

ПОЛІЩУК О. С.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>  
e-mail: [opolishchuk71@gmail.com](mailto:opolishchuk71@gmail.com)

ПОЛІЩУК А. О.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>  
e-mail: [andrepol215@gmail.com](mailto:andrepol215@gmail.com)

ЛІСЕВИЧ С. П.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>  
e-mail: [lisevichsv@gmail.com](mailto:lisevichsv@gmail.com)

ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ А. М.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-0914-0814>  
e-mail: [zam09042020@gmail.com](mailto:zam09042020@gmail.com)

МЕЛЬНИК В. І.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-1173-4638>  
e-mail: [oks81mik@i.ua](mailto:oks81mik@i.ua)

## ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ТА ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ З КОМПОЗИТНИХ НИТОК З ВИСОКИМ ВМІСТОМ МЕТАЛУ

Встановлено, що одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка нових технологій швидкого виробництва продукції (швидке виготовлення), суть яких полягає в пошаровому конструюванні виробів з порошкового матеріалу на основі CAD-моделі, тобто моделі, тривимірна геометрія якої описується у цифровому вигляді за допомогою програм твердотільного моделювання (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE тощо). Наведено основні переваги використання адитивних технологій, зокрема 3D-друку філаментами з вмістом металів. Розглянуто типи 3D-принтерів, які друкують металом. Описано застосування металевих порошків в технологіях 3D-друку. Розглянуто основні характеристики та властивості таких металів титану Ti, нержавіючої сталі SS, алюмінію Al, міді Cu, заліза Fe та сплавів на їх основі, що можуть використовуватися в якості матеріалів чи добавок в адитивних технологіях. Описано переваги їх використання порівняно з традиційними технологіями (лиття, прокатка тощо). Приведено схему технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу. Розглянуто та описано кожний з етапів технологічного процесу. Підібрано металевий порошок з нержавіючої сталі для виготовлення філаменту та досліджено його хімічний склад. Проведено експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку. На основі здійснених досліджень запропоновано використати PLA пластиковий порошок в якості з'єднуючого елемента в філаменті. Спроектовано і виготовлено конструкцію шнека для подачі матеріалу екструзійної машини. Розроблено форму та підібрано матеріал екструзійної головки, яка задає діаметр нитки, що виготовляється. Вибрано 3D-принтер для друку виробів та деталей композитними нитками з високим вмістом металу та здійснено його удосконалення. Проведено експериментальні дослідження зносу насадки екструдера 3D-принтера при контакті з абразивною ниткою.

Ключові слова: 3D-принтер, екструзійна машина, металевий порошок з нержавіючої сталі, полімерний матеріал.

Oleg POLISHCHUK, Andrii POLISHCHUK,  
Svitlana LISEVICH, Anatoliy ZALIZETSKYI, Vasiliy MELNYK  
Khmelnytskyi National University

## THE MANUFACTURING PRODUCTS AND PARTS BY 3D-PRINTING METHOD FROM COMPOSITE FILAMENTS WITH HIGH METAL CONTENT

It is established that one of the most promising areas of development of modern engineering is the development of new technologies for rapid production (rapid manufacturing), the essence of which is the layered design of powder products based on CAD model, ie model whose three-dimensional geometry is described digitally by using solid modeling programs (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE, etc.). The main advantages of using additive technologies, including 3D printing with filaments containing metals. The types of 3D printers that print metal are considered. The use of metal powders in 3D printing technologies is described. The main characteristics and properties of such metals, Ti titanium, stainless steel SS, aluminum Al, copper Cu, FE iron and alloys based on them can be used as materials or additives in additive technologies. The advantages of their use over traditional technologies (casting, rolling, etc.) are described. The scheme of technological process of manufacturing products of industry mechanical engineering by a 3D printing with a high metal content is given. Each of the stages of the technological process is considered and described. Stainless steel metal powder was selected for the manufacture of filament and its chemical composition is investigated. Experimental studies have been conducted to determine the mechanical, thermophysical and rheological characteristics of polymeric materials used for the manufacture of 3D prints. On the basis of the studies, it is proposed to use Plastic powder as a connecting element in the filament. The design of the auger for supplying the material of the extrusion machine is designed and manufactured. The form of the extrusion head is developed and selected, which sets the diameter of the

