану.
8. GVR: Global 3D Printing Market Size was \$11.58 Billion in 2019 [Електронний ресурс] // *Printed Electronics now.* — 02.10.20. — Режим доступу: [https://www.printedelectronicsnow.com/contents/view\\_breaking-news/2020-02-10/gvr-global-3d-printing-market-size-was-1158-billion-in-2019/](https://www.printedelectronicsnow.com/contents/view_breaking-news/2020-02-10/gvr-global-3d-printing-market-size-was-1158-billion-in-2019/). — Назва з екрану.
9. Ngoc-Hien Tran, Van-Nam Nguyen, Anh-Vu Ngo, Cuong Nguyen (2017). Study on the Effect of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on the Printed Part Quality [Електронний ресурс]. — Режим доступу: DOI:10.9790/9622-0712027177. — Назва з екрану.
10. Popa Alexandru, Faur Nicolae, Hluscu Mihai, Belin Cosmin (2019). Evaluation of the Mechanical Properties of the Samples Made by FDM 3D Printing [Електронний ресурс] // *Materiale plastice.* — №56(3). — P. 500-504. — Режим доступу: DOI:10.37358/MP.19.3.5217. — Назва з екрану.
11. Radhwan Hussin, Shayfull Zamree Bin Abd. Rahim, Muhamad Farizuan Rosli, M. S. M. Effendi (2019). Optimization parameter effects on the quality surface finish of the three-dimensional printing (3D-printing) fused deposition modeling

- (FDM) using RSM [Електронний ресурс] // AIP Conference Proceedings 2129(1):020155. – Режим доступу: DOI:10.1063/1.5118163. – Назва з екрану.
12. Rahmatabadi Davood, Aminzadeh Ahmad, Aberoumand Mohammad, Moradi Mahmoud (2021). Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printed Parts [Електронний ресурс]// Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. – P. 131-150. – Режим доступу: DOI:10.1007/978-3-030-68024-4\_7. – Назва з екрану.
  13. Ruben Bayu Kristiawan, Fitriani Imaduddin, Dody Ariawan, Ubaidillah Sabino (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters [Електронний ресурс] // Open Engineering 11(1). – P. 639-649. – Режим доступу: DOI:10.1515/eng-2021-0063. – Назва з екрану.
  14. Sugavaneswaran M., Arumaikkannu G. Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication // Materials & Design. – February 2014. – Volume 54. – P. 779-785.
  15. To prawdziwy boom. Do końca tego roku sprzedaż drukarek 3D wzrośnie o 100 procent [Електронний ресурс] // tvn24. – 17 października 2016. – Режим доступу: <https://tvn24.pl/biznes/tech/sprzedaz-drukarek-3D-wzrosnie-o-ponad-100-proc-do-konca-2016-roku-ra684502-4472347>. – Назва з екрану.
  16. Tontowi Alva, L Ramdani, Rosa vella Erdizon, Dawi Karomati Baroroh (2017). Optimization of 3D-Printer Process Parameters for Improving Quality of Polylactic Acid Printed Part [Електронний ресурс] // International Journal of Engineering and Technology. – №9(2). – P. 589-600. – Режим доступу: DOI:10.21817/ijet/2017/v9i2/170902044. – Назва з екрану.
  17. Zagidulin R. S., Zezin N. I., Rodionov N. V. (2021). Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes [Електронний ресурс] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1027:012-031. – Режим доступу: DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031. – Назва з екрану.

#### Список бібліографічного опису.

1. Андрощук Г. О. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання / Г. О. Андрощук, Я. В. Копил // Інтелектуальна власність в Україні. – 2016. – № 5. – С. 17-26.
2. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього / А. А. Петришина // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015 р., м. Тернопіль. – Тернопіль, 2015. – С. 26-27.
3. Смирнов В. В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности. Опыт ФГБОУ УГАТУ / В. В. Смирнов, В. В. Барзали, П. В. Ладнов // Новости материаловедения. Наука и техника. – № 2 (14). – 2015. – С. 23-27.
4. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування [Електронний ресурс] / О. В. Струтинська // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2018. – № 20. – С. 88–94. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu\\_2\\_2012\\_12\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu_2_2012_12_27). – Назва з екрану.
5. Чонка Е. Я. Аналіз точності формування поверхонь деталей виготовлених на 3D-принтері / Е. Я. Чонка, В. С. Антонюк // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні : збірник наукових праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 10-11 грудня. – Київ : ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури, 2019. – С. 197- 200.
6. Чонка Е. Я. Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері / Е. Я. Чонка, О. Г. Новаковський, В. В. Серов // Процеси механічної обробки, верстати та інструмент : збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції, 6–9 листопада. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – С. 201-202.
7. Чонка Е. Я. Особливості непланарного методу 3D друку поверхонь / Е. Я. Чонка, О. Г. Новаковський // Збірник наукових праць XIII Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 134–138.
8. Школяр вирішив полегшити медикам роботу і покращив дизайн захисних масок. Справа лише у тримачі, але лікарі винахід оцінили [Електронний ресурс] // Ukr.Media. – 9 Квітня 2020. – Режим доступу: <https://ukr.media/world/413621/>. – Назва з екрану.
9. Яригін В. А. Аналіз параметрів, що впливають на якість 3D друку / В. А. Яригін., С. П. Вислоух // Materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar «Modern questions of production and repair in industry and in transport», March 23-29, 2020, Kosice, Tbilisi, Georgia. – С. 180-183.
10. Яригін В. А. Дослідження параметрів якості деталей, отриманих шляхом 3D друку / В. А. Яригін., С. П. Вислоух // Збірник тез всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 11-15 травня 2020 року м. Житомир. – Київ: Державний університет «Житомирська політехніка» – С. 125-126.
11. Яригін В. А. Особливості отримання прототипів за допомогою 3D друку / В. А. Яригін., С. П. Вислоух // Збірник наукових праць XIII Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ. – Київ: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2020. – С. 139-142.
12. Яригін В. А. Про сучасні методи та засоби моделювання / В. А. Яригін, С. П. Вислоух // Збірник праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 року. – Київ: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 211-213.