*filament being made. A 3D printer for printing products and parts with a high metal content was selected and improved. Experimental studies of the wear of the 3D printer's extruder nozzle on contact with the abrasive thread.*

*Key words: 3D-printing, extrusion machine, stainless steel metal powder, polymer material*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка нових технологій швидкого виробництва продукції (швидке виготовлення). Суть таких технологій полягає в пошаровому конструюванні виробів з порошкового матеріалу на основі САД-моделі, тобто моделі, тривимірна геометрія якої описується у цифровому вигляді за допомогою програм твердотілого моделювання (AutoCAD, SolidWorks, Compas-3D, CATIA, ProE тощо).

Аддитивні технології, що почали розвиватись у 80-х роках ХХ століття, відкриває можливість виготовлення (вирощування) об'єктів шляхом поступового нанесення матеріалу на створений об'єкт. Сфера адитивних технологій сьогодні стрімко розвивається, витісняючи класичні методи обробки та виготовлення деталей [1, 2].

Основними перевагами використання адитивних технологій є:

- мінімізація матеріальних втрат і відходів виробництва;
- можливість внесення змін до проекту на етапі передачі виробу до виготовлення;
- можливість виготовлення деталей складної форми, що неможливо при використанні класичного виробництва;
- відсутність необхідності виготовлення оснастки, яка притаманна класичним методам обробки;
- виготовлення продукції в рамках дослідного виробництва;
- перехід від масового виробництва до індивідуальних замовлень і збільшення асортименту продукції.

Найближчим часом вартість продукції з використанням 3D-друку знизиться, друк стане ще популярнішим.

### **Об'єкт та методи дослідження**

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час виготовлення філаментів з високим вмістом металу та під час друку з них готових деталей та виробів. При вирішенні поставлених задач були використані основні положення машинознавства, теорії полімерних матеріалів і металів, та їх переробки, методології експериментальних досліджень.

### **Постановка завдання**

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей обладнання для виготовлення ниток з високим вмістом металів та готових виробів і деталей на їх основі.

### **Результати та їх обговорення**

За останні 10 років 3D-друк металевим порошком зробив стрімкий ривок у розвитку і стає все більш популярним. Існує велика кількість матеріалів для 3D-друку металом.

Відомі сьогодні нитки для друку на основі різних металів поєднують практичні та естетичні властивості. Вони можуть відповідати вимогам різних виробів: прототипи, мініатюри, прикраси, функціональні деталі тощо.

Друк металами настільки важливий, що 3D-друк з їх використанням вже впроваджують у серійне виробництво. Деякі деталі, надруковані на 3D-принтері, вже наздогнали та певною мірою перевершили за своїми властивостями ті, що виготовляються класичними методами.

Класичне виробництво металів і пластмас є надто неощадливим. Вихід готової продукції, у деяких галузях, становить не більше 30% з використаного матеріалу. При 3D-друку з використанням металів споживається менше електроенергії, а відходи зменшуються до мінімуму. Крім того, готовий виріб, надрукований на 3D-принтері має на 60% меншу вагу у порівнянні з литою деталлю або деталлю, що піддавалась механічній обробці. Міцність і легкість деталей потрібні при виготовленні окремих виробів у різних галузях промисловості. Це, в свою чергу, також призводить до зниження собівартості продукції [3].

Процес 3D-друку металами, який сьогодні використовують найбільші компанії, відомий як оплавлення або спікання шару порошку. Це означає, що лазерний або інший високоенергетичний промінь з'єднує в єдине тіло рівномірно розподілені частки металевого порошку, створюючи шари продукту один за одним.

3D-принтери, які друкують металом, умовно поділяють на три групи:

1. Струменеві принтери, які працюють з пластиком і легкоплавкими металами, такими як свинець або олово.

2. 3D-принтери що здійснюють друк металевим порошком з клеєм.

3. 3D-принтери, які працюють на основі технологій лазерного плавлення.

Металевий порошок використовується в кількох технологіях 3D-друку [4]:

- селективне лазерне спікання, SLS (Selective Laser Sintering) – 3D-метод, який використовує матеріал, що спікається лазером;
- селективне лазерне плавлення, SLM (Selective Laser Melting) – частинки металу плавляться, після чого формуються жорсткий каркас;
- електронно-променево плавлення EBM (Electron Beam Melting). У процесі електронно-променевого плавлення металевий порошок плавиться під дією електронних променів.

Досягнення металургії повністю реалізуються в адитивному виробництві, що дозволяє використовувати унікальні матеріали і сплави для виготовлення геометрично складних виробів високої точності, щільності і повторюваності.

Метал – один із матеріалів, який успішно використовується для 3D-друку. Останнім часом виробники в значній кількості випускають порошкоподібні метали, які оптимально підходять для 3D-принтера. Сучасні технології дозволяють отримувати порошок для 3D-друку з певними властивостями для вирішення конкретних виробничих завдань. А оскільки майже будь-який метал можна розпилувати, асортимент металевих матеріалів для 3D-принтерів надзвичайно великий.

Новітні адитивні технології передбачають використання близько двадцяти перевірених і готових до використання матеріалів, серед яких титан Ti, нержавіюча сталь SS, алюміній AL, мідь Cu, залізо Fe тощо.

Ti – титан. Чистий титан (Ti64) – це метал, що найчастіше використовується для 3D-друку та є найбільш універсальним, оскільки він одночасно міцний і легкий. Використовується у різних галузях промисловості, включаючи медичну, аерокосмічну, автомобільну (для виготовлення деталей і прототипів).

Єдиним недоліком є висока реакційна здатність титану. Він може легко вибухнути, коли знаходиться у вигляді порошку. При друку порошок повинен знаходитися тільки в середовищі інертного газу аргону.

SS – нержавіюча сталь. Нержавіюча сталь є одним з найбільш доступних металів для 3D-друку. У той же час цей метал довговічний і може використовуватися в широкому спектрі промислових і мистецьких галузей. Такий тип сплаву сталі, що містить кобальт і нікель, має високу еластичність та міцність на розрив. 3D-друк таким матеріалом використовується в основному тільки у важкій промисловості.

Алюміній. Завдяки характерній алюмінію легкості та універсальності, матеріал є дуже популярним металом для використання в 3D-друку. Зазвичай його використовують у вигляді різних сплавів, де він складає основу. Алюмінієвий порошок вибухонебезпечний і використовується для друку в інертному газі аргону.

Cu – мідь. За особливим винятком, мідь та її сплави (бронза, латунь) використовуються для лиття з використанням випалених моделей, а не для прямого друку металом. Їх властивості далекі від ідеальних для використання в промисловому 3D-друку. Вони частіше застосовуються в декоративно-прикладному мистецтві. Вони додаються до пластикової нитки для 3D-друку на звичайних 3D-принтерах.

Fe – залізо. Залізо та магнітна залізна руда, в основному, використовуються як добавки до пластику PLA. Чисте залізо рідко застосовується в промисловості.

Також використовуються інструментальні, нержавіючі, жароміцні сплави, медичний кобальт-хром, а також сплави на основі алюмінію та титану тощо. Кожен метал і сплав має певні властивості. Найбільш поширеними і затребуваними є такі матеріали: титановий сплав Ti6Al4V; нікелевий сплав IN718; алюмінієвий сплав AlSi10Mg.

Ti6Al4V є найпоширенішим титановим сплавом з хорошими механічними властивостями. Вважається найтвердішим і міцним титановим сплавом. Вирізняється особливо високою складністю обробки. Має щільність 4500 кг/м<sup>3</sup> і міцність на розрив більше 900 МПа. Сплав Ti6Al4V забезпечує незаперечні переваги щодо зниження ваги виробів у таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та суднобудівна. Використовуються ці метали, зокрема, при виготовленні лопаток турбін, камер згоряння, а також виробів, призначених для роботи при високих температурах (до +1100 °C).

IN718 – жаростійкий високоякісний сплав, який був створений для експлуатації при температурах до +980 °C (автор і розробник Ейзельштейн).

Нікель може розчиняти багато інших металів, зберігаючи пластичність. Наявність такої властивості призвів до появи багатьох нікелевих сплавів. Сплав нікелю і хрому широко використовується в авіаційних двигунах. З нього виготовляють робочі та соплові лопатки, диски ротора турбіни, деталі камери згоряння тощо.

Найбільш термостійкими є литі сплави на основі нікелю, які витримують температури до +1100 °C протягом сотень і тисяч годин при високих статичних і динамічних навантаженнях.

Алюмінієвий сплав AlSi10Mg є ідеальним матеріалом для технології SLM та виробництва тонкостінних виробів зі складною геометрією. Це найдешевший з литих сплавів. Матеріал широко використовується в промисловості завдяки низькій щільності та хорошим антикорозійним властивостям. До його переваг можна віднести високу плинність, електро- і теплопровідність. У промисловості їх, зазвичай, використовують для виготовлення великих тонкостінних відливок складної форми.

Металеві порошки є найміцнішими матеріалами для 3D-друку. Продукція створена на тривимірних принтерах багато в чому перевершує аналоги, що виготовлені за класичними технологіями (лиття, прокатка тощо).

Одним із факторів, що стримує широке впровадження металевих порошків в адитивні технології, є висока вартість дрібнодисперсних порошків та даного обладнання.

Тривимірні металеві принтери відчутно відрізняються від звичайних принтерів, зокрема за розмірами. Пристрої для тривимірного друку навіть при відносно невеликих розмірах мають значну вагу.

Запропонована технологія виготовлення виробів з використанням філаменту, що має високий вміст металевих порошків на основі нержавіючої сталі. Для її реалізації використовуються 3D-принтери із закритою конструкційною камерою, що працюють за технологією пошарового наплавлення полімерної нитки (FDM) [5, 6]. Схема технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу представлена на рис. 1 [3].

Представлена технологія складається з п'яти етапів (рис. 1):

- змішування тонкодисперсного металевого порошку та з'єднувального полімерного матеріалу;
- виготовлення нитки для 3D-друку із суміші;
- друк на 3D-принтері «зеленої» частини;
- видалення полімерного з'єднувача для отримання «коричневої» частини;
- спікання в печі та отримання готового продукту.

Сировиною для цієї технології є суміш дрібнодисперсного металевого порошку і полімерного з'єднувального матеріалу.

На першому етапі за допомогою міксера два компоненти змішуються для отримання однорідної сировини.

На другому етапі використовується екструзійна машина для отримання нитки для 3D-друку. Сировина засипається в бункер, захоплюється шнеком і подається в робочу зону корпусу екструдера. Полімер нагрівається до певної температури, розплавляється та зв'язує частинки металу між собою. Суміш подається шнеком до матриці. Шнек, що знаходиться у циліндрі дозволяє створювати тиск в зоні виходу суміші. Це змушує полімер «набухати» після виходу з екструдера. за допомогою вихідного отвору регулюємо діаметр полімерної нитки. Екструдована нитка подається через систему примусового охолодження.

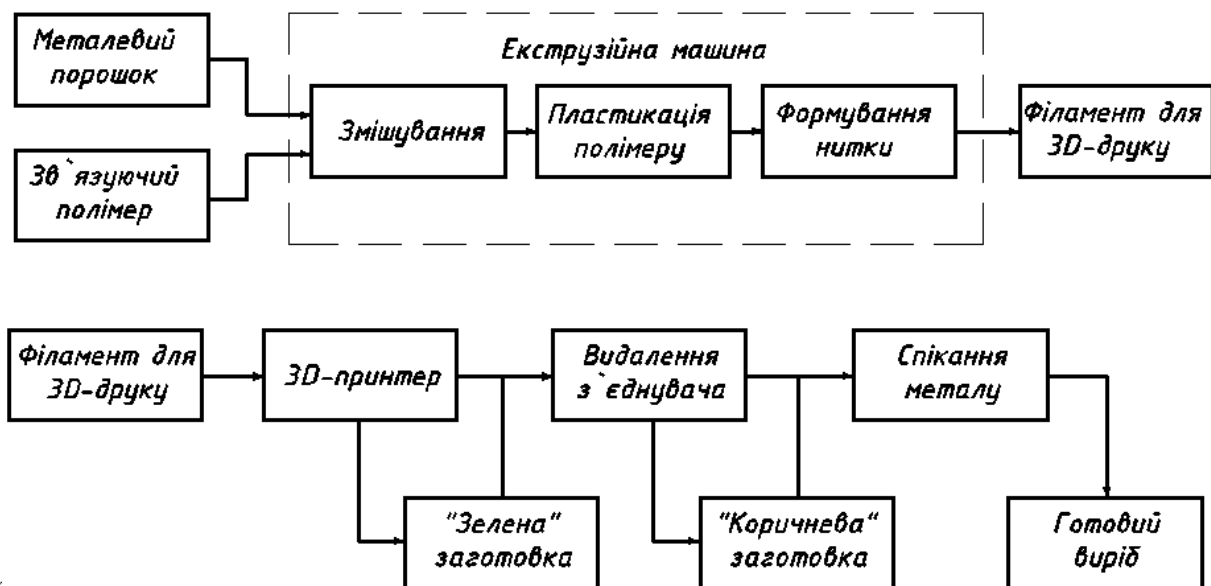


Рис. 1. Схема технологічного процесу виготовлення виробів галузевого машинобудування методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу

Філамент являє собою нитку з 90-відсотковою часткою порошкового металевого наповнювача і може використовуватись у звичайному настільному 3D-принтері FDM, але з удосконаленням його певних вузлів.

На третьому етапі з полімерної нитки на 3D-принтері отримують заготовку, яку називають «зеленою» заготовкою. Використання матеріалів, наповнених металевим порошком, є більш складним завданням, ніж друк із використанням звичайних ниток. Нитки з металевим наповнювачем (особливо порошком зі сталі) дуже абразивні і вимагають принтера з удосконаленим механізмом завантаження нитки, а також іншої конструкції друкуючої головки.

На четвертому етапі з'єднувальний матеріал видаляється за допомогою розчинника, каталізаторів або термічного випалювання для отримання пористої «коричневої» заготовки.

Завершальним етапом процесу є спікання в печі металевих частинок «зеленої» заготовки. У процесі виконання цієї операції відбувається заповнення пор і ущільнення матеріалу шляхом злиття частинок без помітного збільшення розмірів кристалів (готовий виріб).

Сировиною для запропонованої технології (рис. 1) є суміш дрібнодисперсного металевго порошку та полімерного з'єднувального матеріалу.

Для отримання високоякісної продукції методом 3D-друку металеві порошки, які використовуються як наповнювачі волокна, повинні відповідати особливим вимогам – мати однорідний хімічний склад, сферичну або круглу форму з коефіцієнтом форми від 1,0 до 2,0 і вузький гранулометричний склад. Такі порошки мають кращу плинність і вищу об'ємну щільність порівняно з порошками з дендритною формою частинок, що повинно забезпечити кращу однорідність волокна для технології FDM. Порошок також повинен добре змішуватися з полімерами, спікатися до достатньо високої щільності і мати достатньо високу температуру плавлення і спікання, щоб не заважати процесу знежирення.

Для виготовлення нитки використано металевий порошок з нержавіючої сталі китайського виробника (рис. 2). Частинки металевго порошку з нержавіючої сталі досліджували за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) для оцінки їх хімічного складу. До хімічного складу частинок нержавіючої сталі входять: залізо (Fe), хром (Cr), нікель (Ni), молібден (Mo), кремній (Si). Основними елементами цієї сталі є Fe (приблизно 65%), Cr (17%) і Ni (9%). В результаті досліджень було виявлено, що склад відповідає стандартним характеристикам нержавіючої сталі AISI 316L.



Рис. 2. Порошок з нержавіючої сталі



Рис. 3. Пластиковий порошок PLA

Використання електронного мікроскопа дозволило встановити, що цей порошок має однорідний хімічний склад, коефіцієнт форми знаходиться в межах 1,0-2,0. Форма частинок переважно сферична, а розмір частинок знаходиться в межах 20–23 мкм.

Сферичні частинки мають високу насипну щільність, краще змішуються з полімерним матеріалом і рівномірно розподіляються, що призводить до високої степені однорідності. Така форма мікрочастинок також зменшить знос робочих частин екструзійної машини або екструдера 3D-принтера.

Невеликий розмір частинок і вузький їх розподіл за розміром підвищать щільність та покращать однорідність готового продукту після операції спікання.

Дослідження підтвердили можливість використання металевго порошку з нержавіючої сталі, який досліджувався як наповнювач волокна для 3D-друку.

Другим компонентом нитки є з'єднувальний матеріал. Металевий порошок – це те, що забезпечує структурні властивості готового продукту. Роль з'єднувача полягає виключно в забезпеченні вихідної суміші формувальної здатності та властивостей, які зберігають форму під час виготовлення виробу.

Проведені експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку.

Порівнюючи отримані результати досліджень різних типів полімерних матеріалів, в якості з'єднувача було запропоновано використовувати PLA пластиковий порошок (рис. 3) [7].

На першому етапі описаної технології (рис. 1) за допомогою змішувача відбувається змішування двох компонентів для отримання сировини.

На другому етапі використовується екструзійна машина для отримання нитки для 3D-друку.

Для виготовлення нитки з вищевказаних матеріалів для 3D-друку використовується машина для екструзії, що приведена на рис. 4.

Екструзійна машина складається з наступних частин: корпусу з системою нагріву (1) до необхідної температури плавлення полімеру; блоку завантаження (2), через який в порожнину корпусу надходить заздалегідь підготовлена суміш полімерних і металевих частинок нержавіючої сталі; порожнини кожуха із шнеком для переміщення сировини від вузла завантаження до формуючої насадки; гвинт; екструзійної головки, яка задає діаметр виготовленої нитки; системи охолодження та намотування філаменту; системи контролю та управління, що підтримує необхідний технологічний режим.

Завдяки тому, що до складу нитки входить металевий порошок, була спроектована і виготовлена конструкція шнека для подачі матеріалу. Також було розроблено форму екструзійної головки, яка задає діаметр філаменту, що виготовляється.

Експериментальні дослідження зносу екструзійної насадки екструдера проводилися при контакті її внутрішньої стінки з абразивною ниткою. З цією метою головка виготовлялася з різних матеріалів. За результатами проведеного експерименту встановлено, що найменше зношувалася насадка, що була виготовлена зі сталі. Тому для повноцінної роботи екструдера було запропоновано використовувати

формує головку екструдера із загартованої сталі E3D діаметром 1,75 мм. Виготовлення нитки при використанні формуючої латунної насадки призводило до швидкого зношування латуні. Збільшення отвору насадки призводить до збільшення діаметра філаменту, що є недопустимим для 3D-принтерів.



Рис. 4. Екструдер для виготовлення нитки з металевим наповнювачем для 3D друк

Нитка, що складається на 85% з порошку нержавіючої сталі та 15% з'єднувального полімеру, виготовляється шляхом екструзії сировини на запропонованому обладнанні при температурі нагріву 130°C і швидкості екструзії 50 мм/хв. Екстудована нитка діаметром 1,75 мм подається через систему примусового охолодження і рівномірно намотується на котушку.

За зоною охолодження установки з допомогою оптичного приладу здійснюється перевірка відповідності діаметру екстудованої нитки.

Для друку деталей було обрано 3D-принтер 4max Pro китайської фірми AnyCubic.

Одним із чинників при виборі було те, що даний 3D-принтер має повністю закриту конструкцію. Це дозволить підтримувати температуру, необхідну для друку з використанням нитки, наповненої порошком нержавіючої сталі.

У зв'язку з тим, що філаменти з металевими наповнювачами (особливо з порошком нержавіючої сталі) дуже абразивні і потребують принтера з іншим механізмом завантаження, а також іншої конструкції друкуючої головки, було здійснено удосконалення екструдера. Удосконалення було завершено розробкою нового механізму транспортування нитки, наповненої абразивним матеріалом.

Проведені експериментальні дослідження зносу насадки екструдера 3D-принтера при контакті з абразивною ниткою аналогічні, як і формуючої головки екструзійної машини. Для повноцінної роботи принтера було запропоновано використовувати екструдер із загартованої сталі E3D діаметром 5 мм.

При подальших дослідженнях планується:

- друк «зеленої» частини з отриманої полімерної нитки на 3D-принтері;
- визначення оптимальних режимів друку «зелених» заготовок;
- видалення з'єднувача за допомогою розчинника, каталізаторів або термічним методом для отримання пористої «коричневої» заготовки;
- спікання в печі металевих частинок «зелених» заготовок;
- визначення мікроструктур нових металополімерних композитів на основі нержавіючої сталі для 3D-друку та готових виробів на основі їх оптичної та скануючої електронної мікроскопії з метою отримання

таких даних: однорідність, пористість, розмір зерна, характерний розподіл структурних компонентів, наявність неметалевих частинок тощо.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Підтверджено можливість ефективного використання філаментів з високим вмістом металів для виготовлення виробів та деталей галузевого машинобудування. Підібрано металевий порошок із нержавіючої сталі для виготовлення філаменту та досліджено його хімічний склад. Проведено експериментальні дослідження для визначення механічних, теплофізичних та реологічних характеристик полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення монониток для 3D-друку. На основі отриманих результатів запропоновано використати PLA пластиковий порошок в якості з'єднуючого елемента в філаменті. Здійснено удосконалення устаткування для виготовлення ниток з високим вмістом металу та 3D-друку готових виробів та деталей галузевого машинобудування на його основі.

### **Література**

1. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 4. С. 102–104.
2. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Неймак В.С., Поліщук А.О. Застосування технології 3D-друку у взуттєвій промисловості. Наукові нотатки. Луцький національний університет, 2019. Випуск 67. С. 48–52.
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 390–396.
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, 2017. P. 413–421.
5. Marius A. Wagner, Amir Hadian, Tutu Sebastian, Frank Clemens, Thomas Schweizer, Mikel Rodriguez-Arbaizar, Efrain Carreño-Morelli, Ralph Spolenak. Fused filament fabrication of stainless steel structures - from binder development to sintered properties. Additive Manufacturing. Volume 49, January 2022, 102472.
6. Fábio Cerejo, Daniel Gatões, M.T. Vieira. Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 115:2449–2464.
7. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку, Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 6. С. 51–59.

### **References**

1. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O. Prospects for the use of 3D printing in light industry. Herald of Khmelnytskyi National University, 2017. № 4. P. 102-104.
2. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Nejmak V.S., Polishchuk A.O. Application of 3D printing technology in the footwear industry. Scientific notes. Lutsk National University, 2019. Issue 67. P. 48-52.
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 390-396.
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editor by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, 2017. P. 413-421
5. Marius A. Wagner, Amir Hadian, Tutu Sebastian, Frank Clemens, Thomas Schweizer, Mikel Rodriguez-Arbaizar, Efrain Carreño-Morelli, Ralph Spolenak. Fused filament fabrication of stainless steel structures - from binder development to sintered properties. Additive Manufacturing. Volume 49, January 2022, 102472.
6. Fábio Cerejo, Daniel Gatões, M.T. Vieira. Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 115:2449–2464.
7. Polishchuk O.S., Zozulya P.F., Polishchuk A.O. Generalized classification of filaments for 3D printing. Herald of Khmelnytskyi National University, 2017. № 6. P. 51-59.